

*Оригинальная статья*

УДК 621.771.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-769-777

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2430>

КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ СОРТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ. СООБЩЕНИЕ 4. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ КАЛИБРОВКИ

А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В рамках разрабатываемой на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета (УрФУ) «Концепции оптимальной калибровки УрФУ», калибровка сортопрокатных валков рассматривается с позиций системного анализа. Калибровка, как технологическая система, может быть изменена двумя путями: изменяя структуру системы, что соответствует изменению формы калибров, и изменяя управление системой, что соответствует изменению обжатий по проходам в одних и тех же калибрах, т. е. изменяя режим обжатий. Оптимальной можно признать калибровку, содержащую такие калибры и реализующую такой режим обжатий, которые обеспечивали бы экстремальные свойства у заданных целевых функций, зависящих от указанных параметров. В предыдущих сообщениях этой серии рассмотрена общая концепция двухэтапной оптимизации калибровки, предусматривающая последовательное проведение оптимизации схемы калибровки (первый этап оптимизации) и применяемого режима обжатий (второй этап). Также рассмотрены процедуры построения оптимизационного пространства для первого этапа – пространства виртуальных схем калибровок, формируемого при помощи специального генератора таких схем и перечня всех видов и типов калибров, возможных для использования на данной конкретной стадии прокатки – пространства калибров. Для расчета целевой функции критерия оптимальности схемы калибровки вводится понятие «пространство эффективности калибров». Формирование этого пространства производится с использованием формализованной процедуры экспертного оценивания степени влияния различных допустимых форм калибров, применяемых в калибровке на разноплановые технологические, экономические и других характеристики конкретного сортопрокатного стана. Целевая функция рассчитывается как дисперсия интегральных показателей эффективности калибров, входящих в калибровку относительно гипотетического «идеального» калибра, обладающего наилучшими значениями выбранных показателей эффективности. Оптимальной признается схема калибровки, соответствующая минимальному значению целевой функции.

Ключевые слова: сортовая прокатка, калибровка прокатных валков, калибр, системный анализ, оптимизация калибровки валков, пространство схем калибровок, пространство эффективности

Для цитирования: Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 4. Оптимизация схемы калибровки // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 769–777. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-769-777>

Original article

THE CONCEPT OF OPTIMAL BAR ROLL PASS DESIGN. REPORT 4. OPTIMIZATION OF ROLL PASS DESIGN SCHEME

A. M. Mikhailenko, D. L. Shvarts

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

Abstract. Roll pass design of shape rolling rolls is considered from the standpoint of system analysis within “UrFU concept of optimal roll pass design” created in the Chair “Metal Forming” of the Ural Federal University. Roll pass design as a technological system can be changed in two methods: 1) changing the structure of the system which corresponds to a change in the groove shape; 2) changing the control of the system, which corresponds to changing reduction through the pass in the grooves, that is, by changing the reduction mode. Roll pass design that compose of the definite grooves and realize the definite reduction mode, which assures of optimal properties of preassigned objective function depending on the specified parameters, is considered optimal. General conception of two-stage optimization of roll pass design: consistent conduct of optimization of roll pass design scheme (first stage of optimization) and mode of reduction (second stage of optimization), was considered in previous reports. Procedures of formation of optimization space for first stage – space of virtual schemes of roll pass design generated by the special generator and set of all possible types of grooves that can be used at this particular stage of rolling, were also described. To calculate the objective function of the optimality criterion of the roll pass design scheme, the authors introduced the concept of “space of grooves efficiency”. Formation of this space is carried out using a formalized procedure for expert evaluation of the degree of influence of various permissible forms of grooves used in roll pass design on the diverse technological, economic and other characteristics of a particular rolling mill. The objective function is calculated as variance of integral performance indicators of

the grooves included in the roll pass design relative to the hypothetical “ideal” groove with the best values of the selected performance indicators. The roll pass design scheme corresponding to the minimum value of the objective function is considered the best.

Keywords: section rolling, roll pass design, groove, system analysis, optimization of roll pass design, space of scheme of roll pass design, space of efficiency

For citation: Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll pass design. Report 4. Optimization of roll pass design scheme. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 769–777. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-769-777>

В рамках разрабатываемой «Концепции оптимальной калибровки» в работе [1] описана общая идея и схема оптимизации калибровки валков, пригодная для самого широкого спектра профилей проката. Оптимизационная модель основана на применении системного подхода к анализу сложных технических и технологических комплексов [2 – 5], к которым относится и любая калибровка сортопрокатных валков. Изменения функционирования любой системы возможно достичь двумя путями: меняя структуру системы [6 – 8] и меняя управление системой [9 – 10]. В калибровке валков эти пути соответствуют изменению схемы калибровки (за счет применения калибров различной конфигурации) и режима обжатий (перераспределению обжатий металла по проходам). Несмотря на очевидную связь схемы калибровки и режима обжатий, их можно рассматривать и оптимизировать последовательно, учитывая имеющиеся на практике возможности раздельного изменения того и другого (например, изменять форму калибров за счет переточки валков и режим обжатий за счет изменения межвалкового зазора). Выбранный авторами путь поэтапной, двухстадийной оптимизации обоснован весьма высокой сложностью и, главное, многовариантностью решаемой задачи.

Общая оптимизационная модель логически разбита на ряд блоков формирования и обработки информации, каждый из которых заслуживает отдельного рассмотрения и изложения. В работе [11] изучена структура, назначение и содержание информационного блока «пространство калибров». В этом пространстве все калибры, принципиально применимые для прокатки данного профиля и конкретного прокатного стана, упорядочены в координатах выбранных свойств калибров. Также приведены примеры дискретных пространств калибров, применяемых при производстве рельсов и швеллеров. Основой для наполнения пространства калибров явились известные промышленные калибровки [12 – 14]. В работе [15] описаны принципы формирования информационного блока, отражающего «пространство схем калибровок», являющееся первым пространством оптимизации (в соответствии с моделью [1]). Пространство схем калибровок формируется с использованием рассмотренного ранее пространства калибров [11] и определенного алгоритма, отражающего специфику конкретного профиля проката. В работах [15 – 16] приведены примеры формирования пространств схем калибровок для прокатки рельсов и швеллеров.

В настоящей статье рассматриваются процедуры выбора оптимальной схемы калибровки из сформированного ограниченного пространства виртуальных схем [15 – 16] для условий прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане. Такая задача выбора «наилучшей структуры из имеющегося множества возможных структур» является типичной задачей поиска оптимума. Разнообразные варианты ее решения широко освещены в работах [17, 18].

Все известные методы оптимизации (линейное программирование, динамическое программирование, стохастическое программирование и др.) основаны на использовании некоторого «критерия оптимальности». В математической и технической литературе можно встретить достаточно широкую, и не всегда однозначную трактовку термина «критерий оптимальности». Поэтому сформулируем определение этого термина по аналогии с близким по сути понятием «статистический критерий», определенным в ISO 3534-1:2006 (ГОСТ Р ИСО 3534-1 – 2019) [19] следующим образом: «статистический критерий (statistical test) – процедура, предназначенная для принятия решения о том, может ли быть отклонена нулевая гипотеза в пользу альтернативной гипотезы». В ранее действовавших стандартах – в ГОСТ Р 50779.10 – 2000: «статистический критерий – статистический метод принятия решений о том, стоит ли отвергнуть нулевую гипотезу в пользу альтернативной или нет», в ГОСТ 15895-77: «статистический критерий – однозначно определенный способ проверки статистических гипотез». Ключевыми словами в этих определениях являются слова «процедура», «метод», «способ». Используя аналогию, получим следующее определение. Критерий оптимальности схемы калибровки – это однозначно определенный метод (способ, процедура) поиска схемы калибровки, наилучшим образом удовлетворяющей цели (или целям) оптимизации.

При таком понимании критерий оптимальности, как метод принятия решения, должен включать в свой состав:

- цель оптимизации;
- пространство оптимизации (в данном случае это сформированное ранее «пространство схем калибровок», например, для рельсов [11] и швеллеров [16]);
- целевую функцию, зависящую от параметров пространства оптимизации и отвечающую цели оптимизации;
- метод поиска оптимума;
- правило принятия решения.

Целевая функция (обозначим Q) неразрывно связана с целью оптимизации, поэтому имеет смысл рассматривать эти две компоненты критерия оптимальности совместно.

В условиях современного товарного сортопрокатного производства к калибровке прокатных валков предъявляется множество разнообразных требований: формирование заданной геометрии прокатываемого профиля, обеспечение требуемой производительности стана, минимизация расхода энергии и себестоимости, формирование заданной структуры, свойств и т. д. При этом, с точки зрения калибровки, эти требования часто являются не только разнородными, но иногда и противоречивыми. Любое требование, предъявленное к калибровке, можно рассматривать как отдельную «частную цель», каждую из которых хотелось бы достичь, причем одновременно, т. е. используя одну и ту же калибровку. Наличие разнородных требований к калибровке при формировании целевой функции неизбежно приводит к возникновению так называемой «проблемы неопределенности цели». Формируя различные целевые функции, например, на основе выбора какой-то из целей в качестве «главной цели», в результате соответствующей оптимизации будут получены разные калибровки. Данная причина, а также различия в ограничениях калибровки (конструкция прокатного стан, вид заготовки и т. п.) привели к тому, что в истории мировой сортопрокатной практики для производства одних и тех же (или подобных) профилей применялся и применяется довольно широкий спектр разнообразных схем калибровки валков.

Наиболее простым методом преодоления неопределенности цели при формировании целевой функции является процедура «выбора главной цели» и использования остальных целей в качестве ограничений пространства оптимизации. Однако в условиях современного прокатного производства такого простого подхода уже недостаточно. Необходимо использовать «многоцелевые» критерии оптимальности. Авторами поставлена задача сформулировать некую комплексную целевую функцию, позволяющую одновременно достигать максимально широкого спектра разноплановых целей если не на оптимальном, то на технологически рациональном уровне каждой частной цели. Причем критерий оптимальности должен быть адаптивным, настраиваемым, способным менять приоритеты в соответствии с конкретной производственной, рыночной, экономической и другой ситуацией.

Сформулированная таким образом задача оптимизации калибровки является задачей «многоцелевой оптимизации» или, как чаще называют в специальной литературе [20–23], «задачей многокритериальной оптимизации» (МКО-задача). Классическим решением МКО-задач является формирование «множества Парето», «фронта Парето» или «множества Слейтера». Однако этот путь приводит лишь к выявлению множества

возможных решений МКО-задачи, а окончательный выбор единственного решения из этого множества возможен лишь на основе предпочтений так называемого «лица, принимающего решение» (ЛПР), часто весьма субъективных. Известно довольно большое количество алгоритмов формализации предпочтений ЛПР, позволяющих обосновать единственное решение МКО-задачи. Однако не все из них возможно применить к решению задачи оптимизации схемы калибровки, что связано со сложностями абсолютной формализации калибровки.

Одним из наиболее простых и универсальных путей решения МКО-задач является применение так называемой «свертки критериев», фактически сводящей решение МКО-задачи к однокритериальной задаче со сложной (составной) целевой функцией. Метод свертки критериев также не лишен субъективизма ЛПР, однако при условии привлечения известных процедур повышения объективности (например, за счет учета мнений максимально большого числа экспертов), представляется более подходящим для рассматриваемого случая.

Общая процедура формирования целевой функции Q может быть представлена в виде структурной схемы, показанной на рисунке.

Исходя из самых общих представлений об эффективности сортопрокатного производства, в качестве частных целей оптимизации схемы калибровки выбраны цели и показатели, приведенные в табл. 1.

В данном случае не удалось учесть все возможные частные цели оптимизации схемы калибровки, которые могут встретиться на практике. Однако в каждом конкретном случае список из табл. 1 может быть как расширен, так и сокращен, что не влияет на принципиальную суть рассматриваемого ниже критерия оптимальности.

Поставим в соответствие каждой i -й частной цели оптимизации схемы калибровки из табл. 1 одноименный «частный показатель эффективности g_i ». Число-



Последовательность формирования целевой функция критерия оптимальности схемы калибровки

Subsequence of formation of objective function of the optimality criterion of the roll pass design scheme

Частные цели оптимизации схемы калибровки и их характеристики

Table 1. Particular objectives of optimization of the roll pass design scheme and their characteristics

Номер, i	Назначение частной цели	Частная цель оптимизации и соответствующий частный показатель эффективности g_i	Целевое направление g_i^{extr}	Ранг влияния цели, A_i
1	Формирование качества	Стабильность формоизменения	Максимум	13
2		Вероятность образования дефектов	Минимум	14
3		Склонность к износу	Минимум	11
4		Возможность утяжки	Минимум	12
5		Сложность настройки и подстройки	Минимум	10
6	Затраты на валки и привалковую арматуру	Величина начального диаметра	Минимум	9
7		Использование бочкового пространства	Максимум	8
8		Необходимая ширина бурта	Минимум	7
9		Возможность сопряжения калибров	Максимум	0
10		Глубина вреза	Минимум	6
11		Сложность привалковой арматуры	Минимум	4
12		Величина переточки при ремонте	Минимум	5
13	Энергозатраты	Сила прокатки	Минимум	2
14		Крутящий момент прокатки	Минимум	3
15		Воздействие на привалковую арматуру	Минимум	1

вые значения показателей g_i должны описывать степень соответствия калибров, составляющих калибровку, целевому направлению i -й частной цели оптимизации g_i^{extr} (4-й столбец в табл. 1). Способ установления числовых значений частных показателей эффективности g_i рассмотрен ниже.

Используем выбранные частные показатели эффективности g_i в качестве координат некоего пространства, названного «пространство эффективности калибров». Для указанных в табл. 1 пятнадцати частных целей оптимизации это будет 15-ти мерное пространство. В этом пространстве для каждого калибра с номером k полный набор конкретных числовых значений g_i будет представлять собой точку с координатами g_{ik} . Назовем такую точку «точка эффективности калибра G » с координатами g_i , т. е. $G(g_i)$.

Сформированные авторами в качестве примеров пространства калибров для прокатки рельсов [11] и швеллеров [16] являются пространствами сложных геометрических объектов. Эти пространства упорядочивают входящие в них калибры по их геометрическим признакам, не имеющим простого и однозначного числового описания, поэтому использованные уровни варьирования этих признаков носят описательный, качественный характер.

Для упорядочения пространства рельсовых калибров были использованы три координаты (три признака классификации калибров): Т – «вид калибра» (6 уровней изменения координаты); С – «симметричность ка-

либра» (4 уровня); Р – «тип закрытия калибра» (7 уровней) [11]. Для описания пространства швеллерных калибров пришлось использовать четыре координаты: С – «вид стенки» (4 уровня изменения координаты); Д – «вид действительных фланцев» (5 уровней); Л – «вид ложных фланцев» (3 уровня); Р – «тип закрытия калибра» (5 уровней) [16].

В принципе, используя какую-то обобщенную геометрическую модель калибра (например, матрично-векторное описание [24, 25] или обобщенный метод описания калибров [26, 27]), вполне возможно использовать координаты пространства калибров, имеющие и количественное выражение. Однако размерность такого геометрического пространства будет существенно зависеть от вида прокатываемого профиля и типов применяемых калибров. Чем сложнее геометрическая форма калибра, тем больше будет размерность пространства. Но даже для калибров простой формы размерность пространства калибров будет весьма высока. Например, при использовании матрично-векторного подхода в работе [28] было использовано «двухсотвекторное описание четверти простого калибра». Для подробного же описания калибров более сложной конфигурации (например, рельсовых или швеллерных) размерность пространства калибров может достигать нескольких тысяч. При таких условиях проведение поиска оптимума становится или практически невозможным, или весьма затратным по времени даже с использованием наиболее современных алгоритмов [20] и вычислитель-

ной техники. Именно по этой причине был выбран более простой качественный способ описания координат пространства калибров.

Однако данный способ описания координат пространства калибров имеет существенный недостаток. Он не позволяет напрямую построить функциональные зависимости показателей эффективности калибров g_i от этих координат пространства калибров с использованием обычных аналитических методов. Скорее всего, единственным известным способом решения такого класса задач является использование методов экспертной оценки [29] и ранжирования [30]. В соответствии с этой идеологией, необходимо каждому из уровней n каждой координаты j пространства калибров экспертно присвоить ранг R_{ijn} по каждому из показателей эффективности g_i из табл. 1, учитывая целевое направление g_i^{extr} рассматриваемого показателя эффективности g_i , указанного в предпоследнем столбце этой таблицы. В обозначении ранга калибра R_{ijn} принято: i – порядковый номер показателя эффективности g_i из табл. 1; j – координата пространства калибров (координатная ось); n – значения уровня j -й координаты пространства калибров. Например, для пространства рельсовых калибров [11] координата $j \in \{T, C, P\}$, а для пространства швеллерных калибров [16] $j \in \{C, Д, Л, P\}$. Количество уровней n по каждой из этих координат приведено выше.

Экспертное назначение рангов калибров R_{ijn} производится с использованием следующего набора правил:

– чем «лучше» уровень n текущей координаты j по рассматриваемому показателю эффективности g_i ,

чем сильнее он приближает виртуальную схему калибровки к гипотетической «идеальной калибровке», тем меньше у него числовое значение ранга R_{ijn} (для рассматриваемого частного показателя эффективности g_i , при наилучшем уровне n текущей координаты j , $R_{ijn} = 1$);

– при одинаковой влиятельности двух или более уровней n координаты j на рассматриваемый показатель эффективности g_i , всем этим уровням присваивается одинаковый ранг R_{ijn} ;

– если какая-то координата j пространства калибров, по мнению экспертов, не оказывает влияния на рассматриваемый показатель эффективности, то для всех значений n этой координаты принимается одинаковое значение ранга $R_{ijn} = 0$.

Примеры результатов ранжирования, проведенного по указанным правилам для показателей эффективности g_i из табл. 1 по одной из координат пространств калибров приведены в табл. 2 (для пространства рельсовых калибров) и табл. 3 (для пространства швеллерных калибров).

Виды рельсовых калибров, закрепленных на каждом уровне n координаты Т приведены в работе [11]. Виды швеллерных калибров, закрепленных на каждом уровне n координаты Р приведены в работе [16].

Аналогичные таблицы сформированы и для других координат рассмотренных пространств рельсовых и швеллерных калибров.

Ранжирование пространств рельсовых и швеллерных калибров, показанное в табл. 2 и 3, проведено лишь

Т а б л и ц а 2

Ранги R_{ijn} пространства рельсовых калибров в зависимости от уровня n координаты $j = T$ – «вид калибра»

Table 2. Grades R_{ijn} of space of rail grooves depending on the level n of coordinate $j = T$ – “kind of groove”

i	Показатель эффективности g_i	Уровень n координаты Т						R_{iTmax}
		1	2	3	4	5	6	
1	Стабильность формоизменения	6	3	5	1	4	2	6
2	Вероятность образования дефектов	3	4	6	5	1	2	6
3	Склонность к износу	3	4	5	6	6	2	6
4	Возможность утяжки	2	1	3	6	5	3	6
5	Сложность настройки и подстройки	4	4	2	1	3	5	5
6	Величина начального диаметра	2	4	5	5	5	3	5
7	Использование бочкового пространства	1	2	3	3	4	1	4
8	Необходимая ширина бурта	2	3	4	5	6	1	6
9	Возможность сопряжения калибров	1	2	4	3	5	4	5
10	Глубина вреза	2	3	5	5	4	3	5
11	Сложность привалковой арматуры	1	2	4	2	4	3	4
12	Величина переточки при ремонте	2	3	4	5	4	2	5
13	Сила прокатки	2	4	5	6	3	1	6
14	Крутящий момент прокатки	3	4	6	1	5	2	1
15	Воздействие на привалковую арматуру	3	4	5	6	1	2	1

Ранги R_{ijn} пространства швеллерных калибров в зависимости от уровня n координаты $j = P$ – «тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр»

Table 3. Grades R_{ijn} of space of channel grooves depending on the level n of coordinate $j = P$ – “type of groove closure and the number of rolls forming the groove”

i	Показатель эффективности g_i	Уровень n координаты P					R_{iPmax}
		1	2	3	4	5	
1	Стабильность формоизменения	3	2	1	1	2	3
2	Вероятность образования дефектов	3	2	5	1	4	5
3	Склонность к износу	2	3	5	4	1	5
4	Возможность утяжки	3	4	1	5	2	4
5	Сложность настройки и подстройки	5	4	1	3	2	5
6	Величина начального диаметра	2	3	3	4	1	4
7	Использование бочкового пространства	2	3	3	4	1	4
8	Необходимая ширина бурта	2	3	4	4	1	4
9	Возможность сопряжения калибров	2	4	3	5	1	5
10	Глубина вреза	2	3	4	5	1	5
11	Сложность привалковой арматуры	4	3	2	2	1	4
12	Величина переточки при ремонте	2	3	4	4	1	4
13	Сила прокатки	2	3	4	3	1	4
14	Крутящий момент прокатки	1	2	5	4	3	5
15	Воздействие на привалковую арматуру	2	3	5	4	1	5

с учетом экспертного мнения авторов статьи, причем из наиболее общих соображений, без учета специфики конкретного прокатного стана, типоразмера профиля и других аспектов, несомненно чрезвычайно важных для реальной практики. Для повышения объективности значений ранговых оценок в конкретных производственных условиях следует учитывать мнения максимально большого числа экспертов, причем желательно, не только из числа работников данного предприятия, но и с привлечением известных специалистов сортопрокатчиков из сторонних организаций. Сбор мнений экспертов и статистическую обработку результатов опроса можно провести в соответствии с известными методами [29, 30].

В соответствии с принятой системой назначения рангов, наибольшая величина ранга для каждого из показателей эффективности g_i при разных координатах j может отличаться. Поэтому для исходного выравнивания влияния показателей эффективности g_i на значение формируемой целевой функции Q произведем нормирование рангов R_{ijn}

$$r_{ijn} = \frac{R_{ijn}}{R_{ijmax}}, \quad (1)$$

где R_{ijmax} – наибольшее значение ранга для каждого из сочетаний i и j (наибольшее значение для каждой из

строк в табл. 2 и 3 приведено в последнем столбце этих таблиц).

В результате нормирования, табл. 2 и 3 будут преобразованы в аналогичные по структуре таблицы нормированных ранговых значений r_{ijn} , каждое из которых находится в диапазоне значений $0 \leq r_{ijn} \leq 1$.

Для каждого k -го калибра расчет числовых значений координат точки эффективности $G_k(g_{ki})$ произведем путем свертки нормированных ранговых значений r_{ijk} по всем координатам j пространства калибров в виде их произведения

$$g_{ki} = \prod_{j=T,C,P} r_{ijn}. \quad (2)$$

Значение общего интегрального показателя эффективности k -го калибра G_k^Σ найдем как линейную комбинацию координат вектора эффективности $G_k(g_{ki})$. Однако при этом необходимо учесть, что в разных экономических, технических и прочих условиях реального прокатного стана приоритетность, влияние каждого из используемых показателей эффективности g_i на конечный выбор того или иного калибра может быть различной. Для учета этого обстоятельства, в расчетное выражение для G_k^Σ в качестве коэффициентов линейной комбинации введем весовые коэффициенты a_i (будем называть их «коэффициенты влияния цели»). При таком подходе, выражение для расчета

общего показателя эффективности k -го калибра будет иметь вид

$$G_k^\Sigma = \sum_{i=1}^{N_g} a_i g_{ki}, \quad (3)$$

где N_g – количество используемых показателей эффективности (в данном примере 15).

Коэффициент влияния цели a_i должен отражать степень изменения значения общего показателя эффективности G_k^Σ под воздействием изменения уровня соответствующего частного показателя эффективности g_i . Чем более значима i -я частная цель оптимизации, тем к большим изменениям G_k^Σ должно приводить изменение нормированной величины g_i . При использовании качественного способа описания уровней варьирования координат пространства калибров установить числовые значения коэффициентов влияния a_i на основе физических, технических, экономических или каких-то других строгих и объективных закономерностей невозможно. Поэтому для выбора величин этих коэффициентов также будем использовать процедуры экспертного ранжирования и нормирования, аналогичные рассмотренным выше, используя следующий алгоритм.

На основании экспертного мнения каждой i -ой частной цели оптимизации устанавливается ранг влияния A_i , используя следующие правила:

- наименее значимая частная цель имеет ранг, равный 1;
- чем более значима цель, тем выше числовое значение ее ранга влияния;
- при одинаковой значимости показателей их ранги совпадают;
- если, по мнению экспертов, какой-то показатель не имеет значения, то для всех калибров ($k = 1, 2, \dots, N_k$, где N_k – количество калибров в калибровке) следует принять значение $A_i = 0$.

В последней колонке табл. 1 приведено одно из возможных распределений рангов влияния A_i частных целей оптимизации.

Коэффициент влияния рассчитывается как нормированное значение ранга влияния

$$a_i = \frac{A_i}{A_{\max, i}}, \quad (4)$$

где $A_{\max, i}$ – наибольшее значение ранга влияния.

Возможны и другие принципы установления значений коэффициентов a_i , например, как доля от 1, так, чтобы выполнялось условие нормирования $\sum_{i=1}^{N_g} a_i = 1$.

Любая виртуальная схема калибровки валков представляет собой определенную последовательность определенных калибров, а, значит, наследует те свойства, которыми обладают калибры, составляющие эту

схему. Поэтому целевая функция Q критерия оптимальности виртуальной схемы калибровки в целом может быть составлена из рассмотренных выше общих показателей эффективности отдельных калибров G_k^Σ .

В пространстве эффективности калибров существует единственная точка, в которой каждый из частных показателей эффективности g_i примет свое экстремальное значение g_i^{extr} , наилучшим образом удовлетворяющее i -й частной цели оптимизации. Эта точка будет определять некий гипотетический, идеальный калибр. Такому «идеальному калибру» в пространстве эффективности калибров $G(g_i)$ будет соответствовать «идеальная точка эффективности $G_k(g_i^{extr})$ ». Чем ближе каждая координата g_i окажется к соответствующей координате идеальной точки эффективности g_i^{extr} , тем в большей степени будет удовлетворена i -я частная цель оптимизации. Такое представление и будем использовать для формирования целевой функции Q .

В соответствии с принятыми правилами ранжирования калибров наилучшее значение ранга $R_{ijn} = 1$. После нормирования рангов по выражению (1) получим, что наилучшему уровню n координаты j будет соответствовать наименьшее значение нормированного ранга $r_{ij \min} = \frac{1}{R_{ij \max}}$.

По выражению (2) координаты идеальной точки эффективности составят $g_i^{extr} = \prod_{j=T,C,P} r_{ij \min}$, а общий показатель эффективности «идеального калибра», рассчитанный по выражению (3), будет равен

$$G_{extr}^\Sigma = \sum_{i=1}^{N_g} a_i g_i^{extr}.$$

Это наилучшее значение общего показателя эффективности G_{extr}^Σ калибра соответствует единственной наилучшей точке $G_{extr}(g_i^{extr})$ пространства эффективности калибров, причем будет одинаковым для любого k -го калибра любой виртуальной схемы калибровки.

Целевую функцию Q для всей виртуальной схемы калибровки можно формировать по-разному, например, как аддитивную функцию общих показателей эффективности калибров, входящих в схему калибровки. Однако, учитывая наличие в пространстве эффективности «идеальной» точки эффективности $G_{extr}(g_i^{extr})$, возможен и другой подход: рассчитывать целевую функцию Q как дисперсию общих показателей эффективности G_k^Σ всех N_k калибров, составляющих калибровку, относительно «идеального» значения $G_{extr}(g_i^{extr})$

$$Q = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} (G_k^\Sigma - G_{extr}^\Sigma)^2. \quad (5)$$

При таком методе определения целевой функции Q , наилучшая калибровка будет соответствовать условию минимума этой функции

$$Q = \min. \quad (6)$$

Учитывая относительную простоту метода расчета значения целевой функции Q , а также большое, но ограниченное количество виртуальных схем калибровок, калибровку с минимальным значением Q можно определить простым перебором виртуальных схем.

Выводы

В рамках общей концепции двухэтапной оптимизации сортопрокатной калибровки валков сформулирован критерий оптимальности схемы калибровки. Критерий формируется на основе использования формализованной процедуры экспертного метода выбора

и оценивания степени влияния форм калибров, применяемых в калибровке, на разноплановые технологические, экономические и другие характеристики реального сортопрокатного производства. Рассмотрены структура и последовательность формирования целевой функции, рассчитываемой как дисперсия интегральных показателей эффективности калибров, входящих в калибровку относительно гипотетического «идеального» калибра. Минимальное значение целевой функции соответствует наилучшей схеме калибровки, предназначенной для прокатки конкретного профиля проката в конкретных условиях конкретного прокатного стана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Общие положения // Известия вузов. Черная металлургия, 2018. Т. 61. № 1. С. 21–27. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-1-21-27>
2. Месарович М., Такаха Я. Общая теория систем: математические основы / Под ред. В. С. Емельянова; пер. с англ. Москва: Мир, 1978. 311 с.
3. Мороз А.И. Курс теории систем: Учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1987. 304 с.
4. Skyttner L. *General Systems Theory: An Introduction*. Macmillan Press, 1996. 290 p.
5. Hester P.T., Adams K. MacG. *Systemic Decision Making: Fundamentals for Addressing Problems and Messes*. Springer, 2017. 414 p.
6. Huang B., Xing K., Spuzic S., Abhary K. Development of parameterized roll pass design based on a hybrid model // ICMET 2010 – Int. Conf. on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings. 2010. P. 91–93. <https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598326>
7. Lambiasi F., Langella A. Automated procedure for roll pass design // Journal of Materials Engineering and Performance. 2009. No. 18. P. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9289-2>
8. Abhary K., Kovacic Z., Lundberg S.-E., Narayanan R., Spuzic S. The application of a hybrid algorithm to roll pass design // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 79. No. 5–6. P. 1063–1070. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6865-0>
9. Wang Q., Huang P., Yin Y. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 112. No. 3–4. P. 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06353-z>
10. Lapovok R.Ye., Thomson P.F. The mathematical basis of optimal roll pass design // V-st Biennial Engineering Mathematics Conf. Melbourne, 1994. P. 1–9.
11. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 2. Пространство калибров. // Известия вузов. Черная металлургия, 2018. Т. 61. № 5. С. 364–371. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-364-371>
12. Прокатка и калибровка. Т. V, VI / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев и др. Днепропетровск: Днепро-Вал, 2004.
13. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инагович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Москва: Теплотехника, 2010. 490 с.
14. Gupta N.K. *Steel Rolling. Principle, Process & Application*. London, 2021. 526 p.
1. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll design. Report 1. Basic provisions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-1-21-27>
2. Mesarovic M.D., Takahara Y. *General Systems Theory: Mathematical Foundations*. Elsevier Science, 1975, 322 p. (Russ. ed.: Mesarovich M.D., Takahara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy*. Emel'yanov V.S. ed. Moscow: Mir, 1978, 311p.)
3. Moroz A.I. *Systems Theory. Textbook for Universities*. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 304 p. (In Russ.).
4. Skyttner L. *General Systems Theory: An Introduction*. Macmillan Press, 1996, 290 p.
5. Hester P.T., Adams K. MacG. *Systemic Decision Making: Fundamentals for Addressing Problems and Messes*. Springer, 2017, 414 p.
6. Huang B., Xing K., Spuzic S., Abhary K. Development of parameterized roll pass design based on a hybrid model. *ICMET 2010 – Int. Conf. on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings*. 2010, pp. 91–93. <https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598326>
7. Lambiasi F., Langella A. Automated procedure for roll pass design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009, no. 18, pp. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9289-2>
8. Abhary K., Kovacic Z., Lundberg S.-E., Narayanan R., Spuzic S. The application of a hybrid algorithm to roll pass design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 79, no. 5-6, pp. 1063–1070. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6865-0>
9. Wang Q., Huang P., Yin Y. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, vol. 112, no. 3-4, pp. 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06353-z>
10. Lapovok R.Ye., Thomson P.F. The mathematical basis of optimal roll pass design. *V-st Biennial Engineering Mathematics Conference. Melbourne*, 1994, pp. 1–9.
11. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal shaped roll pass design. Report 2. Calibers space. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 364–371. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-364-371>
12. Ilyukovich B.M., Nekhaev N.E., Merkur'ev S.E., etc. *Rolling and Pass Design*. Vols. V, VI. Dnepropetrovsk: Dnepro-Val, 2004. (In Russ.).
13. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Roll Pass Design. Tutorial for universities*. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 490 p. (In Russ.).
14. Gupta N.K. *Steel Rolling. Principle, Process & Application*. London, 2021, 526 p.

15. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 3. Пространство схем калибровок // Известия вузов. Черная металлургия, 2019. Т. 62. № 1. С. 15–24. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>
16. Schwartz D.L., Mikhailenko A.M., Ustinova E.I. Method of optimization of roll calibration for channels. Groove space // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Vol. 55. No. 3. P. 657–665.
17. Kirk D.E. Optimal Control Theory: An Introduction (Dover Books on Electrical Engineering). Dover Publications, 2004. 480 p.
18. Ackoff R.L., Sasieni M.W. Fundamentals of Operations Research. N.Y.: Wiley, 1968. 455 p.
19. ISO 3534-1:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability.
20. Vasant P., Weber G.-W., Dieu V.N. Handbook of Research on Modern Optimization Algorithms and Applications in Engineering and Economics. IGI Global, 2016. 960 p.
21. Лотов А.В., Пospelova И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. Москва: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
22. Munier A., Hontoria E., Jimenez-Saez F. Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making: A Practical Guide for Complex Scenarios. Springer, 2019. 288 p.
23. Triantaphyllou E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Springer, 2000. 320 p.
24. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. Т. 32. № 12. С. 63–65
25. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. Т. 33. № 2. С. 48–50.
26. Медведев В.С., Шлимовичус В.Я., Любимый К.В. Аналитическое описание контуров калибров произвольной формы // Совершенствование технологии производства сортового проката и гнутых профилей. Харьков, 1989. С. 13–18.
27. Михайленко А.М., Смирнов В.К., Устинова Е.И. Обобщенная модель сортовой двухвалковой прокатки. Аналитическое описание калибра и заготовки // Труды XI Конгресса прокатчиков. Т. I. 2017. С. 313–322.
28. Левандовский С.А., Синицкий О.В., Ручинская Н.А. Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации // Калибровочное бюро: Электронный научный журнал. 2014. Вып. 3. С. 52–80.
29. Ayyub B.M. Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. CRC Press, 2001. 328 p.
30. Орлов А.И. Теория принятия решений: Учебное пособие. Москва: Издательство «Март», 2004. 656 с.
15. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll pass design. Report 3. Space of roll pass design schemes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 1, pp. 15–24. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>
16. Schwartz D.L., Mikhailenko A.M., Ustinova E.I. Method of optimization of roll calibration for channels. Groove space. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020, vol. 55, no. 3, pp. 657–665.
17. Kirk D.E. *Optimal Control Theory: an Introduction*. Dover Publications, 2004, 480 p.
18. Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Fundamentals of Operations Research*. N.Y.: Wiley, 1968, 455 p.
19. *ISO 3534-1:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*.
20. Vasant P., Weber G.-W., Dieu V.N. *Handbook of Research on Modern Optimization Algorithms and Applications in Engineering and Economics*. IGI Global, 2016, 960 p. (In Russ.).
21. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Multi-Criteria Decision Making Tasks: Tutorial*. Moscow: MAKS Press, 2008, 197 p. (In Russ.).
22. Munier A., Hontoria E., Jimenez-Saez F. *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making: a Practical Guide for Complex Scenarios*. Springer, 2019, 288 p.
23. Triantaphyllou E. *Multi-Criteria Decision Making Methods: a Comparative Study*. Springer, 2000, 320 p.
24. Tulupov S.A. Matrix method for representing the forming process during rolling in grooves of simple shape. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989, vol. 32, no. 12, pp. 63–65. (In Russ.).
25. Tulupov S.A. Matrix method for representing the forming process during rolling in grooves of simple shape. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, vol. 33, no. 2, pp. 48–50. (In Russ.).
26. Medvedev V.S., Shlimovichus V.Ya., Lyubimiy K.V. Analytical description of the contours of grooves with arbitrary shape. In: *Improving the Technology for Production of Long Products and Roll-Formed Sections*. Kharkiv, 1989, pp. 13–18. (In Russ.).
27. Mikhailenko A.M., Smirnov V.K., Ustinova E.I. Generalized model of high-quality two-roll rolling. Analytical description of groove and workpiece. In: *Proceedings of the XI Congress of Rollers*. Vol. I. 2017, pp. 313–322. (In Russ.).
28. Levandovskii S.A., Sinitskii O.V., Ruchinskaya N.A. Experience in optimizing the shape of grooves according to the criterion of non-uniform deformation. *Kalibrovochnoe byuro: Electronic Scientific Journal*. 2014, no. 3, pp. 52–80. (In Russ.).
29. Ayyub B.M. *Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks*. CRC Press, 2001, 328 p.
30. Orlov A.I. *Decision Making Theory. Tutorial*. Moscow: Mart, 2004, 656 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аркадий Михайлович Михайленко, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: am_plus@mail.ru

Данил Леонидович Шварц, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-5962-6230
E-mail: sdl190977@mail.ru

Arkadii M. Mikhailenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
E-mail: am_plus@mail.ru

Danil L. Shvarts, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair “Metal Forming”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-5962-6230
E-mail: sdl190977@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022
После доработки 21.10.2022
Принята к публикации 22.10.2022

Received 19.07.2022
Revised 21.10.2022
Accepted 22.10.2022