

УДК 621.771.2

КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ СОРТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ. СООБЩЕНИЕ 3. ПРОСТРАНСТВО СХЕМ КАЛИБРОВОК

*Михайленко А.М., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»
Шварц Д.Л., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (sdl190977@mail.ru)*

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

Аннотация. Используя идеи системного подхода и основываясь на опыте, накопленном при теоретическом изучении, проектировании и промышленном освоении процессов сортовой прокатки широкого спектра профилей, на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета разрабатывается универсальная «Концепция оптимальной калибровки». Общая идеология оптимизации калибровки сортопрокатных валков изложена авторами в статье «Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Основные положения». В статье «Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Пространство калибров» рассмотрены структура, назначение и содержание информационного блока, отражающего так называемое «пространство калибров». В соответствии с общей концепцией оптимизации, следующей задачей, требующей решения, является задача формирования информационного блока, отражающего так называемое «пространство схем калибровок», которое будет использовано в дальнейшем как первое пространство оптимизации. Рассмотрено понятие «пространство схем калибровок валков сортопрокатного стана» как пространство, содержащее все возможные виртуальные схемы прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане. Для формирования всего пространства схем рельсовых калибровок необходимо генерировать отдельные виртуальные схемы и последовательно наполнять ими это пространство. Таким образом, пространство схем калибровок формируется из отдельных уникальных схем калибровок. Для формирования этого пространства из отдельных калибров, предложено использовать специализированные алгоритмы, являющиеся «генераторами схем калибровок». В качестве примера, рассмотрена структура генератора, предназначенного для построения пространства схем калибровок для прокатки железнодорожных рельсов. Выявлено, что все известные рельсовые калибровки можно представить в виде принципиально однотипной блочной структуры, которая использована в качестве центрального элемента генератора схем рельсовых калибровок. Использование описанного и аналогичных генераторов применительно к процессу прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане позволяет получать большие по объему пространства допустимых схем калибровок. Такие пространства необходимы для последующего проведения оптимизационных процедур поиска наилучшей схемы калибровки из всех возможных. Рассмотренный подход к построению пространства схем калибровок может быть использован при создании систем автоматизированного проектирования и оптимизации калибровок прокатных валков.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-15-24

Используя идеи «системного подхода» [1 – 5] и основываясь на опыте проектирования и освоения процессов прокатки широкого спектра сортов профилей, на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета разрабатывается универсальная «Концепция оптимальной калибровки». Общая идеология концепции и схема оптимизации калибровок сортопрокатных валков изложена в работе [6]. Разрабатываемая модель состоит из ряда информационных блоков, связанных процедурами преобразования информации с целью поиска оптимума.

В работе [7] рассмотрена структура, назначение и содержание информационного блока, отражающего так называемое «пространство калибров», которое трактуется как пространство, содержащее все принципиально возможные калибры, применимые для прокатки конкретного сортового профиля проката на конкретном прокатном стане. В качестве примера, используя известные промышленные рельсовые калибровки [8 – 20],

было сформировано структурированное дискретное пространство рельсовых калибров, включающее в свой состав все виды фасонных калибров, применяющиеся при прокатке железнодорожных рельсов.

В соответствии с общей концепцией оптимизации [6], следующей задачей, требующей решения, является формирование информационного блока, отражающего так называемое «пространство схем калибровок», которое будет использовано в дальнейшем как первое пространство оптимизации. Для описания блока «пространство схем калибровок» будем использовать ряд общеизвестных и новых понятий.

Классическое определение: «Калибровкой валков называют последовательность калибров, расположенных на валках прокатного стана и обеспечивающих получение профиля заданных размеров» [8, 18].

Это определение можно конкретизировать, представив комплексное понятие «калибровка» как систему, состоящую из трех взаимосвязанных компонент:

«схема калибровки»; «режим обжатий»; «размещение калибров». Под этими терминами будем понимать следующее.

Схема калибровки – фиксированная последовательность применения определенного количества калибров определенной формы и кантовок раската, обеспечивающая получение профиля заданной формы. Схема калибровки не предполагает конкретизацию размеров калибров и способа их размещения на валках.

Режим обжатий – последовательность деформаций поперечного сечения раската, обеспечивающая получение профиля заданных размеров. Режим обжатий, в частности, определяет размеры калибров, составляющих схему калибровки.

Размещение калибров – распределение калибров по клетям прокатного стана, позволяющее реализовать процесс прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане. Размещение калибров включает определение местоположения калибра по длине бочки валков и диаметров валков по характерным точкам калибров, выбор установочных межвалковых зазоров и т.п.

Однозначное определение всех трех этих компонент приводит к однозначному определению конкретной калибровки. Ниже рассмотрена первая из составляющих – «схема калибровки».

Для получения одного и того же профиля, одних и тех же размеров, на одном и том же прокатном стане, можно использовать разные схемы калибровки. Назовем такие схемы калибровки, принципиально возможные для получения конкретного профиля на конкретном прокатном стане, «виртуальные схемы калибровки». Если получить набор виртуальных схем калибровок и разместить (упорядочить) этот набор в некоторой системе координат, то получим упорядоченную совокупность, которую будем называть «пространство схем калибровок». Координатами (измерениями) такого пространства будут являться признаки, использованные при систематизации и упорядочении исходного массива виртуальных схем калибровок. Можно сформулировать следующее определение: «Пространством схем калибровок называется совокупность схем калибровок сортопрокатных валков, пригодных для получения заданного профиля на конкретном прокатном стане, упорядоченная в определенном пространстве признаков».

Формирование и упорядочение пространства схем калибровок можно производить различными способами, используя разные методы, приемы, алгоритмы и т.п. Все имеющиеся возможности формирования и упорядочения виртуальных схем калибровок обобщили термином «Генерирующая функция схем калибровок» или «Генератор схем калибровок», отражающим свое назначение – сформировать, сгенерировать совокупность виртуальных схем калибровок и упорядочить ее в определенном пространстве признаков.

В соответствии с принятой выше формулировкой, для однозначного определения схемы калибровки необходимо установить следующие компоненты:

- количество используемых калибров;
- форму применяемых калибров;
- последовательность использования калибров различной формы;
- места кантовок раскатов.

Генератор схем калибровок должен включать в свой состав процедуры определения именно этих компонент.

Создать некий «универсальный генератор», позволяющий формировать разнообразные схемы калибровки для различных сортов профилей при их прокатке на разных прокатных станах чрезвычайно сложно и актуальность такого обобщения вызывает сомнения.

Более простым и рациональным представляется создание отдельных специализированных генераторов, охватывающих специфические группы отдельных видов профилей, технология прокатки которых в пределах группы однотипна.

В качестве примера такого специализированного генератора рассмотрим генератор схем калибровок, предназначенных для прокатки железнодорожных рельсов.

С целью создания генератора схем рельсовых калибровок проанализированы калибровки, применяемые при производстве железнодорожных рельсов [8 – 20] с позиций их структуры и функционального назначения различных калибров и групп калибров. Оказывается, что все известные калибровки можно представить в виде принципиально однотипной блочной структуры, приведенной в табл. 1.

Каждый из блоков, выделенных в таблице, в реальной калибровке может включать в свой состав один, два или несколько калибров определенной формы. Последовательность применения выделенных блоков калибров во всех известных рельсовых калибровках одинакова и совпадает с последовательностью, указанной в табл. 1. Цели применения каждого из блоков во всех калибровках также однотипны. Однако состав, форма и число используемых калибров, а так же схемы деформирования металла в разных калибровках могут значительно отличаться.

Выявленная блочная структура (см. табл. 1) использована в качестве центрального элемента генератора схем рельсовых калибровок. При этом «наполнили» выделенные блоки конкретными допустимыми калибрами. Это удалось сделать, используя сформированное ранее пространство рельсовых калибров [7]. Каждый из них, включенных в общее пространство калибров, в реальных калибровках используется в конкретном блоке [21].

Блок 1. Вытяжные калибры

В подавляющем большинстве рельсовых калибровок в качестве вытяжных калибров используются ти-

Обобщенная блочная структура калибровки железнодорожных рельсов

Table 1. The generalized block structure of calibration of railway rails

Порядковый номер блока калибров	Тип, наименование калибров, составляющих блок	Назначение калибров и блока в целом
1	Вытяжные	Вытяжка поперечного сечения заготовки
2	Подготовительные	Придание поперечному сечению несимметричности
3	Разрезные	Деление поперечного сечения на элементы, образующие черновой профиль
4	Формообразующие	Формирование геометрии и размеров предчистового профиля
5	Чистовые	Доводка геометрии и размеров сечения до чистового профиля

повые ящичные калибры без каких-либо особенностей. Это обусловлено большими размерами исходных рельсовых заготовок, высокой универсальностью ящичных калибров по возможности регулирования режима обжатий, малой глубиной вреза ручьев этих калибров в валки и рядом других достоинств. Единственной рациональной альтернативной ящичных калибров вытяжной группы является схема прокатки квадрат – шестиугольник – квадрат, позволяющая «обновить углы» заготовки за счет кантовки раската квадратного поперечного сечения на угол 45° перед задачей его в ящичный калибр [19, 20], как показано на рисунке.

Применение такой системы вытяжных калибров позволяет сформировать головку рельса из металла, кристаллизовавшегося при разливке в угловой зоне слитка (см. рисунок, *a*). Это было актуально при использовании слитков или блюмов с высоким уровнем пораженности центральных частей поверхности дефектами, количество и размеры которых существенно меньше в углах исходной заготовки.

На современных прокатных станах, использующих качественную непрерывнолитую заготовку, практически применяют только ящичные калибры. Количество вытяжных калибров в калибровке и число проходов в них определяются в зависимости от имеющегося оборудования конкретного стана, размеров заготовки и необходимого размера промежуточного прямоугольного подката для фасонных калибров. Методика определения схемы прокатки в вытяжных калибрах и количества необходимых проходов подробно описана в работе [18].

Блок 2. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ КАЛИБРЫ

Задача калибров этого блока – преобразовать симметричное прямоугольное поперечное сечение промежуточной полосы в полосу с асимметричным сечением, соответствующим асимметрии сечения готового рельса. Это обеспечит возможность реализации принципа равенства вытяжек по головке и подошве профиля в процессе формирования и оформления этих элементов в последующих блоках калибровки.

В блоке подготовительных калибров может быть использована часть общего пространства рельсовых калибров [7], схематично показанных в табл. 2

Блок 3. РАЗРЕЗНЫЕ КАЛИБРЫ

Задача калибров этого блока – распределение, дозирование металла промежуточной фасонной заготовки, поступающей из блока 2, по будущим элементам сечения готового рельса. Распределение металла по элементам профиля чернового рельса производится так, чтобы при последующей прокатке или полностью, или в максимально возможной степени исключить перетекание металла между элементами. Такое распределение металла устраним асимметричность вытяжек по ширине профиля при последующей прокатке и позволит избежать явлений серпения и скручивания полосы на входе и выходе из валков, обеспечит возможность получения постоянного профиля по длине, уменьшит вероятность образования дефектов.

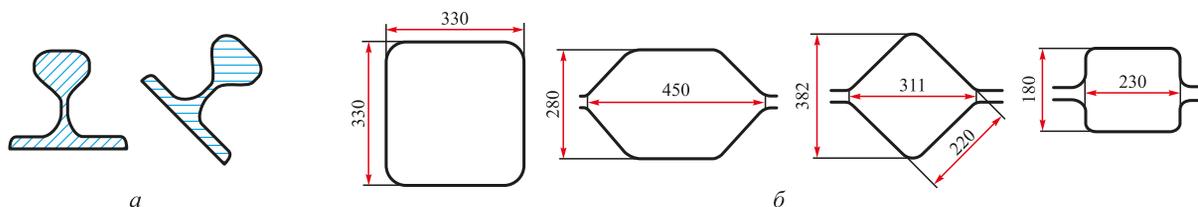
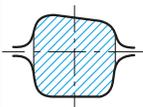
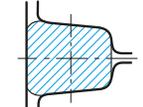
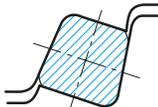
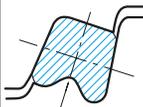
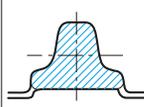
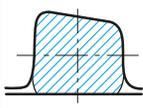
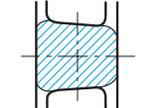
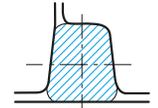
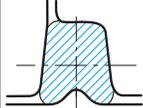
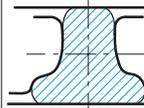
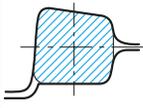
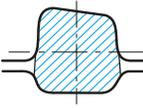
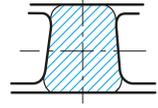
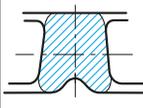
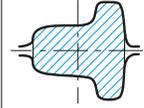
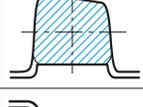
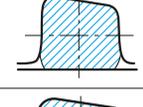
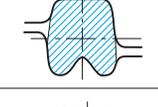
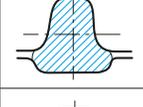
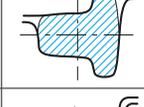
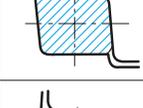
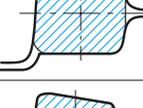
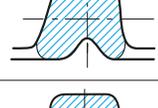
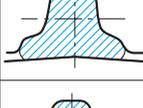
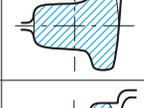
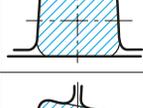
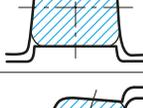
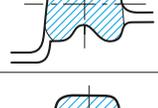
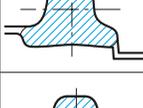
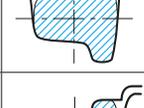
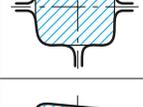
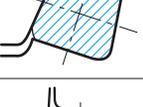
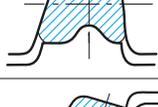
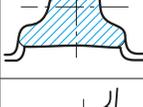
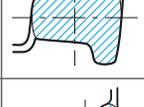
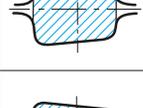
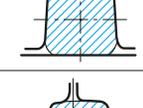
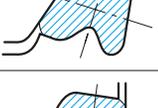
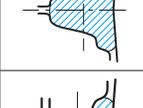
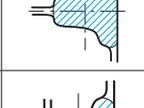
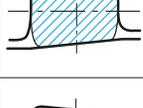
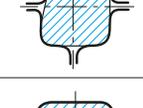
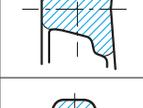
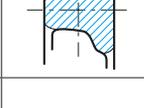
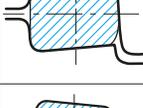
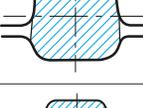
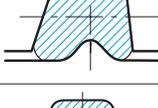
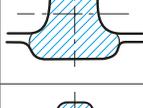
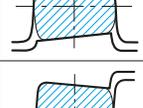
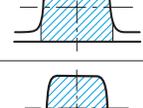
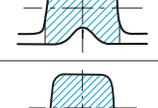
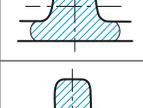
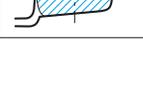
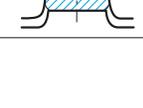
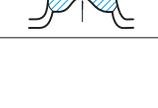
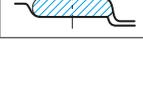
Формирование головки рельса из угловой части слитка (*a*) и система применяемых калибров (*b*)Formation of a rail head from angular part of ingot (*a*) and the system of used calibers (*b*)

Таблица 2

Калибры для формирования блока 2 «Подготовительные калибры»

Table 2. Calibers for formation of the block 2 “Preparatory calibers”

Код калибра	Пример калибра	Код калибра	Пример калибра						
111		146		235		335		434	
112		147		236		336		437	
113		211		237		337		441	
114		212		311		411		442	
115		213		312		412		443	
116		214		313		413		444	
117		215		314		414		445	
141		216		315		416		446	
142		217		316		417		447	
143		231		317		431			
144		232		332		432			
145		234		334		433			

Для формирования блока 3 также используется часть общего пространства рельсовых калибров [7], схематично показанных в табл. 3.

Блок 4. ФОРМООБРАЗУЮЩИЕ КАЛИБРЫ

Формообразующие калибры обеспечивают дальнейшее формоизменение разрезной заготовки, поступающей из блока 3, с целью получения предчистового рельсового профиля с формой и размерами, максимально приближенными к форме и размерам готового рельса. Это накладывает значительные ограничения на форму применяемых калибров. Часть общего пространства рельсовых калибров [7], предназначенная для формирования блока 4, схематично показана в табл. 4.

Несмотря на внешнюю однотипность ряда форм калибров, которые могут быть включены в блоки «Разрезные калибры» и «Формообразующие калибры», это принципиально разные калибры по целям использования, решаемым задачам, размерам и по геометрии калибров. Разрезные калибры относят к черновым калибрам и, соответственно, размещаются на валках об-

жимных клетей. Эти калибры имеют все свойства, особенности изготовления, настройки и т.п., характерные именно для черновых калибров. Формообразующие же калибры относят к подготовительным или предчистовым калибрам, основная задача которых – формирование предчистового профиля рельса, что определяет соответствующее место их размещения на валках прокатного стана, качество изготовления, настройки и прочие характеристики, присущие именно предчистовым калибрам.

Блок 5. ЧИСТОВОЙ КАЛИБР

Форма чистового калибра определяется преимущественно формой готового рельса, поэтому все разнообразие чистовых калибров ограничивается возможностями использования различного количества валков в чистовой клетке и изменением мест разреза калибра. Возможные варианты выбора чистового калибра для формирования блока 5 схематично показаны в табл. 5.

Количество проходов в калибрах каждого из блоков может быть различным и определяется многими обстоятельствами – размерами заготовки, составом

Таблица 3

Калибры для формирования блока 3 «Разрезные калибры»

Table 3. Calibers for formation of the block 3 “Cutting calibers”

Код калибра	Пример калибра						
511		521		531		541	
512		522		532		542	
513		523		533		543	
514		524		534		544	
515		525		535		545	
516		527		537		546	
517						547	

Таблица 4

**Калибры для формирования блока 4
«Формообразующие калибры»**

*Table 4. Calibers for formation of the block 4
“Forming calibers”*

Код калибра	Пример калибра	Код калибра	Пример калибра
611		641	
612		642	
613		643	
614		644	
615		645	
616		646	
617		647	

и характеристиками стана, схемой калибровки и т.п. В известных промышленных калибровках количество проходов в каждом блоке калибров изменяется в пределах, указанных в табл. 6. При генерации общего пространства схем калибровок необходимо использовать все значения, приведенные в этой таблице, возможные по ограничениям конкретного прокатного стана.

Последовательность применения калибров в каждом блоке согласуется с целью использования блока и особенностями формоизменения при прокатке в калибрах этого блока. Для однозначного определения каждой возможной последовательности применения калибров в пределах одного блока использовали так называемую «матрицу сопряжений калибров» C_{ij} . Текущие индексы этой матрицы (i по горизонтали и j по вертикали) принимают значения кодов калибров, являющихся допустимыми для данного блока калибров и указанных в одной из табл. 2 – 5 (для соответствующего блока). Приняли, что в произвольной паре калибров индекс i соответствует предыдущему калибру, а индекс j – по-

Таблица 5

**Калибры для формирования блока 5
«Чистовой калибр»**

*Table 5. Calibers for formation of the block 5
“Finishing caliber”*

Код калибра	Пример калибра
641	
642	
643	
645	
646	
647	

следующему. Величина элемента матрицы C_{ij} , стоящая на пересечении i -го столбца и j -ой строки, указывает на возможность использования j -го калибра вслед за i -ым калибром. Любой элемент матрицы C_{ij} может принимать одно из значений 0 или 1. Если элемент $C_{ij} = 0$, то это означает невозможность использования j -го калибра вслед за i -ым, а если $C_{ij} = 1$, то j -ый калибр после i -го использовать можно. Матрица сопряжений калибров C_{ij}

Таблица 6

**Возможное количество проходов
в блоках рельсовых калибров**

Table 6. Possible number of passes in blocks of rail calibers

Номер блока калибров	Наименование блока калибров	Количество проходов в блоке
1	Вытяжные	2 – 6
2	Подготовительные	2 – 4
3	Разрезные	2, 3
4	Формообразующие	2 – 7
5	Чистовые	1

является несимметричной, т.е. не для всех элементов выполняется условие $C_{ij} = C_{ji}$. Например, если $C_{ij} = 1$, а $C_{ji} = 0$, то это означает, что калибр j (по горизонтали) может быть использован вслед за калибром i (по вертикали), а калибр i использовать вслед за калибром j невозможно.

В соответствии с принятой структурой генератора схем рельсовых калибровок, для каждого блока, в котором используется более одного калибра, необходимо задавать свою матрицу сопряжения калибров. Полученные матрицы имеют достаточно большие размерности (для блока 2 – 57×57 элементов, для блока 3 – 26×26 и для блока 4 – 14×14). В табл. 7, в качестве примера, приведен небольшой фрагмент матрицы C_{ij} для блока подготовительных калибров (блок 2).

Для формирования всего пространства схем рельсовых калибровок необходимо генерировать отдельные виртуальные схемы и последовательно наполнять ими это пространство. Для получения отдельных виртуальных схем калибровок разработан следующий укрупненный «Алгоритм генерации отдельной виртуальной схемы калибровки».

1. Задают очередной порядковый номер генерируемой виртуальной схемы калибровки k .

2. Из табл. 6 выбирается l -ый набор количеств проходов в каждом блоке калибров n_{lm} (где m – порядковый номер блока калибров, $m = 1, 2, \dots, 5$). При выборе каждого l -го набора n_{lm} учитывают ограничения реального прокатного стана, связанные с возможностью размещения калибров на валках клетей и рациональной схемой передачи раскатов по клетям.

3. Последовательно генерируют блоки калибров в соответствии с порядковым номером блока в табл. 2. Варьирование состава калибров каждого m -го блока организуют как внутренний цикл для $(m - 1)$ -го блока калибров, т.е. организуют последовательность из пяти вложенных циклов перебора возможных сочетаний разных калибров различных блоков.

4. При выборе состава m -го блока последовательно перебирают все возможные сочетания кодов калибров i и j , придавая им последовательно значения из таблиц 2 – 5. Для выявления возможности последовательного применения калибра j вслед за i , используют данные матрицы сопряжения калибров C_{ij} для m -го блока калибров (пример фрагмента такой матрицы приведен в табл. 7).

5. Исключается возможность использования калибров, не соответствующих основному оборудованию прокатного стана (например, при отсутствии на стане универсальных клетей, из пространства калибров исключаются трех- и четырехвалковые калибры, т.е. калибры с кодами $xx6$ и $xx7$ и т.п.).

6. Каждая окончательно сформированная уникальная возможная схема рельсовой калибровки запоминается в виде однозначно установленной последовательности кодов калибров. Для упорядочения таких

последовательностей кодов калибров (т.е. для упорядочения отдельных схем калибровок в пространстве схем калибровок) вполне достаточно присвоить каждой такой последовательности уникальный порядковый номер.

Приведенный выше алгоритм генерации схем калибровок представлен в самом общем виде, без привязки к конкретному прокатному стану, конкретному готовому профилю, конкретной заготовке. Поэтому невозможно предсказать общее количество N вариантов уникальных виртуальных схем калибровок, которые можно получить, используя приведенный выше генератор рельсовых калибровок или аналогичные генераторы для других профилей проката. Однако понятно, что значение N будет очень большим даже при самых жестких практических ограничениях на возможности принятия отдельных схем калибровки. Таким образом, формируется весьма обширное пространство схем калибровок, которое в соответствии с разрабатываемой концепцией [6] подлежит первой оптимизации.

В последующих статьях предполагается дальнейшее изложение отдельных аспектов общей «Концепции оптимальной калибровки». В частности, предполагается сформулировать наиболее общий список представительных показателей эффективности использования различных видов калибров и сочетаний разных калибров в конкретной калибровке. Такие показатели эффективности будут использованы в качестве аргументов целевой функции первого критерия оптимальности общей оптимизационной задачи [6], т.е. в качестве критерия оптимальности схемы калибровки.

Выводы

Рассмотрено понятие «пространство схем калибровок валков сортопрокатного стана» как пространство, содержащее все возможные виртуальные схемы прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане. Пространство схем калибровок предназначено для использования в качестве пространства первой оптимизации в рамках разрабатываемой модели оптимизации калибровок сортопрокатных валков. Пространство схем калибровок формируется из отдельных уникальных схем калибровок с использованием разработанного алгоритма, являющегося «генератором схем калибровок». В качестве примера рассмотрена структура генератора, предназначенного для построения пространства схем калибровок, используемых для прокатки железнодорожных рельсов. Использование описанного и аналогичных генераторов применительно к процессу прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане позволяет получать большие по объему пространства допустимых схем калибровок. Такие пространства необходимы для последующего проведения оптимизационных процедур поиска наилучшей схемы калибровки из всех возможных.

Фрагмент матрицы сопряжения калибров C_{ij} для блока 2 «Подготовительные калибры»

Table 7. Fragment of a matrix of calibers interface C_{ij} for the block 2 “Preparatory calibers”

Код калибра	i	231	232	234	311	312	313	314
j	Пример калибра							
231		1	1	1	0	0	0	0
232		1	1	1	0	0	0	0
312		1	1	1	1	1	1	1
313		1	1	1	1	1	1	1
314		1	1	1	1	1	1	1
317		1	1	1	1	1	1	1
332		1	1	1	1	1	1	1
411		1	1	1	1	1	1	1
412		1	1	1	1	1	1	1
416		1	1	1	1	1	1	1
441		1	1	1	0	0	0	0
442		1	1	1	0	0	0	0
443		1	1	1	0	0	0	0
444		1	1	1	0	0	0	0
445		1	1	1	0	0	0	0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский В.Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
2. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы / Пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума; под ред. В.С. Емельянова. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
3. Оптимизация прокатного производства / А.Н. Скороходов, П.И. Полухин, Б.М. Илюкович и др. – М.: Metallurgia, 1983. – 432 с.
4. Щедровицкий Г.П. Принципы и общая схема методологической организации системно-структурных исследований и разработок // Системные исследования. Методологические проблемы: Ежегодник. 1981. – М.: Наука, 1981. С. 193 – 227.
5. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Системный подход к оптимизации калибровки сортопрокатных валков // Производство проката. 2016. № 12. С. 29 – 32.
6. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Основные положения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 1. С. 21 – 27.
7. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 2. Пространство калибров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 5. С. 364 – 371.
8. Илюкович Б.М., Нехаев М.Е., Меркурьев С.Е. Прокатка и калибровка. Т. VI. – Днепропетровск: Дніпро-Вал, 2004. – 824 с.
9. Павлов В.В., Дорофеев В.В., Пятайкин Е.М., Ерастов В.В. Разработка прогрессивных калибровок и технологий прокатки на станах Новокузнецкого металлургического комбината. – Новосибирск: Наука, 2006. – 224 с.
10. Поляков В.В., Артамонова Е.А. Развитие прокатки рельсов за рубежом. Обзорная информация. – М.: Ин-т «Черметинформация», 1989. – 30 с.
11. Поляков В.В., Великанов А.В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов. – М.: Metallurgia, 1990. – 416 с.
12. Смирнов В.К., Паршин В.А., Смирнов М.В. и др. Производство рельсов с применением универсальных клетей за рубежом // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 1983. № 20. С. 28 – 39.
13. Полухин П.И., Гридина Ю.В., Зарвин Е.Я. Прокатка и термообработка рельсов. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 510 с.
14. Зиновьев А.В. Процесс PSP для производства средне- и крупносортовых профилей и рельсов // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. № 2. С. 69 – 72.
15. Матвеев Б.Н. Современные рельсопрокатные станы // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. № 2. С. 40 – 43.
16. Свейковски У., Нерзак Т. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий RailCool // Металлургическое производство и технологии (МРТ). Русское издание. 2006. № 2. С. 50 – 56.
17. Актуальные проблемы производства рельсов / В.Е. Громов, Н.М. Кулагин, В.В. Дорофеев и др. – Новокузнецк: СибГИУ, 2001. – 260 с.
18. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Теплотехника, 2010. – 490 с.
19. Блеха Ф. Калибровка железнодорожных рельсов // Сб. «Калибровка прокатных валков». – М.: Metallurgia, 1965. С. 260 – 272.
20. Мерекин Б.В. К прокатке рельсов // Сталь. 1956. № 9. С. 803 – 805.
21. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Блочная структура рельсовых калибровок // Производство проката. 2017. № 6. С. 16 – 20.

Поступила в редакцию 8 ноября 2017 г.
После доработки 8 ноября 2017 г.
Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 1, pp. 15–24.

THE CONCEPT OF OPTIMAL BAR ROLL PASS DESIGN. REPORT 3. SPACE OF ROLL PASS DESIGN SCHEMES

A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Based on the system approach and on the experience accumulated at theoretical data, design and industrial development of bar rolling, the Chair “Metal Forming” of Ural Federal University develops the universal “Concept of optimum calibration”. The general ideology of roll pass design optimization is stated in article “The concept of optimal bar roll pass design. Report 1. Basic statements”. In the article “The concept of optimal bar roll pass design. Report 2. Calibers space” the structure, appointment and maintenance of the information block reflecting so-called “calibers space” are considered. According to the general concept of optimization, the following task that needs to be solved is the problem of creation of information block so-called “space of schemes of roll pass design” which will be used further as the first space of optimization. The concept “space of schemes of roll pass design of a bar-rolling mill” is considered as the space containing all possible virtual schemes of rolling of a concrete profile on the concrete rolling mill. For formation of the space of schemes of rail calibrations it is necessary to generate separate virtual schemes and to consistently fill this space with them. Thus, the space of calibrations schemes is formed of separate unique calibrations schemes. For formation of this space from separate calibers, it is offered to use the specialized algorithms which are “generators of schemes of roll pass design”. As an example, the structure of the generator prepared for creation of such space for rolling of railway rails is considered. It is

revealed that all known rail calibrations can be presented in the form of essentially the same block structure which is used as the central element of the schemes generator of rail calibrations. Usage of described and similar generators in relation to rolling process of a concrete profile on the concrete rolling mill allows obtaining spaces of acceptable schemes of calibrations. Such spaces are necessary for the subsequent optimizing procedures for search of the best calibration scheme from all possible calibrations. The considered approach for creation of calibrations schemes space can be used during creation of computer-aided engineering systems and optimization of calibrations of rolling rolls.

Keywords: bar rolling, rail, roll pass design, caliber, system analysis, optimization of roll pass design, space of roll pass design schemes.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-15-24

REFERENCES

1. Sadovskii V.N. *Sistemnyi podkhod i obshchaya teoriya sistem: status, osnovnye problemy i perspektivy razvitiya* [System approach and general theory of systems: status, main problems and prospects of development]. Moscow: Nauka, 1980, 384 p. (In Russ.).
2. Mesarovic M.D., Takahara Yasuhiko. *General systems theory: mathematical foundations*. New York: Academic Press, 1975, 268 p. (Russ.ed.: Mesarovic M., Takahara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy*. Moscow: Mir, 1978.).
3. Skorokhodov A.N., Polukhin P.I., Ilyukovich B.M. etc. *Optimizatsiya prokatnogo proizvodstva* [Optimization of rolling production]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 432 p. (In Russ.).

4. Shchedrovitskii G.P. Principles and general scheme of the methodological organization of system and structural research and development. In: *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy: Ezhegodnik 1981* [System research. Methodological problems: Yearbook 1981]. Moscow: Nauka, 1981, pp. 193–227. (In Russ.).
5. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. System approach to optimization of rolls design. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 12, pp. 29–32. (In Russ.).
6. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll design. Report 1. Basic provisions. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, no. 1, pp. 21–27.
7. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll design. Report 2. Calibers space. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, no. 5, pp. 364–371.
8. Ilyukovich B.M., Nekhaev M.E., Merkur'ev S.E. *Prokatka i kalibrovka* [Rolling and rolls design]. Ilyukovich B.M. ed. Vol. 4. Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL, 2002, 824 p. (In Russ.).
9. Pavlov V.V., Dorofeev V.V., Pyataikin E.M., Erastov V.V. *Razrabotka progressivnykh kalibrovok i tekhnologii prokatki na stanakh Novokuznetskogo metallurgicheskogo kombinata* [Development of progressive pass design and technologies of rolling on the mills of Novokuznetsk Metallurgical Plant]. Novosibirsk: Nauka, 2006, 224 p. (In Russ.).
10. Polyakov V.V., Artamonova E.A. *Razvitie prokatki rel'sov za rubezhom. Obzor. inform.* [Development of rails rolling abroad. Review]. Moscow: In-t "Chermetinformatsiya". 1989, 30 p. (In Russ.).
11. Polyakov V.V., Velikanov A.V. *Osnovy tekhnologii proizvodstva zhelezodorozhnykh rel'sov* [Basics of production technology of railway rails]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 416 p. (In Russ.).
12. Smirnov V.K., Parshin V.A., Smirnov M.V. etc. Production of rails with application of universal stand abroad. *Chernaya metallurgiya: Byull. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 1983, no. 20, pp. 28–39. (In Russ.).
13. Polukhin P.I., Gridina Yu.V., Zarvin E.Ya. *Prokatka i termoobrabotka rel'sov* [Rolling and heat treatment of rails]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 510 p.
14. Zinov'ev A.V. PSP process for production middle- and large sectional bars and rails. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. 2003, no. 2, pp. 69–72. (In Russ.).
15. Matveev B.N. Modern rail-rolling mills. *Chernaya metallurgiya. Byull. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2006, no. 2, pp. 40–43. (In Russ.).
16. Sveikovski U., Nerzak T. Production of quality rails using of compact universal stands and Rail Cool technologies. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya (MRT). Russkoe izdanie*. 2006, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.).
17. Gromov V.E., Kulagin N.M., Dorofeev V.V. etc. *Aktual'nye problemy proizvodstva rel'sov: monografiya* [Current problems of rails production: Monograph]. Novokuznetsk: SibGIU, 2001, 260 p. (In Russ.).
18. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Rolls design]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 490 p. (In Russ.).
19. Blekha F. Calibration of railway rails. In: *Kalibrovka prokatnykh valkov: sb. tr.* [Rolls design: Coll. of Sci. Papers]. Moscow: Metallurgiya, 1965, pp. 260–272. (In Russ.).
20. Merekin B.V. Rolling of rails. *Stal'*, 1956, no. 9, pp. 803–805. (In Russ.).
21. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. Block structure of rail calibrations. *Proizvodstvo prokata*. 2017, no. 6, pp. 16–20. (In Russ.).

Information about the authors:

A.M. Mikhailenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming"

D.L. Shvarts, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming" (sdl190977@mail.ru)

Received November 8, 2017

Revised November 8, 2017

Accepted December 25, 2018