



УДК 621. 771. 261

Е.И. Устинова, А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц
ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия
E-mail: ekatherinaustinova@gmail.com
Дата поступления 26.04.2018

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ, КАК ПЕРВОГО ЭТАПА ОПТИМИЗАЦИИ³

Аннотация

Общая процедура оптимизации калибровки валков для прокатки швеллеров разбита на два этапа: выбор оптимальной схемы калибровки и расчет оптимального режима обжатий. Рассмотрена модель первого этапа оптимизации. Разработанные алгоритмы, позволяют сформировать полное пространство виртуальных схем швеллерных калибровок, включающее все возможные схемы для конкретного вида швеллера и конкретного прокатного стана. Используемый многоцелевой критерий позволяет выявить оптимальную схему калибровки.

Ключевые слова: швеллер, схема калибровка валков, пространство швеллерных калибров, пространство схем швеллерных калибровок, показатель эффективности, целевая функция.

Введение

Любую калибровку сортопрокатных валков можно рассматривать как «вариативную систему калибров». Как и любая другая функционирующая система, калибровка, обладает двумя компонентами доступными для изменения и оптимизации. Первой такой компонентой является структура системы. В калибровке ей соответствует определенная последовательность калибров определенной формы, т.е. то, что принято называть «схемой калибровки». Второй компонентой является совокупность количественных характеристик связей между элементами системы, в калибровке же это соответствует распределению обжатий по проходам, т.е. «режиму обжатий» [1].

Для того, чтобы получить наилучшую, оптимальную калибровку необходимо достигнуть двух составляющих оптимальности. Система, структура которой, наилучшим образом соответствует поставленной цели оптимизации, считается «оптимальной системой». Следовательно, оптимальная калибровка должна обладать

«оптимальной схемой калибровки». А также наилучшие количественные характеристики связей между элементами системы будут соответствовать понятию «оптимальное управление». В калибровке валков оптимальным управлением будет являться «оптимальный режим обжатий» [2 – 4]. Т.е. для получения оптимальной калибровки необходимо выявить оптимальную схему калибровки и оптимальный режим обжатий.

Учитывая такое представление об оптимальности на кафедре Обработки металлов давлением Уральского Федерального Университета (УрФУ) разработана универсальная «Концепция двухэтапной оптимизации калибровки» [5], согласно которой на первом этапе выявляется оптимальная схема калибровки, а на втором – оптимальный режим обжатий (рисунок 1).

³ статья печатается по рекомендации оргкомитета международной молодежной научно-технической конференции "Magnitogorsk Rolling Practice 2018"

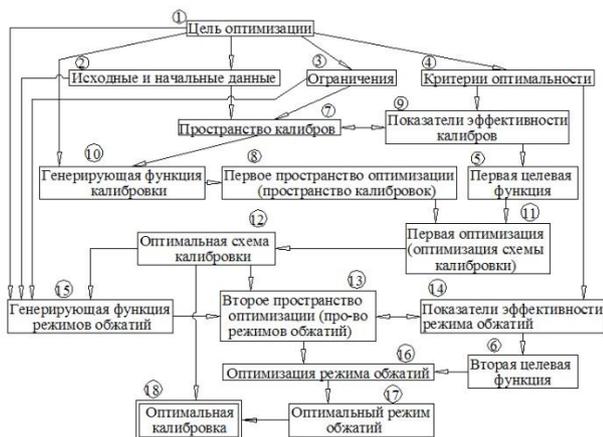


Рисунок 1. Блок-схема оптимизации

Основная часть

Выбор оптимальной схемы швеллерной калибровки представляет последовательность выполнения следующих этапов.

На первом этапе сформировано пространство швеллерных калибров. Исходя из анализа известных заводских калибровок [6 - 8] для прокатки швеллеров, выявлены основные признаки классификации швеллерных калибров, а также уровни их варьирования (С – вид стенки, 4 уровня варьирования; Д – вид действительных фланцев, 4 уровня варьирования; Л – вид ложных фланцев, 3 уровня варьирования; и Р – тип закрытия калибра и количество валков образующих калибр, 5 уровней варьирования) [9, 10]. Различные комбинации уровней варьирования признаков образуют преимущественно разные калибры и при изменении хотя бы одного из уровней, меняется и сам калибр. Таким образом, было получено 186 геометрически возможных калибров, каждому из которых присвоен уникальный код. Данные калибры образуют пространство швеллерных калибров. Само пространство швеллерных калибров представлено в виде упорядоченной, дискретной структуры, названной нами «Матрица швеллерных калибров» (рисунок 2) [9, 10].

	Уровень признака калибра				Код калибра	Пример калибра
	С	Д	Л	Р		
1	Прямая	Прямые с малым уклоном	Треугольные	Открытый	1111	
2				Полузакрытый	1112	
3				Закрытый сверху	1113	
124	Изопная	Прямые с малым уклоном	Трапециевидные	Полузакрытый	3122	
125				Закрытый сверху	3123	
126				Закрытый	3124	
127				4-х валковый	3125	

Рисунок 2. Фрагмент «Матрицы швеллерных калибров»

На втором этапе сформировано пространство схем швеллерных калибровок, как пространство последующей оптимизации. Для этого был проведен анализ известных заводских калибровок и на его основе выделено 4 типа схем швеллерных калибровок, приведенные в таблице 1.

Причем, оказалось, что при дальнейшей, более глубокой классификации [11], для каждого типа схем швеллерных калибровок из таблицы 1 приходится использовать различные признаки структурирования. Выявленные подтипы схем швеллерных калибровок приведены в таблицах 2 – 5.

Каждый из подтипов нижнего уровня приведенной в таблицах 1 - 5 классификации может включать в свой состав большое количество конкретных виртуальных схем калибровки, образованных различным количеством и различными последовательностями калибров из сформированного ранее [9, 12] пространства швеллерных калибров. Таким образом, возможное общее пространство схем швеллерных калибровок огромно. Заранее предсказать его объем, возможно только для зауженных условий и ограничений конкретного прокатного стана.

Таблица 1

Типы схем швеллерных калибровок

Тип схемы калибровки	Прямополочная	Развернутая	По способу сгибания	Комбинированная
Признак типа схемы калибровки ТК	ТСК=1	ТСК=2	ТСК=3	ТСК=4

Таблица 2

Классификация прямополочных схем швеллерных калибровок (ТСК 1) по разным признакам

Признак классификации	Разрезные калибры							
	Балочный (ТК=11)				Швеллерный (ТК=12)			
Уклон формообразующих калибров	Малый (ТСК=111)		Большой (ТСК=112)		Малый (ТСК=121)		Большой (ТСК=122)	
Количество контрольных калибров	1 (ТСК=1111)	2 (ТСК=1112)	1 (ТСК=1121)	2 (ТСК=1122)	1 (ТСК=1211)	2 (ТСК=1212)	1 (ТСК=1221)	2 (ТСК=1222)

Таблица 3 .

Классификация развернутых схем швеллерных калибровок (ТСК 2)

Признак классификации	Наличие контрольного калибра	
Виды	Без контроля длины полки (ТСК=21)	С контролем длины полки (ТСК=22)

Таблица 4

Классификация схем швеллерных калибровок, использующих способ сгибания (ТСК 3)

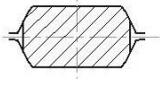
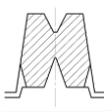
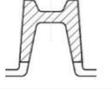
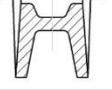
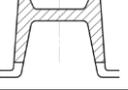
Признак классификации	Наличие контрольного калибра	
Виды	Без контроля длины полки (ТСК=31)	С контролем длины полки (ТСК=32)

Таблица 5

Классификация комбинированных схем швеллерных калибровок (ТСК4)

Признак классификации	Последовательность операций формоизменения и применяемые калибры					
	Развернутые калибры – сгибание – прямополочные калибры (ТСК=41)		Полосовые калибры – сгибание – прямополочные калибры (ТСК=42)		Швеллерные прямополочные разрезные калибры – разгибание – развернутые калибры (ТСК=43)	
Наличие контрольного калибра	0 (ТСК=411)	1 (ТСК=412)	0 (ТСК=421)	1 (ТСК=422)	0 (ТСК=431)	1 (ТСК=432)

Блочная структурная схема швеллерной калибровки

№ ¹⁾	Наименование блока	Назначение	Пример калибра	Примечание
1	Обжимной блок	Получение требуемых размеров промежуточной заготовки		Используется система ящичных калибров
2	Разрезной блок	Получение разрезной заготовки		Используется при прямоугольной исходной заготовке
3	Черновой формообразующий блок	Формирование черного профиля		Только для схем с двумя контрольными калибрами
4	Черновой контрольный калибр	Контроль длины полки		Только для схем с двумя контрольными калибрами
5	Промежуточный формообразующий блок	Формирование промежуточного профиля		Присутствует во всех схемах
6	Чистовой контрольный калибр	Контроль длины полки		В схемах с контрольными калибрами
7	Чистовой блок	Формирование чистового профиля		Присутствует во всех схемах

Примечания: ¹⁾ № блока калибров по порядку следования блоков в схеме калибровки.

Для получения конкретного пространства схем швеллерных калибровок для прокатки конкретного вида швеллера на конкретном прокатном стане, сформирован алгоритм, формирующий данное пространство, не упуская при этом ни одну из возможных схем калибровок и учитывая ограничения конкретного прокатного стана [9, 13].

С этой целью проведено обобщение известных из практики схем швеллерных калибровок, что позволило выявить следующую однозначную универсальную структурную схему этих калибровок, представленную в таблице 6.

Для отдельных типов и подтипов схем калибровок некоторые блоки могут отсутствовать. При выборе определенного типа и подтипа схем однозначно устанавливается последовательность вхождения блоков в генерируемую схему калибровки.

В каждый из блоков калибров входят лишь конкретные калибры, в зависимо-

сти от типа и подтипа схем калибровки. Используя коды калибров, присвоенные им в общей матрице швеллерных калибров (рисунок 2), сформированы таблицы, определяющие возможность включения конкретного калибра в состав каждого из блоков калибров для выбранного типа схемы калибровки [9].

Для установления всех возможных последовательностей применения калибров в каждом отдельном блоке, сформированы "графы связей калибров" [14]. Фрагмент такого графа представлен на рисунке 3. Текущие индексы графа связей калибров (i по вертикали и j по горизонтали) принимают значения кодов калибров, входящих в данный блок калибров. В произвольной паре калибров индекс i соответствует предыдущему калибру, а индекс j – последующему. Величина элемента S_{ij} , стоящая на пересечении i -й строки и j -го столбца указывает на возможность использования j -го калибра вслед за i -м калибром. Любой элемент S_{ij} может принимать одно из значений

0 или 1. Если элемент $S_{ij}=0$ – вершины не смежные, что означает запрет на использование j -го калибра вслед за i -м, а если $S_{ij}=1$ – вершины смежные, значит i -й калибр после j -го использовать можно. Граф связи калибров S_{ij} является не симметричным, т.е. не для всех элементов выполняется условие $S_{ij} = S_{ji}$. Например, если $S_{ij} = 1$, а $S_{ji} = 0$, то это означает, что калибр j может быть использован вслед за калибром i , а калибр i использовать вслед за калибром j запрещено [12].

Для установления всех возможных последовательностей применения калибров при переходе от калибров одного блока к

калибрам другого блока, сформированы аналогичные "межблочные графы связи".

Сам процесс формирования пространства схем швеллерных осуществляется по алгоритму, структурная схема которого показана на рисунке 4.

Для того чтобы устранить из пространства схем швеллерных калибровок те схемы калибровки, применение которых недопустимо для прокатки конкретного вида швеллера на конкретном прокатном стане, сформирована система ограничений. Она включает в себя блок исходных данных и блок ограничений. Фрагмент системы ограничений приведен в таблице 7.

Код калибра	i	1114	1115	1124	1125	1214	1215	1224	1225	1311	1312	1315
j	Пример калибра											
1114		1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1115		0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1124		0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
1125		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1214		1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1215		0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
1224		0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
1225		0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Рисунок 3. Фрагмент графа связи «Формообразующие калибры» G3

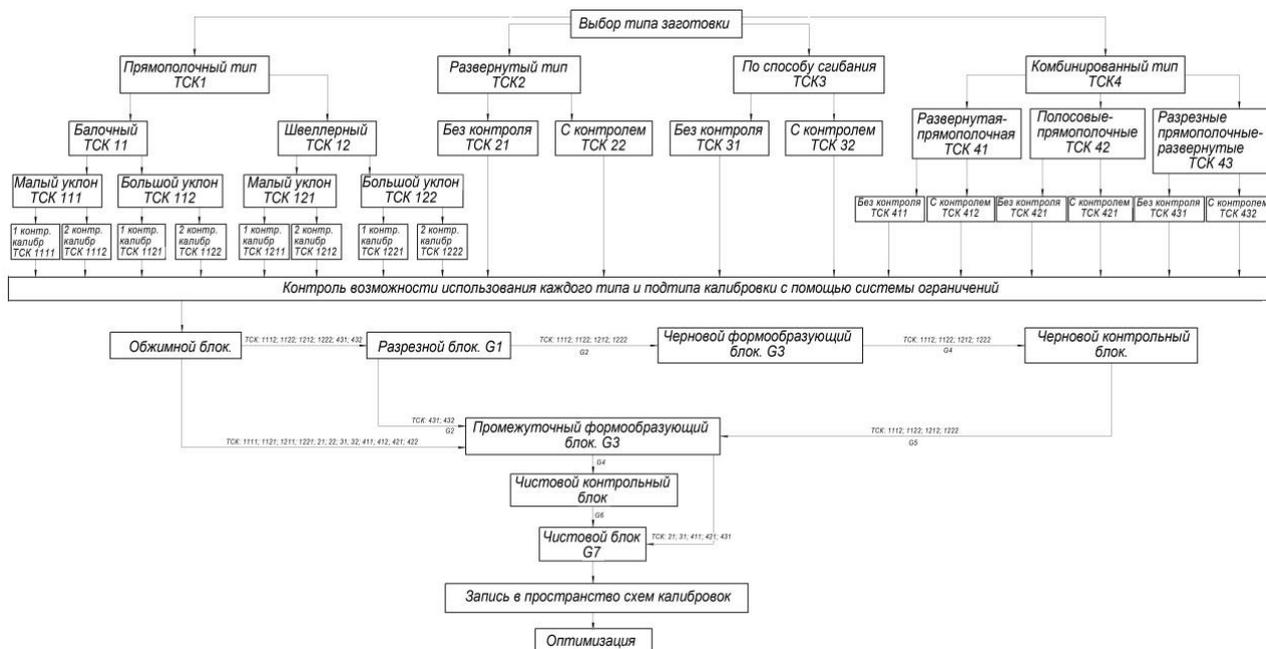


Рисунок 4. Алгоритм построения пространства схем швеллерных калибровок

Таблица 7

Фрагмент системы ограничений

№	Блок исходных данных	№	Блок ограничений	
1	Прокатный стан	Тип прокатного стана	1	Условия захвата металла валками и устойчивости полосы (при прокатке в ящичных калибрах)
		Количество рабочих клеток		
		Количество групп рабочих клеток	2	Скоростной режим прокатки
		Количество клеток в группе, номера клеток в группе		
		Тип каждой группы рабочих клеток		
2	Рабочие клетки	Тип клеток	3	Прочность основного оборудования стана
		Номинальное межосевое расстояние		
		Характеристики валков		
3	Привод рабочих клеток	Тип привода	4	Мощность электродвигателя привода рабочей клетки
		Мощность электродвигателя		
		Частота вращения валков		
4	Исходная заготовка	Тип заготовки	5	Проверка возможности размещения необходимого количества калибров на валках прокатного стана, в зависимости от выбранного типа схем калибровок
		Размеры сечения заготовки		
		Максимально возможная длина		
		Материал		
5	Готовый швеллер	Вид швеллера		
		Размеры сечения профиля		
		Длина		

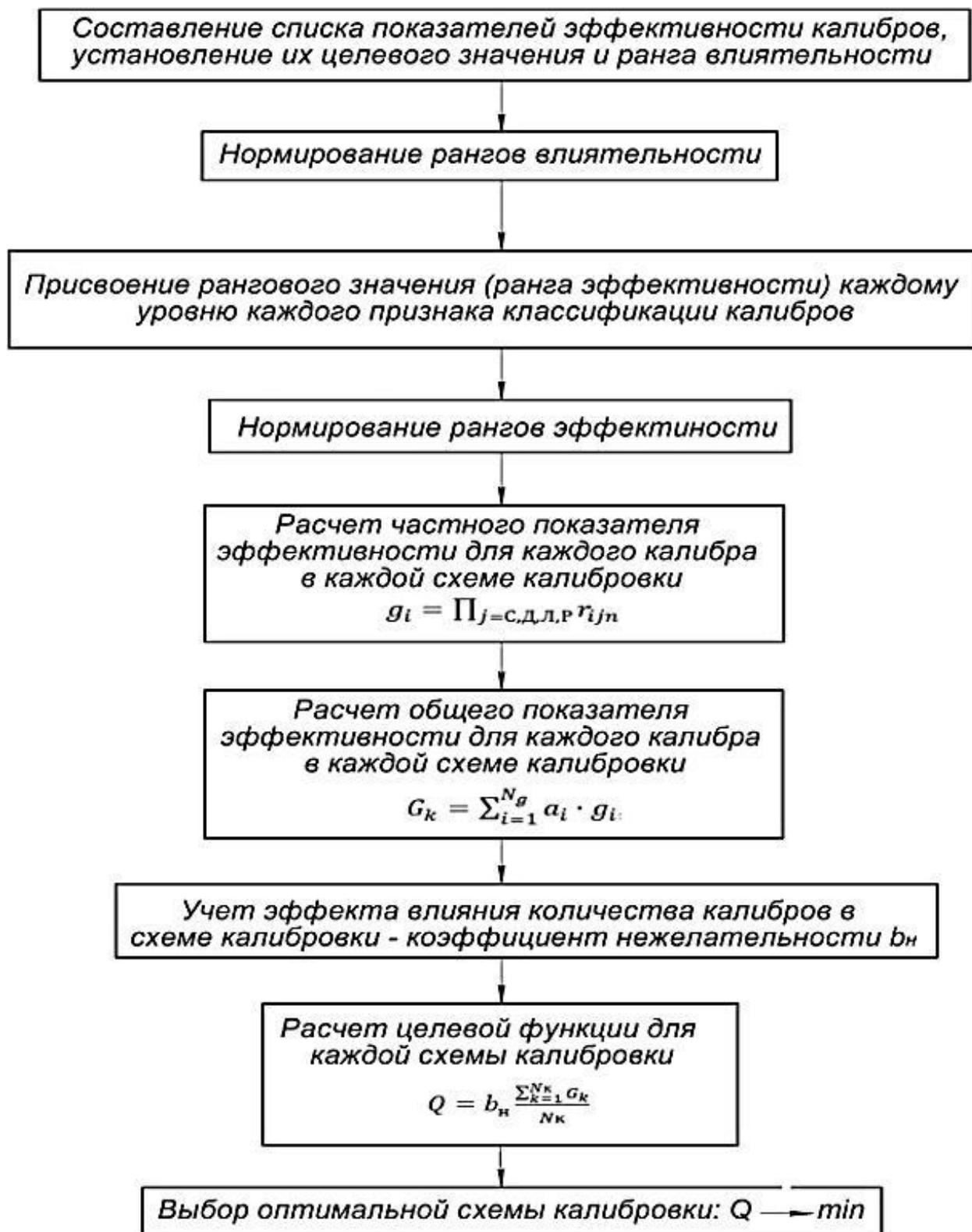


Рисунок 5. Блок-схема формирования целевой функции

Выбор оптимальной схемы калибровки осуществляется с помощью комплексной целевой функции [15], позволяющей одновременно достигать максимально широкий спектр разноплановых целей. На рисунке 5 приведена блок-схема формирования целевой функции.

Для составления комплексной целевой функции Q использованы частные показатели эффективности g_i , каждый из которых отражает одну из возможных целей, к достижению которой должна стремиться идеальная калибровка. Исходя из самых широких представлений об эффективности

производства швеллеров, в качестве таких величин были выбраны показатели, приведенные в таблице 8.

Важным этапом формирования целевой функции является задача «оцифровки» схемы калибровки, что необходимо для получения комплексной целевой функции, принимающей конкретное числовое значение для каждой точки сформированного ранее пространства схем швеллерных калибровок. Для этого экспертно устанавливаются ранг для каждого уровня признака классификации калибров по каждому из показателей эффективности.

Пример численных значений рангов по уровню признака классификации С1 [9], назначенных только, по экспертному мнению, авторов статьи, представлен в таблице 8. Для получения более объективных значений ранговых показателей требуется проведение специального исследования, включающего охват мнений максимально большого числа экспертов и статистическую обработку результатов опроса в соответствии с известными методиками [16]

Таблица 8

Показатели эффективности калибров g_i входящие в целевую функцию.

№	Назначение показателя	Наименование показателя	Целевое значение	Ранг влиятельности	Пример распределения рангов по уровню признака С1	Наибольшее значение ранга $R_{iC_{max}}$ для С1	Пример нормирования рангов уровня классификации С1
1	Качество проката	Стабильность формоизменения	Максимум	1	1	3	0,333
2		Образование дефектов	Минимум	2	4	4	1,000
3		Износ валков	Минимум	3	3	4	0,750
4		Сложность настройки	Минимум	7	2	4	0,500
5	Использование валков	Переточка валков	Минимум	9	1	4	0,250
6		Использование бочки валков	Максимум	5	4	4	1,000
7		Начальный диаметр валков	Минимум	4	1	1	1,000
8		Глубина вреза валков	Минимум	8	1	4	0,250
9		Валковая арматура	Минимум	10	1	3	0,333
10		Ширина буртов	Минимум	6	1	1	1,000
11	Потребление энергии	Усилие прокатки	Минимум	11	1	2	0,500
12		Воздействие на валковую арматуру	Минимум	13	1	3	0,333
13		Мощность прокатки	Минимум	12	1	2	0,500

Для каждого из показателей эффективности, при разных значениях признака классификации, количество принятых рангов может отличаться. Поэтому для исход-

ного выравнивания влиятельности показателей эффективности на значение формируемой целевой функции, проведено нормирование рангов, в соответствии с правилом:

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

где R_{ijmax} – наибольшее значение ранга для каждого уровня признака.

Пример нормирования рангов приведен в таблице 8.

Для каждого калибра, включенного в схему калибровки, определяют численные значения частного показателя эффективности g_i как произведение нормированных ранговых значений r_{ijk} для каждого уровня признаков классификации С, Д, Л, Р (перемножение производится по индексу $j \in \{C, D, L, P\}$):

$$g_i = \prod_{j=C,D,L,P} r_{ijn}, \quad (2)$$

Расчет общего показателя эффективности калибра G_k (где k – порядковый номер калибра в схеме калибровки) производится путем сложения значений частных показателей эффективности g_i . При составлении такой суммы необходимо учесть, что в разных экономических, технических и прочих условиях реального прокатного стана влияние каждого из показателей эффективности g_i на конечный выбор калибра может быть различной. Для учета этого обстоятельства в выражение для расчета общего показателя эффективности калибра G_k вводятся весовые коэффициенты a_i , которые называются "коэффициентами влияния". При таком подходе, выражение для расчета общего показателя эффективности k -го калибра будет иметь вид:

$$G_k = \sum_{i=1}^{N_g} a_i \cdot g_i, \quad (3)$$

где N_g – количество используемых показателей эффективности.

Значение целевой функции Q для всей виртуальной схемы калибровки рассчитывается путем сложения числовых значений общих показателей эффективности отдельных калибров G_k

$$Q = \sum_{k=1}^{N_k} G_k,$$

где N_k – количество калибров в схеме калибровки.

Но при простом сложении величин G_k , наибольшие значения целевой функции будут иметь схемы калибровки, включающие большее количество проходов, т.е. они будут явно "проигрывать" схемам калибровки с малым количеством проходов. А это далеко не всегда оправдано, во многих

ситуациях увеличение количества проходов положительно сказывается на многих важных свойствах калибровки. Для устранения этого эффекта следует использовать "приведенное" значение целевой функции:

$$Q = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} G_k}{N_k} \quad (4)$$

Однако, часто, увеличение количества калибров в схеме калибровки не оправдано, т.к. может привести, например, к возрастанию затрат на валки и привалковую арматуру, снижает производительность прокатного стана и т.п. Для получения возможности учета отрицательного эффекта от роста общего количества калибров N_k в схеме калибровки, введем дополнительный коэффициент

$$b_n = 1 + a_n \frac{N_k - N_{min}}{N_{min}}, \quad (5)$$

где N_{min} – минимальное количество калибров для всех виртуальных схем калибровок,

a_n – экспертно назначаемое значение коэффициента нежелательности увеличения количества калибров, находящееся в диапазоне значений $0 \leq a_n \leq 1$.

После таких корректировок получено следующее выражение для расчета числового значения целевой функции схемы калибровки

$$Q = b_n \frac{\sum_{k=1}^{N_k} G_k}{N_k}, \quad (6)$$

которая при рассмотренном критерии оптимальности будет принимать минимальное значение для наилучшей схемы калибровки.

Значение целевой функции Q рассчитывается для каждой схемы из пространства схем швеллерных калибровок. Схема калибровки с минимальным значением целевой функции и будет считаться искомой, оптимальной схемой швеллерной калибровки [17].

Заключение

Используя универсальный метод двухэтапной оптимизации калибровок сортопрокатных валков, удастся разработать алгоритм проведения первого этапа оптимизации – выбор оптимальной схемы калибровки применительно для случая прокатки конкретного швеллера на конкретном прокатном стане. Для достижения этой

цели было использовано ранее сформированное пространство швеллерных калибров, классификация схем швеллерных калибровок и единый алгоритм формирования виртуальных схем этих калибровки, учитывающий реальную систему ограничений. Используя этот алгоритм, удается сформировать пространство оптимизации – пространство виртуальных схем калибровок. Целевая функция критерия оптимальности сформирована как нормированная по количеству проходов аддитивная функция показателей эффективности калибров, использованных в рассматриваемой виртуальной схеме калибровки. Показатель эффективности каждого калибра определяется методом линейной свертки задачи многоцелевой оптимизации, отражающей влияние типа каждого калибра на различные, практически значимые характеристики всей схемы калибровки с учетом экспертного мнения привлекаемых специалистов. Разработанные алгоритмы и методики предполагается использовать при создании информационной системы поддержки принятия решения, востребованной при разработке новых и оптимизации существующих промышленных калибровок прокатных валков.

Библиографический список

1. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Системный подход к оптимизации калибровки сортопрокатных валков // Производство проката. 2016. – № 17. – С.29.
2. Садовский В. Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. М.: Наука, 1980. – 348 с.
3. Шилов В.А., Пономарев А. А. Оптимизация технологических режимов прокатки по критериям механических свойств // Производство проката. – 2013. – № 2. – С. 14–19.
4. Скороходов А.Н., Полухин П.И., Илюкович Б.М. и др. Оптимизация прокатного производства. – М.: Металлургия, 1983. – 432 с.
5. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Основные положения // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. – № 1. – С.21.
6. Илюкович Б.М., Нехаев Н.Е., Меркурьев С.Е. и др. Прокатка и калибровка. Том V. – Днепропетровск: РВА «ДнепроВАЛ», 2002. – 481 с.
7. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургиздат, 1953. – 523 с.
8. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное.– М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
9. Михайленко А. М., Шварц Д.Л., Устинова Е.И. Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Оптимизационная модель и пространство калибров // Труды XI Конгресса прокатчиков. Том I. – 2017. – С. 283–295.
10. Устинова Е.И., Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Выбор оптимальной схемы калибровки валков для прокатки швеллеров // Magnitogorsk Rolling Practice 2018: материалы III молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. Ун-та им. Г.И. Носова. – 2018. –С. 52.
11. Воронин Ю.А. Теория классифицирования и ее приложения. – Новосибирск: Наука, 1985. – 232 с.
12. Устинова Е. И., Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Выбор оптимальной калибровки прокатных валков с целью улучшения структуры готового швеллера // Уральская школа молодых металлургов: материалы XVII Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых, Екатеринбург: УрФУ. – 2017. – С. 660–664.
13. Карпенко А.В. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
14. Домнин Л.Н. Элементы теории графов. Учебное пособие для вузов. –Пенза.: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 144 с.

15. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008, 197 с.

16. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. – 1996. – №1. – С. 54–60.

17. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие. М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.

Information about the paper in English

Ustinova E.I., Mikhailenko A.M., Shvarts D.L.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russia
Received 04.04.2018

IDENTIFYING OPTIMUM CHANNEL FORMING ROLL CALIBRATION PROCESS AS
THE FIRST STAGE OF OPTIMIZATION

Abstract

The general procedure for achieving optimized calibration of channel forming rolls is divided into two stages: selecting the best calibration procedure and designing the best roll forming process. A model of the first optimization stage is examined. Using the developed algorithms, one can build a complete space of virtual calibration procedures, which would include all possible processes applicable to a particular type of channel and a particular roll forming machine. An optimum calibration process can be identified due to the universal criterion applied.

Keywords: channel, roll calibration procedure, space of channel gauges, space of channel forming procedures, performance indicator, target function.
