

О.Н. Тулупов

ООО «МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг»

А.Н. Луценко

ОАО «Северсталь»

А.Б. Моллер, Д.И. Кинзин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

А.И. Трайно

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ DANIELI

Большинство авторов этой статьи сотрудничают с компанией Danieli и ее специалистами уже более 10 лет как в области науки и технологии, так и в области совместной международной подготовки кадров. Адаптивные программы подготовки кадров для пусковых объектов Danieli в России, а также для работы в самой компании Danieli стали одним из наиболее успешных проектов МГТУ им. Г.И.Носова и Danieli под эгидой Международного Союза «Металлургмаш» и «МЕТАЛЛУРГМАШ Инжиниринг».

Компания Danieli стала первой крупной международной компанией, которая системно заинтересовалась структурно-матричными моделями процессов сортовой прокатки, разработанными при определяющем участии авторов этой статьи. Перевод и изучение специалистами Danieli ведущих трудов по структурно-матричным моделям сортовой прокатки и калибровки, обсуждение их на совместных совещаниях, а также пуск ряда сортопрокатных мощностей в России определило приоритетность использования структурно-матричных моделей применительно к развитию станов Danieli и максимальному использованию их

технологических возможностей в условиях российских металлургических предприятий.

В материалах представленной статьи показаны основы структурно-матричных моделей и их приложений, а также примеры решений, полученных в результате моделирования. Многие результаты моделирования и оптимизации оказались реализуемы благодаря выдающимся технологическим возможностям станов Danieli, их адаптивности и заложенным в них технологическим резервам.

Опыт работы с Danieli в течение последнего десятилетия, соединившего инновации и дух вековой истории компании, показывает, что всегда открытые для новых научно-технических идей руководители и инженеры Danieli с их стремлением к партнерству в инновационном развитии оборудования, технологии и кадров – это стратегический потенциал развития, объединенный в лозунге компании “INNOVATION – Innovation in action”.

Рассмотрим возможности моделирования процессов сортовой прокатки для выявления и использования технологических резервов станов Danieli через призму современного состояния технологии и оборудования для сортовой прокатки.

С начала этого десятилетия в сортопрокатном производстве достаточно явно прослеживается ряд тенденций, связанных с повышением эффективности производства, снижением текущих издержек и инвестиционных затрат на совершенствование действующих и строительство новых технологических комплексов.

Прежде всего следует выделить факторы и факты, связанные с тенденциями выбора оборудования для сортопрокатного производства.

Во-первых, продолжается тенденция строительства металлургических мини-заводов по производству сортовых профилей и арматурного проката в различных регионах России и мира. При этом существенно возрос интерес к компактным комплексам с объемом производства до 150-200 тыс. тонн в год типа MIDA компании Danieli. Новые решения с горячим посадом заготовки и

минимизацией холодильника позволяют снизить инвестиционные затраты и себестоимость продукции. В связи с этим в разной степени проработки и реализации находится несколько независимых проектов мини-заводов.

Однако следует отметить, что новые мини-заводы, запуск которых осуществляется в 2013 г., являются проектами крупных металлургических холдингов ОАО «Северсталь» (Сортовой завод Балаково) и «УГМК-Сталь» (мини-завод в Тюмени). Оба упомянутых производственных комплекса основаны на технологических решениях и оборудовании Danieli.

Во-вторых, крупные металлургические предприятия продолжают модернизацию сортопрокатного передела. Наиболее масштабным примером последних лет является комплекс нового рельсобалочного стана на ЧМК (Мечел), также основанный на технологии и оборудовании Danieli.

Следует учесть также тенденцию переоснащения сортопрокатных производств на заводах спецметаллургии. Так, например, объявлены планы поэтапной модернизации листопрокатного и сортопрокатного производства ВМЗ «Красный Октябрь», которые также ориентированы на технологические комплексы Danieli.

В-третьих, возрос интерес частных инвесторов к современным недорогим компактным и гибким сортопрокатным комплексам с небольшой производительностью для производства небольших партий арматуры, круглого, квадратного и фасонного проката.

Кроме этого целесообразно выделить тенденции, связанные с технологическими решениями, включая калибровку валков:

во-первых, в качестве новых решений в сортопрокатном производстве крупных металлургических предприятий рассматриваются высокопроизводительные непрерывные комбинированные станы, позволяющие осуществлять прокатку широкого сортамента профилей с совмещением в одном стане двух или более технологических линий;

во-вторых, для небольших по объему производств характерно стремление к компактности с минимизацией оборудования и применением реверсивной

черновой прокатки, а также возвращением к использованию черновых клетей трио;

в-третьих, для развития технологических режимов характерно стремление к снижению себестоимости проката за счет снижения энергозатрат на деформацию, использования тепла заготовок при горячем посаде, оптимизации парка валков и повышения ресурса их использования;

в-четвертых, в калибровке валков сортовых станов как в мире, так теперь и в России прослеживается уменьшение количества профессиональных калибровщиков на металлургических заводах и, как следствие, потребность в развитии системы аутсорсинга (разработка и совершенствование калибровки внешними специалистами и компаниями).

Вышеизложенное позволяет сделать два принципиальных вывода:

- принимая во внимание названные проекты, а также другие сортопрокатные объекты Danieli в России и СНГ, следует признать, что среди современных комплексов по производству сортового проката на постсоветском пространстве наиболее существенным является семейство сортовых и проволочных станов Danieli;

- необходимы универсальные адаптивные модели, позволяющие решать вопросы адаптации к конкретным условиям расширения и корректировки сортамента, развития технологии (включая калибровку валков) на станах Danieli, максимально эффективно используя возможности этого семейства станов.

Современное моделирование процессов обработки металлов давлением, в частности решение фундаментальных задач методом конечных элементов с применением современной вычислительной техники, показало, что в управлении качеством прокатной продукции и решении ряда технологических задач (прежде всего, задач оптимизации калибровки валков) высока эффективность более простых матричных методов моделирования. Принципы этого подхода к моделированию сортовой прокатки, повышению эффективности технологических процессов деформации сортовых профилей сформулированы в работах основоположников научной школы матричного моделирования процессов сор-

товой прокатки С.А.Тулупова, и О.Н.Тулупова [1, 2] и в дальнейшем были успешно развиты А.Б.Моллером, А.Н.Луценко, Д.И.Кинзиным, А.А.Зайцевым и другими представителями указанной научной школы. В работах С.А.Тулупова и В.Н.Заверюхи [3] предложен подход к описанию формы контуров калибров простой формы в виде многомерного вектора, компонентами которого являются длины базисных радиус-векторов, проведенных из центра симметрии контура.

Таким образом, основным принципом описания параметров формоизменения при прокатке в калибрах является принцип, который можно назвать "контур в контур". Эффективность решения современных задач совершенствования производства сортового проката во многом определяется наличием простого, универсального и информативного подхода к описанию контуров сечений различной сложности, в том числе нетиповых.

Одной из основных целей определения параметров формоизменения при сортовой прокатке является расчет схемы калибровки валков. Корректно рассчитанная калибровка позволяет получить необходимый уровень качества проката.

Существует достаточное количество инженерных (эмпирических) и аналитических методов расчета параметров традиционных калибровок валков. Большинство из этих методов построено на принципе "контур в контур", но при этом не дает возможности управлять процессом формоизменения, не учитывает влияние варьирования элементов калибров и других технологических факторов на формоизменение. Другими словами, основой современного подхода к калибровке валков является решение задач, связанных с управлением эффективности работы калибровки за счет ее анализа и совершенствования с целью повышения качества продукции.

Комплексное многолетнее развитие авторами данной статьи структурно-матричного подхода в направлении адаптивного моделирования формоизменения и расчета параметров калибровки с использованием векторного описания [4, 5] контура калибра является наиболее рациональным для решения задач по-

вышения качества продукции сортопрокатных технологических систем. Решающим фактором в пользу названных подходов является большой и обязательный набор разнообразных параметров, всесторонне характеризующих напряженно-деформированное состояние прокатываемого металла для их применения в решении задачи управления качеством продукции с использованием метода конечных элементов. Как правило, сбор информации в необходимом объеме в производственных условиях затруднителен.

Геометрическими размерами, чаще всего подвергающимися контролю при прокатке в двухвалковых калибрах, являются высота (размер профиля по вершинам калибров) и ширина (размер профиля в разъеме калибра). Точность размера в общем случае определяется соответствием фактически полученного размера номинальному, регламентированному схемой калибровки.

Несоответствие форм инструмента и обрабатываемого проката вызывает существенную неравномерность деформации при прокатке, отрицательно влияющую на геометрические размеры металлопроката.

При сортовой прокатке превышение допустимого предела неравномерности деформации отрицательно сказывается на качестве готовой продукции — приводит к появлению поверхностных дефектов: рванин, трещин, плён. Следовательно, для снижения количества дефектов и повышения качества прокатной продукции необходимо обеспечивать как можно меньший уровень неравномерности деформации.

Несовершенство схем калибровок валков приводит к уменьшению степени гомотетичности форм деформируемого проката и инструмента. Повышение степени подобия этих форм может снизить неравномерность деформации, но одновременно привести к уменьшению вытяжной способности калибровки. Рациональное сочетание названных характеристик калибровки может быть найдено в рамках использования структурно-матричного подхода к управлению качеством продукции сортопрокатных станов.

Учитывая разнообразие действующих прокатных станов, высокую эффективность информационных технологий в управлении производственными

процессами и в профессиональном тренинге специалистов, наиболее приемлемыми подходами в предметной области настоящих исследований являются:

- матричный способ описания формоизменения в калибрах и моделирования технологических процессов с применением структурных матриц;
- структурно-матричный подход к разработке адаптивных моделей оптимизации технологических процессов и схем калибровки для снижения энергоемкости процессов и стабилизации геометрии и свойств сортового проката [6].

Предлагаемый подход к моделированию базируется на следующих основных положениях.

Во-первых, с целью создания математического аппарата для решения технологических задач анализа и управления технологическими схемами получения профилей различной сложности, отвечающего единым принципам представления, хранения и обработки информации, предлагается каждой технологической операции и результату воздействия технологической операции поставить в соответствие математический объект – матрицу сложной структуры, состоящую из отдельных блоков (клеток). Результаты воздействия отождествляются с этапом процесса, а сама технологическая операция – с технологическим изменением.

Структурно-матричное описание отдельного этапа процесса $[A]$ включает блоки, содержащие однотипную информацию по факторам и параметрам процесса.

Для описания процесса в его динамике предлагается учитывать связи между отдельными технологическими состояниями в матричном виде – матрицами технологических изменений $[I]_{i=1,\dots,n}$. Тогда i -й технологический этап процесса опишется матричным уравнением:

$$[A]_{i-1} \times [C]_i \rightarrow [A]_i, \quad (1)$$

а сам процесс – системой из n матричных уравнений:

$$\begin{cases} [A]_0 \times [C]_1 \rightarrow [A]_i \\ [A]_{n-1} \times [C]_i \rightarrow [A]_i, \\ [A]_{n-1} \times [C]_n \rightarrow [A]_n \end{cases} \quad (2)$$

где $[A]_0, [A]_n$ – матрицы, описывающие исходное и конечное технологические состояния соответственно;

$[I]_1, [I]_n$ – матрицы, описывающие первую и заключительную технологические операции.

Такая форма представления процесса наиболее приемлема для обработки данных и моделирования на ЭВМ. Матрицы описания изменений технологических состояний $[I]_i$, как и матрицы технологических состояний $[A]_i$, – сложные структурные матрицы, состоящие из некоторого конечного числа блоков (клеток).

Во-вторых, структура и содержание внутренних блоков определяется назначением модели и типом решаемой задачи. В общем случае это блок описания формы $[\Phi]$, блок описания свойств $[C]$ (блок описания механических свойств), блок описания технологических параметров $[П]$. Данные блоки, в свою очередь, также могут являться блочными матрицами, состоящими из отдельных клеток.

Информация о форме профиля любой сложности представляется в блоке формы $[\Phi]_i$. Для этого любое сложное сечение разбивается на конечное число элементов k , которые можно описать по принципу векторного представления простых профилей. Для связности и однозначности описания вводится матрица центров $[Ц]$, содержащая информацию о расположении центров описания элементов относительно общего центра описания. Для определения связи между локальным и общим центрами описания вводятся две величины: расстояние между ними и величина угла от вертикали до линии, соединяющей их. Количе-

ство значимых векторов $[\Phi]_i$ будет зависеть от сложности профиля и величину k можно использовать как показатель сложности профиля.

Механические характеристики раската содержатся в блоке описания свойств – $[C]$. Каждая матрица $[C]_i$ состоит из набора векторов – $C_i = 1, \dots, p$, определяющих положение изолиний механических характеристик. Выбор p – количества разбиений плоскости сечения на изотропные области механических характеристик – определяется конкретными условиями задачи описания, требуемой точностью учета распределения механических характеристик по сечению профиля. Вместе с этим, величина p зависит от сложности процесса изменения свойств и может являться показателем сложности процесса. В случаях, когда механические свойства достаточно определять усредненными величинами, предлагается блок описания свойств рассматривать как вырожденную матрицу, а показатели механических характеристик – как значения σ_T , δ для данных условий.

Блок описания параметров $[П]$ может включать подблоки: $[T]$ – матрицу описания температурных условий; $[V]$ – матрицу описания скоростных условий; $[\mathcal{E}]$ – матрицу описания условий на контакте обрабатываемого материала с рабочим инструментом; $[Ин]$ – матрицу описания состояния рабочего инструмента (износ и т.д.); $[Д]$ – матрицу, характеризующую рабочий инструмент. Отдельные матрицы технологических параметров представляют собой набор конечного числа элементарных блоков. Принцип представления информации аналогичен блоку формы – значения конкретного параметра определяют в точках пересечения базовых радиус-векторов с контуром сечения и заносят в матрицу описания данного параметра, что может быть использовано при заполнении информацией матриц.

При решении задач, когда необходимо знать значения параметра в любой точке сечения (например, температурное поле), принцип представления ин-

формации в таких блоках (например $[T]$) идентичен принципу описания блока $[C]$.

В-третьих, матрицы технологических изменений имеют структуру блоков и размерность, соответствующую матрицам технологических состояний. Блоки матрицы $[I]_i$ могут содержать информацию векторного типа (упорядоченный по определенному закону набор чисел, например, матрица изменения формы – $[ИФ]_i$), аналитические или эмпирические зависимости (модели). В любом случае независимо от способа представления информации все клетки включаются в общую матричную модель.

Структурная матрица i -го технологического изменения $[I]_i$ включает блоки $[ИФ]_i$, $[ИС]_i$, $[ИП]_i$ – изменения формы профиля, свойств и технологических параметров соответственно: $[ИФ]_i = [\Phi]_i / [\Phi]_{i-1}$, $[ИС]_i = [C]_i / [C]_{i-1}$, $[ИП]_i = [П]_i / [П]_{i-1}$, где $i = 1, \dots, m$.

Согласно данному подходу формоизменение описывается блоками формоизменения, представляющими отношение матриц формы после и до формоизменения. Блок формоизменения является диагональной матрицей. Ее ранг определяется размерностью блока описания формы. Достоинством такого представления формоизменения является возможность машинной обработки процесса калибровки.

В-четвертых, связи между технологическими параметрами на каждом этапе процесса получения сортовых профилей записываются в матрице технологического изменения в виде ее боковых компонентов (блоков). Причем в таких блоках могут содержаться как числовые коэффициенты, полученные эмпирическим путем (например, связь между количеством прокатанных в калибре тонн профиля и компонентами матрицы, характеризующей профиль износа контура калибра), так и целые математические модели, устанавливающие связь между отдельными параметрами (например, между температурно-скоростными

условиями деформации, прочностными свойствами стали и уширением в калибре).

$$\begin{bmatrix} C'_1 \\ C'_2 \\ \vdots \\ C'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_1] & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & [I_2] & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & [I_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $[C_m]$ – матрица, описывающая начальное состояние одного из свойств объекта;

$[C'_m]$ – матрица, описывающая конечное состояние одного из свойств объекта;

$[I_m]$ – матрица изменения состояния;

z – зависимости между различными матрицами изменения (например, связь между формоизменением и температурой).

Это является важным достоинством структурно-матричных моделей [5, 6], поскольку позволяет увязать в рамках единого комплексного подхода возможности других эффективных моделей. Такой подход следует признать наиболее перспективным при создании методами объектного программирования современных систем анализа и управления технологическими процессами.

Таким образом, предложенный подход к моделированию процессов обработки металлов давлением и, в частности, сортовой прокатки профилей различной сложности, обеспечивает:

- комплексный учет факторов, оказывающих влияние на процесс формоизменения, и влияния самого формоизменения на составляющие технологического процесса;
- универсальность (единый способ представления информации, удобный для машинной обработки);

- адаптивность к процессам ОМД (возможность описывать процессы различной сложности, протекающие на различных технологических объектах, без изменения структуры описания);
- адаптивность к решаемым задачам анализа и управления технологическими схемами;
- возможность эффективно включить в единую информационную структуру отдельные модели, связывающие различные технологические параметры процесса прокатки;
- соответствие современным объектным подходам к созданию компьютерных систем проектирования и управления технологическими процессами.

Важно отметить соответствие описанных принципов моделирования задачам управления качеством. Методологическая интеграция схемы Каору Исикава «причина – следствие» и структурно-матричного подхода с использованием баз данных и информационных технологий обеспечивает научно обоснованное и эффективное решение поставленных задач [7].

Построение сквозной адаптивной и интегрированной системы управления качеством сопряжено с разработкой новых критериев оценки эффективности технологической схемы, непосредственно связанных с показателями качества прокатной продукции. При этом повышение степени осмысленности воздействия персонала на технологический объект управления реализуется путем создания и применения моделей-имитаторов (тренажеров) на примерах действующих прокатных станов [8].

Контроль качества продукции прокатного стана включает сбор, архивацию и хранение инженерных характеристик процесса в базе данных. Эти данные широко применяют при определении причины снижения качества продукции и в целях совершенствования процесса. Названные обстоятельства определяют требования к современным и перспективным моделям управления качеством: 1) в основе должен лежать научно обоснованный, апробированный, широко применяемый, "простой" инструмент обеспечения качества; 2) структура

должна отвечать принципам декомпозиции и иерархического упорядочивания с сохранением единства математического аппарата [9].

Разработанная на основе структурно-матричного подхода модель настройки стана [6, 7] позволяет определять параметры настройки за время протекания процесса или даже опережая реальный масштаб времени, что подтверждает целесообразность применения автоматизированной системы управления настройкой стана на базе этой модели.

Система настройки в режиме реального времени, т.е. задействованная непосредственно в комплексе систем управления, состоит из следующих элементов:

- программы управления базами данных, где происходит сбор и обработка информации, накопленной первоначально, а также поступающей в процессе работы системы;
- модели процесса настройки, причем модель обменивается информацией с базами данных, получая текущие входные параметры из системной шины;
- параметров настройки – зазоры по клетям или значения их коррекции и рекомендуемые скорости вращения электродвигателей главных приводов, являющихся результатом функционирования модели повышения точности прокатки;
- адаптационной модели, цель которой – самоадаптация модели процесса к условиям конкретного сортопрокатного стана;
- интерфейса, который обеспечивает передачу информации от модели процесса на исполнительные устройства объекта управления и от автоматизированной системы слежения за технологическим процессом к модели;
- объекта управления (сортопрокатного стана) с исполнительными устройствами (нажимные механизмы и электропривод клетей).

Режим «управления с возможностью принятия решения оператором» является переходным от «режима советчика» к полноценному «режиму автоматического управления». «Управление с возможностью принятия решения опера-

тором» также характеризуется наличием обратной связи между объектом управления (сортопрокатный стан) и автоматическим управляющим устройством (модель процесса, базы данных, адаптационная модель), обеспечивающим самоадаптацию модели процесса. Параметры настройки, вырабатываемые моделью процесса, не поступают на исполнительные устройства стана непосредственно через интерфейс, минуя технологический персонал, а носят рекомендательный характер. Таким образом, "петля" получается незамкнутой. На этапе внедрения АСУ в производство этот момент дает ряд плюсов, обеспечивая:

- проверку устойчивости работы АСУ в целом и ее отдельных составляющих;
- проверку соответствия работы математического обеспечения в комплексе с адаптационной моделью реальному процессу прокатки и настройки;
- в случае необходимости доводку отдельных блоков системы и внесение корректив в функционирование самой модели без каких-либо производственных издержек.

Указанные выше варианты АСУ настройки стана повышают эффективность работы технологического персонала (страховка от случайных ошибок) и технологического оборудования, являясь взаимосвязанными этапами внедрения системы настройки в производство.

Для повышения эффективности схем калибровки предложен и использован критерий оценки и сопоставления эффективности альтернативных вариантов калибровки профилей различной сложности (коэффициент неравномерности деформации $K_{нер}$) [6, 10].

Снижение неравномерности деформации раската при заданных условиях сводится к отысканию уменьшающих значение $K_{нер}$ изменений величин радиус-векторов, характеризующих контур калибра. В качестве ограничений подбора контура калибра использованы нормальное заполнение, номинальная нагрузка на оборудование и минимальное изменение коэффициента вытяжки в калибре.

Модель и методики снижения энергозатрат при прокатке в калибрах были проверены на примере черновой группы действующего стана 350 Череповецкого металлургического комбината [11]. Так, при прокатке круглого проката диаметром 36 мм в трех черновых клетях удалось снизить нагрузки на клетки на 1,75%. При этом следует отметить, что калибровки действующих станов обладают ограниченными технологическими резервами в связи с параметрами оборудования и технологическими возможностями.

Исследования, проведенные при помощи комплекса описанных моделей, показывают высокую приспособленность станов Danieli к планомерному совершенствованию технологии и адаптации к меняющимся технологическим условиям:

- станы Danieli позволяют эффективно использовать резервы оборудования при освоении нового сортамента;
- в компоновках станов заложены технологические резервы для оптимизации энергозатрат при прокатке;
- калибровка позволяет адаптировать стан к условиям меняющегося сортамента и его структуры без существенных изменений ее схем;
- калибровки обладают высокой степенью приспособленности к внесению изменений при оптимизации контуров калибров.

Эти факторы делают возможным при использовании описанных моделей, поступательное повышение эффективности работы станов Danieli, что, в особенности в России, является существенным технологическим преимуществом сортопрокатных комплексов Danieli.

Приведем примеры.

Использование технологических резервов станов Danieli для калибровок профилей простой формы.

Вышеописанная математическая модель для решения задачи совершенствования калибровок по критерию $K_{нер}$ позволила сопоставить усилия в клетях до и после проведенной по модели целенаправленной оптимизации формы калибров на станах 170, 370 и 450 производства Danieli.

В результате оптимизации калибровок для профилей простой формы усилие прокатки снизилось в среднем на 8% (табл. 1).

Таблица 1

Технологические резервы оптимизации калибровок и возможности снижения неравномерности деформации на различных станах Danieli

Стан	Профилераз- мер	Сумма нагрузок, т			Изменение $K_{нер}$, %
		до	после	изменение, %	
		оптимизации			
Мелкосортно- проволочный 170	Круг 6,5	4252,18	3759,61	-11,58	-17,1
	Круг 12	1944,91	1831,61	-5,83	-21,65
Среднесортно- мелкосортный 370	Круг 36	910,03	808,8	-11,12	-13,79
	Квадрат 22	1117,52	1023,6	-8,4	-12,62
Крупносортно- среднесортный 450	Круг 22	995,38	937,54	-5,81	-17,51
	Круг 60	1026,3	976,28	-4,87	-6,79

Использование технологических резервов станов Danieli для калибровок фасонных профилей.

В последние годы увеличивается спрос на прокат с повышенными эксплуатационными свойствами. На непрерывных высокоскоростных станах затруднено стабильное получение высоких прочностных свойств при прокатке швеллеров из низколегированных сталей, в частности швеллеров из стали марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89.

Возможными ресурсами повышения прочностных свойств во время прокатки могут явиться дифференцированное охлаждение фасонных профилей после прокатки и изменение температур нагрева и прокатки металла. Реализация идеи охлаждения сопряжена с затратами на оборудование и соответствующую ему технологию. Таким образом, наиболее гибким и малозатратным инструментом для формирования комплекса требуемых механических свойств является изменение температурного режима прокатки.

При понижении температуры нагрева заготовки на непрерывных станах уменьшается потеря тепла металлом в клетях черновой группы, что свидетельствует о рациональности снижения температуры при нагреве. При этом увеличение расхода электроэнергии на деформацию заготовки в черновых клетях

значительно перекрывается снижением расхода топлива на нагрев заготовки и общая экономия энергии составляет не менее 15%. Кроме того, уменьшается угар металла в печи, т.е. повышается выход годного.

Понижение температуры металла на стане неизбежно приводит к увеличению сопротивления металла пластической деформации и к повышению нагрузок на оборудование главных линий клетей. Для проведения прокатки при пониженной температуре необходимо иметь запас по энергосиловым параметрам, чтобы он вновь был задействован при прокатке с пониженной температурой. Формирование этого запаса происходит через распределение деформации, что при прокатке швеллера во многом обусловлено схемой калибровки. В связи с этим поиск путей целенаправленного перераспределения деформации металла при прокатке швеллеров является актуальной задачей.

Основными задачами оценки эффективности калибровки швеллеров с позиций структурно-матричного подхода являются следующие:

- создание методики совершенствования калибровки с рациональным распределением формоизменения, позволяющей провести прокатку при пониженной температуре с целью повышения эксплуатационных свойств швеллера;
- совершенствование калибровки швеллера на непрерывном сортопрокатном стане.

Наличие единого центра описания профиля сложной формы (рис. 1) дает возможность применения критериев оценки эффективности формоизменения на основе ранее полученного опыта использования коэффициентов технологичности и неравномерности формоизменения простых профилей [6].

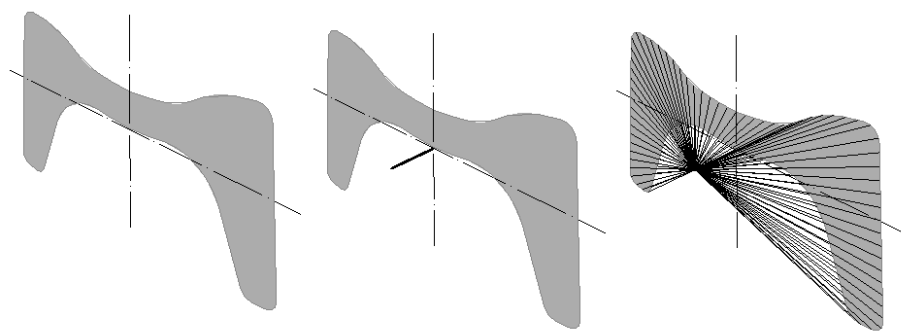


Рис. 1. Применяемый в матричном подходе способ описания сечения

Оптимизированная калибровка затрагивает чистовую группу клетей. В процессе оптимизации калибровки изменена форма второго и третьего против хода прокатки калибров, чтобы обеспечить прирост ширины стенки, так как естественное уширение стенки не обеспечивает такого прироста. Таким образом, в верхнем ручье ширина раската получается меньше ширины калибра и полоса имеет, по крайней мере, одну степень свободы для перемещения в калибре. Иными словами, калибр неустойчиво держит раскат. Центрирование раската в калибре происходит за счет удерживания полок. Результаты расчета значений усилия прокатки, коэффициента вытяжки и коэффициента неравномерности деформации приведены далее (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительный анализ расчётных значений усилия прокатки
для различных вариантов калибровки чистовой группы стана 450 Danieli

Калибровка	Усилие в чистовой группе клетей, кН					
	9	11	12	13	14	15
Исходная калибровка	2103,27	1688,30	1367,27	1046,25	1233,30	920,61
Оптимизация калибровки. Вариант 1	1796,51	1448,75	1574,61	1233,75	881,31	1020,55
Оптимизация калибровки. Вариант 2	1796,51	1448,75	1574,61	1030,01	722,31	961,18

Основные отличия разработанной калибровки от действующей:

- увеличен радиус изгиба стенки;
- увеличено обжатие стенки в клети 13 на 4%;
- уменьшено обжатие стенки в клети 14 на 3%;
- уменьшен угол между полками за счет изменения радиуса изгиба стенки. Схема калибровки более приближена к традиционной, рассчитанной на уширение стенки;
- улучшены условия входа раската в контрольный калибр за счет увеличения высоты полки (в критически нагруженной клети №14).

Получив рациональное распределение неравномерности формоизменения, можно сказать, что образовался «резерв» по усилию прокатки. Таким обра-

зом, возможно допустить снижение температуры металла, что приведет к повышению усилий при его прокатке, однако это усилие не станет избыточным и опасным за счет использования образовавшегося «резерва».

На примере технологии прокатки швеллера в условиях крупносоротно-среднесортного стана 450 Danieli определена взаимосвязь $K_{нер}$ и уровня загрузки клетки. Оптимизация калибровки (вариант 2) позволила снизить нагрузку на клеть (см. табл. 3) и создать запас для снижения температуры нагрева заготовки в печи на 30⁰С. Это обеспечило выполнение класса прочности 345 Н/мм² из стали марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89 [12].

Заключение

1. Показано, что Danieli занимает передовые позиции в мировом металлургическом машиностроении как разработчик и поставщик современных высокоавтоматизированных комплексов в производстве стального сортового проката для перспективных отраслей экономики.

2. Разработанная под руководством и при определяющем участии авторов статьи структурно-матричная модель формоизменения при прокатке сортовых профилей обеспечивает возможность оптимизации технологического процесса по наиболее актуальному критерию – снижению энергозатрат.

3. Многолетний опыт применения структурно-матричной модели при решении технологических задач, включая задачи оптимизации калибровки для сортовых станов Danieli, показал ряд дополнительных достоинств оборудования и технологии этой компании, заключающихся в высокой адаптивности к изменяющемуся сортаменту и большому запасу технологических резервов, позволяющих поэтапно повышать эффективность производства в меняющихся производственно-экономических условиях.

Библиографический список

1. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 2. С. 48-50.
2. Тулупов С.А., Тулупов О.Н. Матрично-статистическая модель формоизменения / Магнитогорск. горно-металлург. ин-т. Магнитогорск, 1988. Деп. в ин-те Черметинформация. №3/Д-1412.
3. Тулупов С.А., Заверюха В.Н. Матричный способ представления профилей и формоизменения металла в процессах обработки металлов давлением // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. № 9. С. 62-65.
4. Новые решения в моделировании процессов сортовой прокатки на основе структурно-матричного подхода и его приложений / О.Н.Тулупов, А.Б.Моллер, М.Г.Поляков, А.В.Логинов, Ю.В.Симаков, Д.В.Колясов, С.А.Левандовский // Производство проката. 2004. № 7. С. 19-25.
5. Tulupov O.N., Rashnikov S.F. Matrix mathematical modelling of roll pass design // Modelling of Metal Rolling Processes 3. Conference Papers. IOM, Chameleon Press Ltd, London, 1999. P. 458-467.
6. Тулупов О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 224 с.
7. Управление качеством сортового проката путем использования рациональных предупреждающих действий при настройке станов / О.Н.Тулупов, Н.А.Ручинская, А.Б.Моллер, А.С.Лимарев, А.Н.Луценко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 73-80.
8. Тулупов О.Н., Лимарев А.С., Моллер А.Б. Повышение конкурентоспособности производства посредством эффективного управления качеством подготовки кадров // Сталь. 2009. №3. С. 84-85.

9. Моллер А.Б. Повышение эффективности сортопрокатных технологических систем на основе структурирования и развития элементов менеджмента качества // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 7. С. 6-9.

10. Improved grooving when rolling round profiles and reinforcement. Asanov V.N., Steblov A.B., Tulupov O.N., Lenartovich D.V. Steel in Translation. 2008. T. 38. № 11. P. 929-931.

11. Совершенствование технологии прокатки профилей простой формы при пониженных температурах нагрева заготовки / А.Н.Луценко, В.А.Монид, О.Н.Тулупов, А.С.Лимарев, А.Б.Моллер, А.И.Трайно, Д.В.Назаров // Труды седьмого конгресса прокатчиков (г. Москва, 15-18 октября 2007 г.). Т. 1. М., 2007. С. 208-212.

12. Assessing channel rolling on a 450 mill / D.V.Nazarov, E.A.Zakharov, S.V.Denisov, A.B.Moller, K.A.Zav'yalov // Steel in Translation. 2009. T. 39. № 10. P. 901-905.