

УДК 621.771.2

КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ СОРТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ. СООБЩЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*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. В настоящее время при возникновении потребности в прокатке фасонного профиля более сложного, чем типовые, разработка новой калибровки валков является в значительной степени неформализованной процедурой. При этом достаточно часто вопросы какой-либо оптимальности новой калибровки или вообще не рассматриваются, ограничиваясь ее технической рациональностью, или откладываются на второй этап – совершенствование калибровки в процессе производства профиля. Показано, что калибровка сортопрокатных валков, рассматриваемая как вариативная система калибров, полностью соответствует всем признакам общепринятого понятия «система». Поэтому она может быть использована в качестве объекта, подвергаемого оптимизации с использованием стандартных методов и процедур теории систем. Калибровка прокатных валков рассмотрена как технологическая система, и используя для ее описания современную идеологию системного подхода, построена универсальная оптимизационная модель, направленная на проектирование оптимальных калибровок, применяемых при прокатке любых сортовых профилей. Применена модель двухэтапного решения оптимизационной задачи проектирования калибровки, позволяющая использовать на разных этапах решения как один, так и два критерия оптимальности. Представлен обобщенный алгоритм решения оптимизационной задачи проектирования калибровки валков для прокатки сортовых профилей любой сложности. Согласно принятой концепции, на первом этапе проектирования производится выбор оптимальной схемы калибровки для конкретных условий прокатного стана. На втором этапе для выбранной схемы генерируется оптимальный режим обжатий и определяются размеры используемых калибров. Для реализации предлагаемой концепции и ее описания, наряду с общепринятыми терминами и формулировками, введен ряд понятий, не имеющих широкого использования в теории прокатки. За основу формирования и формулирования таких понятий приняты аналогичные понятия и формулировки, известные из теории систем, теории оптимального управления, физики и математики. В частности, введены такие понятия, как «пространство калибров», «обобщенный калибр», «пространство калибровок», «показатели эффективности», «генерирующая функция калибровки», «пространство режимов обжатий», «генерирующая функция режимов обжатий» и др. Изложена суть этих новых понятий. Более детальное описание отдельных блоков оптимизационной модели будет представлено в последующих статьях.

Ключевые слова: сортовая прокатка, сортовые профили проката, калибровка прокатных валков, калибр, системный анализ, оптимизация калибровки валков, критерии оптимальности.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-21-27

Центральным звеном технологии сортовой прокатки является калибровка валков. От того, как спроектирована калибровка, в значительной степени зависят характеристики технологического процесса и свойства готового проката. Изучению вопросов, связанных с построением калибров, калибровок и их оптимизации посвящено большое количество научных и практических работ, статей, монографий, учебников и т.п., созданных трудами уже примерно десяти поколений ученых, инженеров, калибровщиков. При этом использованы весьма разнообразные пути и способы описания, формализации калибров и калибровок, а также самого процесса деформирования металла [1 – 4].

Однако и в настоящее время при возникновении потребности в прокатке фасонного профиля сколько-нибудь более сложного, чем типовые, часто прокатываемые профили, разработка новой калибровки валков является в значительной степени неформализованной процедурой. Результат проектирова-

ния определяется не столько применяемыми научно обоснованными методиками расчетов, сколько искусством и практическим опытом конкретного калибровщика. При этом достаточно часто вопросы какой-либо оптимальности новой калибровки или вообще не рассматриваются, ограничиваясь ее технической рациональностью, или откладываются на второй этап – совершенствование калибровки уже после начала промышленной прокатки профиля. И это не случайно, так как связано со сложностью и многовариантностью проектирования калибровки. В теории прокатки в настоящее время нет единой, всеобъемлющей и стройной теоретической основы построения как самих калибровок валков для прокатки профилей сложной формы, так и придания этим калибровкам оптимальных свойств. Все известные методики, как правило, весьма ограничены по сортаменту, или, при обобщенном подходе, не доведены до состояния практической применимости.

Наиболее подходящей основой создания методологии проектирования оптимальных калибровок является так называемый системный подход, сформулированный в «теории систем» [5 – 7] и «теории оптимального управления» [8 – 11]. Можно показать, что калибровка сортопрокатных валков, рассматриваемая как вариативная система калибров, полностью соответствует всем признакам общепринятого понятия «система» [12]. Поэтому калибровка может быть использована в качестве объекта, подвергаемого оптимизации с использованием стандартных методов и процедур теории систем.

Известно, что можно выделить всего два принципиально различных случая вариативности систем. Вариант 1: несколько разных систем имеют одно и то же целевое назначение и существует возможность сравнивать системы между собой по некоторым показателям качества их функционирования. Вариант 2: структура системы известна и неизменна, а связи между структурными элементами системы и между системой и окружающей средой вариативны и можно сравнивать виды функционирования системы, так же используя показатели эффективности. Для этих двух вариантов вариативности систем различают два типа оптимальности. Для варианта 1: система, наилучшим образом соответствующая цели на данном классе систем, называется оптимальной. Для варианта 2: управления, обеспечивающие наилучший способ достижения цели при функционировании системы определенной структуры, называют оптимальными управлениями.

Основываясь на таком представлении о существе задачи и обладая значительным практическим опытом разработки калибровок валков и освоения технологий прокатки широкого спектра сортовых профилей, на кафедре «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета создан новый концептуальный подход к разработке калибровок прокатных валков и их оптимизации. Основная цель такого подхода – сформулировать единую методологию проектирования оптимальных калибровок валков для прокатки сортовых профилей любой по конфигурации сложности (для общего случая прокатки).

Рассматривая известные работы по оптимизации калибровок прокатных валков с позиций приведенной классификации оптимальности, можно заметить, что известные решения соответствуют либо первому [13 – 16], либо второму [17 – 20] подходу. Комплексных работ, использующих последовательно или совместно обе возможности оптимизации калибровки применительно к широкому классу прокатываемых профилей, неизвестно.

По мнению авторов, при проектировании технологии прокатки любого сортового профиля задачу поиска оптимальной калибровки следует исследовать комплексно, одновременно используя оба рассмотренных выше варианта оптимизации. Цель этой комплексной, общей оптимизационной задачи можно сформулиро-

вать так: отыскать наилучшую совокупность калибров (т. е. оптимальную схему калибровки), которая реализовала бы наилучший режим деформирования металла (т. е. оптимальное управление).

Однако решение такой комплексной задачи для общего случая прокатки требует абсолютной ее понятийной формализации, что является чрезвычайно сложным и вряд ли рационально. Поэтому авторами предлагается проводить поиск оптимальной калибровки в два этапа, последовательно реализуя оба варианта оптимизации. Поэтапный подход, кроме упрощения самого процесса решения задачи, позволит, как это будет показано ниже, учесть реалии функционирования промышленного прокатного стана.

Для реализации предлагаемой концепции и ее описания, наряду с общепринятыми и очевидными терминами и формулировками, приходится использовать ряд понятий, не имеющих широкого использования в теории прокатки. За основу формирования и формулирования таких понятий приняты аналогичные понятия и формулировки, известные из теории систем, теории оптимального управления, физики и математики. Определим суть этих новых понятий в процессе последовательного рассмотрения и краткой характеристики основных логических блоков, требующих детальной проработки при реализации концептуальной схемы, предложенной авторами.

Центральными понятиями разрабатываемой концепции являются «пространство калибров», «пространство калибровок» и «пространство режимов обжатий», раскрываемые ниже.

Пространство калибров – пространство, содержащее все принципиально возможные калибры, применимые для прокатки конкретного сортового профиля проката на конкретном прокатном стане.

Пространство калибров не является какой-то абсолютной математической абстракцией, для каждой конкретной задачи можно сформулировать свое совершенно конкретное пространство калибров.

Измерениями (координатами) пространства калибров являются характеристики калибров. Размерность пространства (количество используемых характеристик) и содержательная составляющая этих характеристик (физическая, геометрическая или иная суть) должны быть достаточными для достижения двух целей: однозначной идентификации отдельного калибра как точки пространства калибров и расчета значений целевой функции критерия оптимальности. В разных случаях оптимизации (при различных критериях оптимальности, профилях, станах и т. п.) размерность пространства калибров и суть координат этого пространства могут быть различными.

В общем случае, пространство калибров является непрерывным и ограниченным. Ограниченность пространства калибров определяется естественными ограничениями, характерными для каждого прокатного стана

(состав оборудования, прочность, мощность, производительность и т. д.). Непрерывность пространства калибров обеспечивается за счет гладкого преобразования калибров друг в друга при переходе в соседнюю точку пространства. Гладкость сопряжения пространства калибров обеспечивается за счет применения понятия «обобщенный калибр».

Обобщенный калибр – это геометрический видоизменяемый, трансформируемый контур, описываемый при помощи универсальной обобщенной модели калибра. В каждой точке пространства калибров форма и размеры контура калибра (а, значит, и функциональное описание контура) вполне конкретны. При переходе к другой точке пространства происходит плавное и непрерывное изменение модели калибра путем плавного изменения размеров и элементов обобщенного калибра.

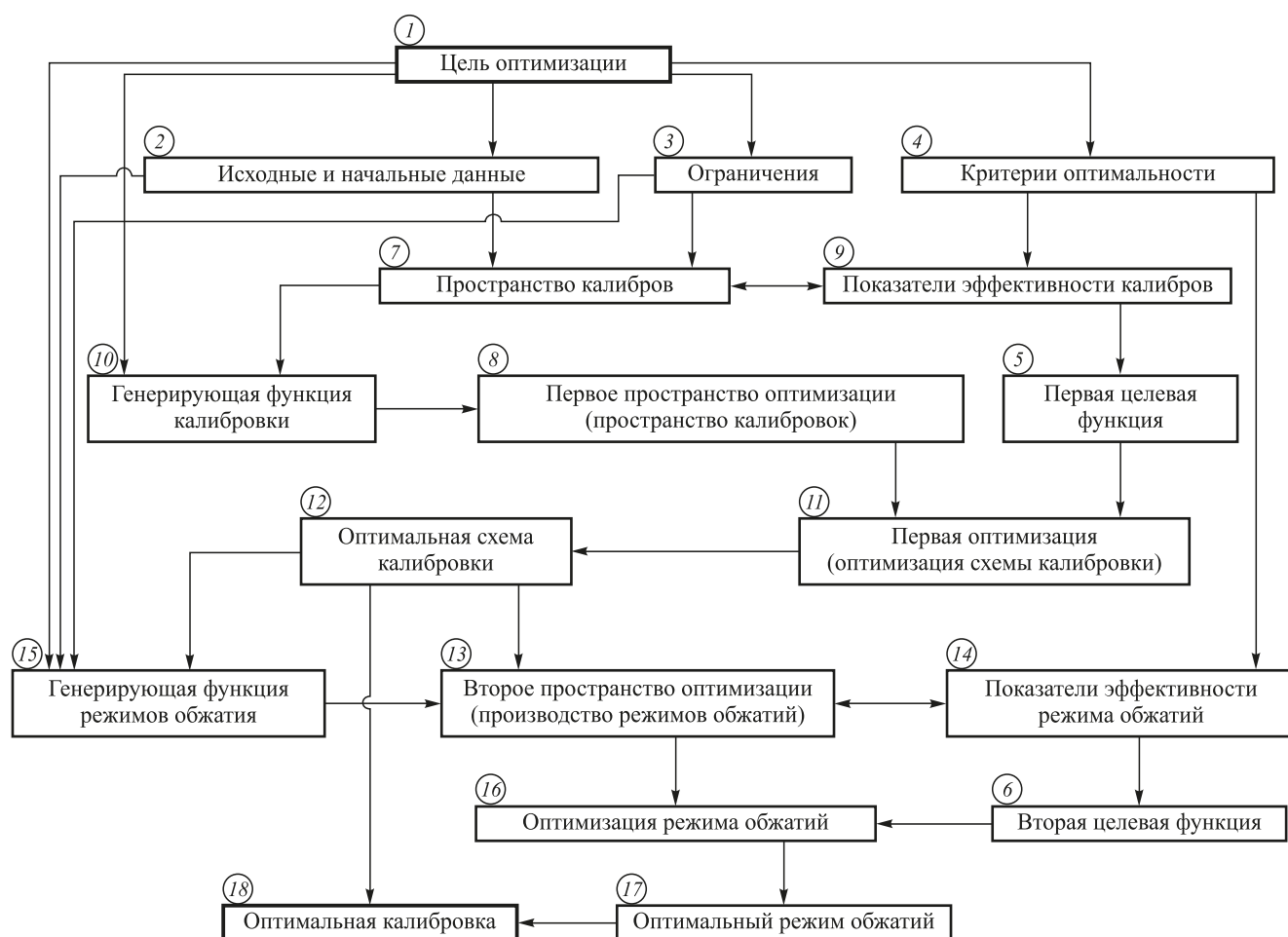
В рамках принятой концепции выбрана последовательность проектирования оптимальной калибровки валков, показанная на рисунке.

В реальных условиях сортопрокатного производства может встречаться значительное разнообразие целей оптимизации калибровки (см. рисунок, блок 1), начи-

ная от наиболее распространенного и простого варианта экономии энергии и заканчивая весьма сложными задачами локальной оптимизации механических свойств проката. В подавляющем большинстве известных решений постановка оптимизационной задачи такова, что устанавливают только одну цель оптимизации и используют соответствующий ей единственный критерий оптимальности. Рассматриваемая же концепция предполагает возможность использования двух критериев оптимальности: первый используется при определении структуры и схемы калибровки, второй – при определении режима обжатий. Поэтому появляется возможность и цель оптимизации формулировать по-разному, а именно, в следующих вариантах:

- единственная цель, которой соответствуют оба критерия оптимальности;
- две разноплановые цели с соответствующими двумя различными критериями оптимальности;
- оптимальность по одному из критериев, получаемая при условии, что другой критерий используется в виде ограничений (условная оптимальность).

Такой подход к формированию целей оптимизации существенно расширяет как спектр решаемых задач,



Логическая схема концепции оптимальной калибровки УрФУ

Logic scheme of UrFU concept of optimal rolls design

так и уменьшает степень абстракции теоретического решения.

Любой прокатный стан, причем как действующий, так и вновь проектируемый, имеет достаточно большое количество разных аспектов, ограничивающих технологические возможности, в том числе и возможности для использования разных калибровок прокатных валков. Такие ограничения, а так же дополнительные требования, сформулированные в отношении готового профиля, заготовки, параметров работы оборудования и т. п. учитываются за счет формирования и использования логических модулей «исходные и начальные данные» и «ограничения» (блоки 2 и 3).

Под термином «критерий оптимальности» (блок 4) будем понимать однозначно определенный способ получения наилучшего решения. Такой способ должен соответствовать цели оптимизации и включать в себя:

- известное пространство оптимизации;
- целевую функцию;
- правило выбора оптимального значения.

Рассматриваемая постановка задачи предполагает возможность использования двух критериев оптимальности, каждый на своем этапе оптимизации. В соответствии с описанными выше возможными вариантами формулирования цели оптимизации, критерии оптимальности могут быть однозначными, двухзначными и условными. Целевая функция (блоки 5 и 6) каждого из критериев оптимальности представляет собой некоторую однозначно определенную функциональную зависимость от показателей эффективности. Вид такой зависимости определяется целью оптимизации и, видимо, не может быть установлен заранее, до однозначного формулирования цели.

Используя рассмотренное выше понимание пространства калибров (блок 7), калибровку можно представить в виде выборки конкретных точек из этого пространства, произведенную по определенным правилам. Разные правила отбора позволяют из пространства калибров получить множество выборок (калибровок). Совокупность разных калибровок определит собой «первое пространство оптимизации» или «пространство калибровок» (блок 8).

Как любая система, калибровка наследует набор свойств, характерных для входящих в ее состав калибров и приобретает новые свойства, характерные ей как «системе калибров». Вновь приобретенные системные свойства для однозначной идентификации будем называть «системные характеристики калибровки». Для формирования «показателей эффективности» (блок 9) имеется возможность использовать как свойства калибров, так и новые свойства – системные характеристики калибровки.

Очевидно, что в пространство калибровок имеет смысл включать только допустимые калибровки, т. е. такие, которые позволяют получить годный сортовой профиль проката, оговоренный в блоке «исходные и

начальные данные» при ограничениях, установленных в блоке «ограничения». Для составления таких калибровок из отдельных калибров, входящих в состав пространства калибров, необходимо использовать некоторый однозначно функционирующий набор правил или алгоритм, который будем называть «генерирующая функция калибровки» (блок 10).

С формальной точки зрения, цель использования генерирующей функции калибровки – преобразовать пространство калибров в пространство калибровок, т. е. генерирующая функция калибровки – это типичная функция преобразования координат. Однако учитывая, что пространство калибров – это пространство объектов, а пространство калибровок – это пространство групп связанных объектов, формирование и, особенно, формализация генерирующей функции калибровки является, пожалуй, наиболее серьезной проблемой в постановке и решении всей рассматриваемой оптимизационной задачи. Фактически, необходимо сформулировать и формализовать общее правило построения разных калибровок с разными свойствами.

Используя первый критерий оптимальности и один из известных методов поиска оптимума целевой функции (например, линейное или динамическое программирование, градиентные численные методы поиска оптимума и т. п.), можно провести «первую оптимизацию» или «оптимизацию схемы калибровки» (блок 11). Найденная схема калибровки будет представлять собой оптимальный набор калибров, удовлетворяющий первой цели оптимизации. Назовем такую схему «оптимальная схема калибровки» (блок 12).

В рамках одной и той же схемы калибровки валков имеется достаточно широкий спектр возможностей по изменению режима обжатию металла по проходам. Все такие изменения можно разделить на две группы:

- изменение межвалкового зазора калибров без изменения размеров ручьев;
- изменение размеров элементов калибров, связанные с переточкой ручьев на валках.

Каждый из этих видов изменений режима обжатию достигается принципиально разными путями и связан с разными затратами. Но, учитывая то обстоятельство, что при проведении первой стадии оптимизации выбирается, фактически, только схема калибровки валков, с позиции решаемой задачи эти принципиальные отличия не имеют существенного значения. Поэтому любой режим обжатию, достигаемый любыми средствами, но без изменения схемы калибровки, будем принимать как допустимый и обозначать единым термином «режим обжатию» или «управление».

Все допустимые режимы обжатию в совокупности составляют «пространство режимов обжатию» или «пространство управлений» (блок 13). Размерность этого пространства определяется количеством «показателей эффективности» (блок 14), приписанных каждому режиму обжатию (каждому управлению). Количес-

во показателей эффективности режимов обжатий и их физический, геометрический или иной смысл должны гарантировать достижение двух целей:

- обеспечить однозначность идентификации конкретного режима обжатий как конкретной точки пространства управлений;

- позволить сформировать «вторую целевую функцию» второго критерия оптимальности (блок 6).

Пространство управлений является непрерывным, при переходе в соседнюю точку пространства происходит гладкое преобразование режима обжатий за счет перераспределения обжатий элементов профиля по проходам. Пространство управлений является ограниченным в соответствии с технологическими ограничениями, накладываемыми на обжатия в каждом из калибров.

Режим обжатий представляет собой распределение по проходам каких-либо показателей деформации элементов прокатываемого профиля, например, коэффициентов вытяжки, абсолютных обжатий и т. п. Фактически, один режим обжатий отличается от другого именно распределением используемых показателей по проходам. Для того, чтобы однозначно задавать режим обжатий и изменять его в процессе поиска оптимума, предусматривается «генерирующая функция режимов обжатий» (блок 15). Эта функция представляет собой некоторый алгоритм, позволяющий для данной точки пространства режимов обжатий рассчитать распределение показателей деформации элементов профиля по проходам и обеспечить изменение этого распределения при переходе к другой точке пространства. При составлении генерирующей функции принципиально возможны два подхода:

- разрабатывать отдельные генерирующие функции, специализированные для отдельного профиля или группы однотипных профилей;

- использовать универсальные генерирующие функции, пригодные для использования при рассмотрении прокатки любого профиля.

Очевидно, что первый подход более прост и можно более точно учесть специфику прокатки отдельных видов профилей, но для каждого нового профиля придется создавать свою генерирующую функцию. Вторым способ более сложен и, видимо, более формален и нацелен, прежде всего, на использование совместно с универсальным способом описания калибров.

Для отыскания оптимального управления на втором пространстве оптимизации будем использовать второй критерий оптимальности и подходящий известный метод поиска оптимума второй целевой функции (блок 16).

Найденное решение (блок 18) будет представлять собой калибровку с оптимальной структурой (оптимальным набором калибров, блок 12) и оптимальным управлением (оптимальным распределением обжатий по проходам, блок 17). Таким образом, получим

наилучший из возможных вариантов прокатки рассматриваемого профиля.

Учитывая широту поставленной задачи и ее многоплановость, приведены только основные идеи и положения, принятые за основу рассматриваемой концепции. Более детальное рассмотрение отдельных блоков оптимизационной модели будет представлено в последующих работах.

Выводы. Калибровка прокатных валков рассмотрена как технологическая система. Применяя для ее описания современную идеологию системного подхода, построена универсальная оптимизационная модель, направленная на проектирование оптимальных калибровок, применяемых при прокатке любых сортовых профилей. Анализ реальных практических задач современного сортопрокатного производства и накопленный практический опыт определили стратегическую линию решения оптимизационной задачи, состоящую в двухэтапном процессе оптимизации, позволяющем использовать один или два критерия оптимальности. При реализации двухкритериальной модели на первом этапе производится выбор оптимальной схемы калибровки прокатных валков, на втором – генерирование оптимального режима обжатий и расчет геометрии используемых калибров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков. – М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
2. Илюкович Б.М., Нехаев М.Е., Меркурьев С.Е. Прокатка и калибровка. Т. 1 – 6 / Под ред. Б.М. Илюковича. – Днепропетровск: Дніпро-ВАЛ, 2002.
3. Бахтинов Б.П., Штернов М.М. Калибровка прокатных валков. – М.: Metallurgizdat, 1953. – 783 с.
4. Хайкин Б.Е., Козлов В.В. Единая математическая модель процессов прокатки простых и фасонных профилей // Обработка металлов давлением. – Свердловск: УПИ, 1983. Вып. 1. С. 58 – 61.
5. Садовский В.Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
6. 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.
7. Месарович М., Такаха Я. Общая теория систем: математические основы / Пер. с англ. Э.Л. Напельбаума; под ред. В.С. Емельянова. – М.: Мир, 1978.
8. Егоров А.И. Основы теории управления. – М.: Физматлит, 2007. – 504 с.
9. Акоф Р.Л., Сасиени М. Основы исследования операций / Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
10. Таха Х. Введение в исследование операций / Пер. с англ. В 2-х книгах. – М.: Мир, 1985. Т. 1. – 480 с.
11. Таха Х. Введение в исследование операций / Пер. с англ. В 2-х книгах. – М.: Мир, 1985. Т. 2. – 496 с.
12. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Системный подход к оптимизации калибровки сортопрокатных валков // Производство проката. 2016. № 12. С. 29 – 32.
13. Калугина О.Б., Кинзин Д.И., Моллер А.Б. Повышение энергоэффективности процесса сортовой прокатки путем оптими-

- зации формы калибров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 10. С. 10 – 12.
14. Кинзин Д.И. Оптимизация формы вытяжных калибров по критерию максимума коэффициента эффективности деформации // Черные металлы. 2014. № 6. С. 45 – 48.
15. Левандовский С.А., Синицкий О.В., Ручинская Н.А. Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации // Калибровочное бюро: Электрон. науч. журнал. 2014. Вып. 3. С. 52 – 80. http://passdesign.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=76&Itemid=108
16. Левандовский С.А., Моллер А.Б., Назаров Д.В., Зайцев А.А. Совершенствование существующих технологических схем прокатки на основе оптимизации форм калибров с целью повышения качества сортовой продукции // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2006. № 1. С. 129 – 137.
17. Оптимизация прокатного производства / А.Н. Скороходов, П.И. Полухин, Б.М. Илюкович и др. – М.: Металлургия, 1983. – 432 с.
18. Шилов В.А., Пономарев А.А. Оптимизация технологических режимов прокатки по критериям механических свойств // Производство проката. 2013. № 2. С. 14 – 19.
19. Даваасамбуу Ч., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Оптимизация технологических режимов прокатки на мелкосортном стане 330 Дарханского металлургического комбината // Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. № 3. С. 36.
20. Хохлов С.А., Перунов Г.П., Волков К.В. и др. Оптимизация режимов прокатки сортовых профилей на стане 320/150 // Сталь. 2010. № 12. С. 38 – 40.

Поступила 14 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 1, pp. 21–27.

THE CONCEPT OF OPTIMAL BAR ROLL DESIGN. REPORT 1. BASIC PROVISIONS

A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts

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

Abstract. Now, at emergence of need for rolling of a more difficult bar profile, than standard, development of new rolls design is, substantially, the unformalized procedure. At the same time rather often questions of any optimality of new design aren't considered at all, being limited to her technical rationality, or are postponed for the second stage – improvement of design in the course of profile production. It is shown that bar rolls design considered as the variable system of calibers, completely corresponds to all signs of the standard concept of the “system”. Therefore, it can be used as the object subjected to optimization with the use of standard methods and procedures of the theory of systems. Calibration of rolls is considered as technological system, and applying the modern ideology of system approach to her description, the universal optimizing model was constructed, directed to design the optimum calibrations applied at rolling any high-quality profiles. The model of the two-stage solution of an optimizing problem of calibration design is applied and it allows using one or two criteria of optimality at different stages of the solution. The generalized algorithm is presented for the solution of an optimizing problem of calibration design of any complexity. According to the accepted concept, at the first design stage the choice of the optimum design scheme is made for specific conditions of the rolling mill, and at the second stage, for the chosen scheme the optimum mode of sinking is generated and the sizes of the used calibers are defined. For implementation of the offered concept and its description, along with the standard terms and formulations, a number of the concepts which don't have wide use in the theory of rolling are entered. The similar concepts and formulations known from the theory of systems, the theory of optimum control, physics and mathematics are taken for a basis of formation and formulation of such concepts. In particular, such concepts as “Space of calibers”, “Generalized caliber”, “Space of calibrations”, “Efficiency indicators”, “Generating calibration function”, “Space of the sinking modes”, “Generating function of the sinking modes” and others are entered. The essence of these new concepts was stated. More detailed description of separate blocks of optimizing model will be presented in the subsequent articles.

Keywords: bar rolling, bar sections, rolls design, groove, system analysis, optimization of rolls design, optimality criterion.

REFERENCES

1. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Rolls design]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 490 p. (In Russ.).
2. Ilyukovich B.M., Nekhaev M.E., Merkur'ev S.E. *Prokatka i kalibrovka* [Rolling and rolls design]. Ilyukovich B.M. ed. Vols.1-6. Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL, 2002. (In Russ.).
3. Bakhtinov B.P., Shternov M.M. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Rolls design]. Moscow: Metallurgizdat, 1953, 783 p. (In Russ.).
4. Khaikin B.E., Kozlov V.V. Uniform mathematical model of processes of rolling of simple and shaped profiles. In: *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming]. Sverdlovsk: UPI, 1983, no. 1, pp. 58–61. (In Russ.).
5. 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.).
6. 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.).
7. 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.).
8. Egorov A.I. *Osnovy teorii upravleniya* [Bases of management theory]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 504 p. (In Russ.).
9. Ackoff Russell L., Sasieni M. *Fundamentals of Operations Research*. New York: John Wiley & Sons, 1968. (Russ.ed.: Ackoff R.L., Sasieni M. *Osnovy issledovaniya operatsii*. Moscow: Mir, 1971, 536 p.).
10. Taha Hamdy A. *Operations research: An introduction*. New York; London: Macmillan Publishing Co, 1982, 848 p. (Russ.ed.: Taha H. *Vvedenie v issledovanie operatsii*. Vols. 1-2. Vol. 1. Moscow: Mir, 1985, 480 p.).
11. Taha Hamdy A. *Operations research: An introduction*. New York; London: Macmillan Publishing Co, 1982, 848 p. (Russ.ed.: Taha H. *Vvedenie v issledovanie operatsii*. Vols. 1-2. Vol. 2. Moscow: Mir, 1985, 480 p.).
12. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. System approach to optimization of rolls design. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 12, pp. 29–32. (In Russ.).
13. Kalugina O.B., Kinzin D.I., Moller A.B. Increasing energy efficiency of the process of flat and-edge rolling by means of optimization

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-21-27

- of the shape of roll-pass. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 10, pp. 10–12. (In Russ.).
14. Kinzin D.I. Optimization of a breakdown passes shape according to the criterion of maximal ratio of deformation efficiency. *Chernye metally*. 2014, no. 6, pp. 45–48. (In Russ.).
 15. Levandovskii S.A., Sinitskii O.V., Ruchinskaya N.A. Experience of optimization the shape of calibers by criterion of deformation unevenness. *Kalibrovochnoe byuro* [Electronic resource]. 2014, Issue 3, pp. 52–80. Available at URL: http://passdesign.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=76&Itemid=108 (In Russ.).
 16. Levandovskii S.A., Moller A.B., Nazarov D.V., Zaitsev A.A. Improvement of the existing technological schemes of rolling on the basis of optimization of shape of calibers for the purpose of quality improvement of high-quality production. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2006, no. 1, pp. 129–137. (In Russ.).
 17. Skorokhodov A.N., Polukhin P.I., Ilyukovich B.M. etc. *Optimizatsiya prokatnogo proizvodstva* [Optimization of rolling production]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 432 p. (In Russ.).
 18. Shilov V.A., Ponomarev A.A. Optimization of the technological modes of rolling by criteria of mechanical properties. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 2, pp. 14–19. (In Russ.).
 19. Davaasambuu Ch., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. Optimization of the technological modes of rolling on a 330 rolling mill of Darhan Metallurgical Plant. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 3, p. 36. (In Russ.).
 20. Khokhlov S.A., Perunov G.P., Volkov K.V., Limankin V.V., Inatovich Yu.V. Optimization of rolling modes of bar sections on 320/150 rolling mill. *Stal'*. 2010, no. 12, pp. 38–40. (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” (sd1190977@mail.ru)

Received July 14, 2016