УРАЛЬСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С.М.КИРОВА

На правах рукописи
Экз. № 42
Для служебного пользования

Лехов Олег Степанович

УДК 621.771.001.2-52

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК

Специальность 05.03.05-Процессы и машины обработки давлением

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Свердловск 1991

Работа выполнена на кафедре технической механики Свердловского инженерно-педагогического института

Официальные оппоненты - профессор, доктор технических наук АГЕЕВ Л.М.;
доктор технических наук ЗУДОВ Е.Г.;
профессор, доктор технических наук КОМАРОВ А.Н.

Ведущее предприятие - Орско-Халиловский металлургический комбинат

Защита диссертации состоится 19 апреля 1991 г. в 14^{00} на заседании специализированного совета Д 063.14.02 по присуждению ученых степеней доктора технических наук Уральского политехнического института им.С.М.Кирова (главный учебный корпус, ауд.П).

Ваш отзыв в одном экземпляре, скрепленным печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г.Свердловск, К-2, УПИ им.С.М.Кирова, ученому секретарю совета института, тел. 44-85-74.

Автореферат разослан "14" марта 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
профессор, доктор технических наук В.А.Шилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основными направлениями развития прокатного производства на современном этапе являются:

- создание уникального оборудования для прокатных и литейно-прокатных комплексов;
- внедрение ресурсосберегающих и малоотходных технологических процессов;
- широкое применение непрерывнолитой заготовки;
- коренная реконструкция прокатных агрегатов.

На стадии проектирования или реконструкции прокатного агрегата необходимо определить оптимальные параметры технологического процесса и привода с учетом его связей с другими агрегатами, входящими в состав прокатного или литейно-прокатного комплекса, обеспечить высокую надежность агрегата с позиции повышения производительности и получения качественного проката, то есть найти наилучшее сочетание параметров механического оборудования и привода с параметрами технологического процесса.

Непрерывная интенсификация технологических процессов, повышение мощностей и скоростей прокатных агрегатов обусловили резкое возрастание уровня динамических нагрузок, которые снижают срок службы несущих элементов главных линий. Решение данной проблемы, направленной на устранение причин и снижение уровня динамических нагрузок, требует совершенствования методов динамического расчета и оптимизации параметров главных линий прокатных агрегатов.

Одним из важнейших и перспективных направлений прокатного производства является разработка агрегатов с высокими обжатиями для прокатных и литейно-прокатных комплексов. Создание таких ком-

плексов позволит сократить производственные площади, удельные капитальные и эксплуатационные расходы, существенно снизить расход металла, энергии, повысить производительность труда и качество продукции, обрабатывать малопластичные и труднодеформируемые стали и сплавы.

В связи с переводом прокатных станов на работу с непрерывнолитой заготовкой все большее применение в составе черновых групп прокатных станов будут находить агрегаты с высокими обжатиями, имеющие малые габариты и заменяющие ряд прокатных клетей. Таким образом, работы по созданию принципиально новых агрегатов с высокими обжатиями, требующие сравнительно небольших капитальных вложений и позволяющие снизить расходы по переделу, являются весьма актуальными.

Одним из основных направлений повышения эффективности прокатного производства является разработка совмещенных процессов непрерывного литья и прокатки. Однако совмещение процессов непрерывного литья и прокатки следует рассматривать не только с точки зрения согласования производительности этих процессов, а, что не менее важно, также и с точки зрения получения качественного проката, поскольку непрерывнолитые заготовки имеют поверхностные и внутренние дефекты. В связи с этим агрегаты, входящие в состав литейно-прокатного модуля, должны обеспечить получение качественного проката и увеличение выхода годного. Для более обоснованного выбора параметров агрегатов для литейно-прокатных модулей и режимов деформации непрерывнолитых заготовок необходимы теоретические и экспериментальные исследования новых агрегатов и способов деформации.

Разработка изложенных выше направлений развития прокатного производства требует решения принципиально новых задач, охватывающих широкий круг вопросов от разработки алгоритмов расчета и оптимизации прокатных агрегатов различной конструкции до создания новых агрегатов для литейно-прокатных модулей.

Данная работа выполнялась в соответствии с долгосрочной комплексной программой "Металлоемкость", с научно-технической программой "Ресурсосберегающие и экологически чистые процессы металлургии и химии", программой ОПММПУ АН СССР "Машиностроение и технология" и по координационным планам МИНМЕТа СССР.

Цель работы. Разработка теоретических основ совершенствования систем взаимосвязанных прокатных агрегатов различной конструкции, внедрение в производство научно-технических решений, разработка новых способов и конструкций агрегата циклической деформации.

Научная новизна. Разработана универсальная методика решения задач оптимизации системы взаимосвязанных прокатных агрегатов с заданной структурой, с учетом её работы с непрерывнолитой заготовкой и предложены новые способы и конструкции агрегата циклической деформации и создана научно обоснованная методика расчета их параметров.

При этом получены существенно новые научные положения и результаты:

- разработан алгоритм двухуровневой оптимизации параметров системы взаимосвязанных прокатных агрегатов, в том числе литейно-прокатного модуля, позволяющий во взаимосвязи решать вопросы выбора структуры и состава оборудования, повышения производительности, снижения энергоемкости технологического процесса и динамической нагруженности приводов и улучшения качества проката;
- разработаны и научно обоснованы новые способы и конструкции агрегата циклической деформации, защищенные 7 авторскими свидетельствами СССР;

- на основе теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла разработаны математические модели процессов циклической деформации плоских и круглых заготовок, дана оценка новых способов циклической деформации с точки зрения энергосиловых параметров и улучшения качества профилей.

Практическая ценность:

- разработанные алгоритмы, прикладные программы и рекомендации по выбору параметров агрегатов различной конструкции (прокатные станы, агрегаты циклической деформации) используются при проектировании и реконструкции прокатных агрегатов и создании литейно-прокатных модулей (ЗСМК, ЧМК, УЗТМ, Тулачермет, СМЗ, УралНИИчермет);
- принципиально новые способы и конструкции агрегата циклической деформации защищены 7 авторскими свидетельствами СССР. По совокупности изобретений с 1988 г. ведется зарубежное патентование;
- разработаны конструкции кассет, которые устанавливаются в клеть прокатного стана вместо валков, что позволяет с минимальными капитальными затратами внедрить процессы циклической деформации для получения профилей простой и сложной формы, а также перевести прокатный стан на работу с непрерывнолитой заготовкой.

Реализация результатов работы:

- ряд научных разработок завершился внедрением результатов исследований в производство (ЗСМК, ЧМК) с отраслевым экономическим эффектом 1,2 млн.руб. в год;
- Уралмашзавод изготовил агрегат циклической деформации силой 3500 кН и ножницы для разрезания непрерывнолитых слябов завода Амурсталь;
- создан опытно-промышленный участок циклической деформации на Омутнинском металлургическом заводе;
- выполнен рабочий проект агрегата циклической деформации для литейно-прокатного модуля НПО Тулачермет, пуск которого намечен в 1991 г.;

- создан участок циклической деформации на опытном заводе УралНИИчермет;
- для опытного завода ИЧМ выполнен проект двухбойковой кассеты для продольного разделения плоской заготовки на ряд сортовых.

А п р о б а ц и я р а б о т ы. Основные результаты работы доложены и получили положительную оценку на международном симпозиуме "Динамика тяжелых машин горной и металлургической промышленности", Донецк, 1974 г.; на Всесоюзной конференции "Технические средства производства деталей машин", Свердловск, 1983 г.; на II Всесоюзной конференции "Динамика крупных машин", Свердловск, 1971 г.; на I Всесоюзной научно-технической конференции "Расчет на прочность металлургических машин", Жданов, 1985 г.; на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Улучшение качества и экономия металла за счет повышения точности прокатки сортовых профилей", Москва, 1987 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Задачи технического перевооружения листопрокатного производства", Днепропетровск, 1987г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Получение и обработка материалов высоким давлением", Минск, 1987 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Металл и технический прогресс", Москва, 1987 г.; на Всесоюзном научно-техническом совещании "Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках", Москва, 1988 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Теоретические проблемы прокатного производства", Днепропетровск, 1988г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Прогнозирование и управление качеством металлоизделий, получаемых обработкой давлением", Абакан, 1988 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Непрерывные металлургические процессы "руда, дом - металлопрокат", Свердловск, 1989 г.

П у б л и к а ц и я. По теме диссертации опубликована книга, 40 работ в центральной печати, 4 статьи за рубежом, получено 9 авторских свидетельств на изобретения.

О б ъ е м р а б о т ы. Содержание диссертации изложено на 387 страницах машинописного текста, иллюстрировано 87 рисунками, содержит 39 таблиц , перечень использованной литературы, включающий 199 наименований, и приложение.

I. ДВУХУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ

Наиболее перспективными направлениями развития прокатного производства на современном этапе являются внедрение ресурсосберегающих и малоотходных технологических процессов и коренное улучшение качества проката.

Решение поставленных задач осуществляется путем создания непрерывных литейно-прокатных модулей, позволяющих существенно снизить энергоемкость технологического процесса и увеличить выход годного. а также проведением реконструкции прокатных агрегатов с целью перевода их на работу с непрерывнолитой заготовкой.

Перевод прокатных станов на работу с непрерывнолитой заготовкой и создание литейно-прокатных модулей требуют решения комплекса взаимосвязанных задач, таких как выбор состава оборудования и определение сечения непрерывнолитой заготовки и параметров технологического процесса.

При реконструкции прокатного комплекса с целью перевода его на работу с непрерывнолитой заготовкой путем установки дополнительных клетей или агрегата с высокими обжатиями, возникает проблема совместимости новых агрегатов с существующими, которая не может быть решена без учета их взаимных связей в процессе расчета.

Таким образом, задача определения оптимальных параметров литейно-прокатного модуля является весьма сложной и трудоемкой и не может быть успешно решена с использованием традиционных методов расчета. В связи с этим, необходим новых подход к решению задач

оптимизации параметров литейно-прокатных модулей с учетом противоречивых критериев и взаимной связи агрегатов, входящих в его состав, что позволяет обоснованно выбрать структуру и параметры литейно-прокатного модуля с позиции выполнения заданной производительности, снижения энергоемкости технологического процесса, металлоемкости оборудования и динамической нагруженности приводов и улучшения качества проката.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы разработать универсальную методику определения оптимальных параметров системы взаимосвязанных агрегатов (прокатный комплекс, литейно-прокатный модуль и т.п.) с различной структурой и включающей в свой состав агрегаты различной конструкции и характеризующейся противоречивыми критериями с учетом связей между агрегатами с одной стороны и параметрами технологического процесса и приводов отдельного агрегата с другой стороны.

Для решения изложенных выше задач проектирования и реконструкции разработан алгоритм двухуровневой оптимизации системы взаимосвязанных прокатных агрегатов (рис.I), включающий решение следующих задач: I) задачу оптимизации параметров технологического процесса и выбора структуры системы взаимосвязанных агрегатов при заданном сортаменте проката (верхний уровень оптимизации); 2) задачи оптимизации параметров главных линий агрегатов при заданных параметрах технологического процесса и электродвигателей, определенных на верхнем уровне оптимизации.

При проектировании прокатного или литейно-прокатного комплекса необходимо обеспечить выполнение заданной производительности, а при реконструкции, как правило, повышение производительности. В связи с этим в качестве целевой функции системы в ряде случаев целесообразно использовать производительность, то есть $F^c = П$. Этот

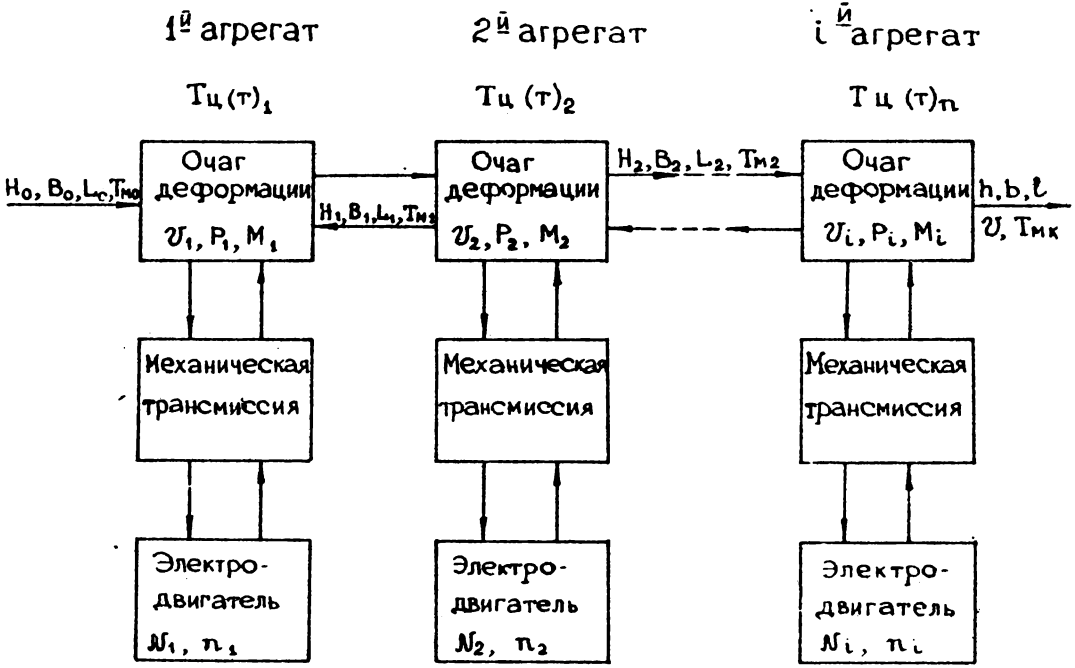
1й агрегат
2й агрегат
iй агрегат
Тц (т)1
Тц (т)2
Тц (т)n
Очаг деформации
v1, P1, M1
Очаг деформации
v2, P2, M2
Очаг деформации
vi, Pi, Mi
H0, B0, L0, Tм0
H1, B1, L1, Tм1
H2, B2, L2, Tм2
h, b, l
v, Tмк
Механическая трансмиссия
Механическая трансмиссия
Механическая трансмиссия
Электро-двигатель
N1, n1
Электро-двигатель
N2, n2
Электро-двигатель
Ni, ni

Рис. I

показатель существенным образом определяет величину скалярного глобального критерия, зависит от вариантов анализируемой структуры и позволяет обоснованно определить структуру системы взаимосвязанных прокатных агрегатов в зависимости от исходных данных расчета, а также позволяет наложить ограничения на другие показатели данной системы.

Однако для обеспечения заданной производительности непрерывного прокатного или литейно-прокатного комплекса, который состоит из взаимосвязанных агрегатов, необходимо согласовать такты (циклы) работы агрегатов (Т), поскольку в противном случае один из агрегатов будет иметь наименьшую пропускную способность, что не позволит выполнить заданную производительность.

Для повышения качества проката необходимо выполнить ограничения на величину степени деформации (ε) (вытяжки (λ)), обеспечивающей хорошую проработку литой структуры по всему сечению непрерывнолитой заготовки, устойчивость раската, количество пропусков до кантовки ($n_к$), силу подпора (натяжения) при непрерывной прокатке ($\sigma_{п(н)}$), а также задать температуру полосы при выходе из последней клети непрерывного стана ($T_{мк}$).

Таким образом, задача оптимизации параметров технологического процесса и выбора структуры системы взаимосвязанных прокатных агрегатов (верхний уровень) в общем виде может быть сформулирована следующим образом:

максимизировать $F^c(\bar{X}^*) = П = \frac{3600 \cdot m}{T} K_и$, (I)

$$\bar{X}^* = [\Delta H_к,\ n_п,\ n_{кл},\ v_к]$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{n} (T_i - T_{i+1})^2 \leq \delta; \quad \varepsilon - [\varepsilon] \geq 0; \quad \lambda - [\lambda] \geq 0;$$

$$M \leq M(\min n_{кл}); \quad \alpha_к - [\alpha_к] \leq 0; \quad H_к - [H_р] \leq 0;$$

$$H_к/B_к - [H_к/B_к] \leq 0; \quad n_к - [n_к] \leq 0 \qquad (2)$$

$$\sigma_{п(н)} - [\sigma_{п(н)}] \leq 0; \quad T_{мк}^{(1)} \leq T_{мк} \leq T_{мк}^{(2)};$$

$P_к - [P_к] \leq 0$; $M_{кр.к} - [M_{кр.к}] \leq 0$; $C^к - [C^к] \leq 0$;

$M_{кв} \leq M_{ном}$; $M_{max} / M_{ном} \leq K_п$; $П - П_{н.у.} \leq 0$,

где $\Delta H_к$ – обжатие за пропуск; $V_к$ – скорость полосы; $n_п$ – количество пропусков на обжимном стане; $n_{кл}$ – количество клетей непрерывного стана; α – угол захвата; $H_к$, $B_к$, $L_к$ – соответственно высота, ширина и длина полосы; $H_р$ – допустимая высота полосы при разрезании; $P_к$ – сила деформации; $M_{кр}$ – крутящий момент; $C^к$ – жесткость клети и валковой системы; $M_{кв}$ – среднеквадратичный момент электродвигателя; $M_{ном}$ – номинальный момент электродвигателя; M_{max} – максимальный крутящий момент в пропуске; $K_п$ – коэффициент перегрузки; $П_{н.у.}$ – производительность нагревательного устройства.

Методы, используемые для решения задач оптимизации параметров одного прокатного стана, в большинстве случаев не могут быть использованы для оптимизации параметров системы прокатных агрегатов, что связано со сложными математическими моделями, большим числом одновременно варьируемых параметров и, кроме того, трудно гарантировать выпуклость целевой функции сложной системы.

В связи с этим для решения задачи оптимизации параметров прокатного комплекса использован комбинированный алгоритм, построенный на базе 2 методов: случайного поиска и симплекса Нелдера и Мида.

Для оценки эффективности комбинированного алгоритма при расчете оптимальных параметров системы взаимосвязанных прокатных агрегатов изменяли количество испытаний при использовании метода случайного поиска, начальные значения варьируемых параметров в пределах допустимых значений.

Анализ полученных результатов показал, что предлагаемый алгоритм обеспечивает сходимость вычислительного процесса поиска оптимальных параметров, позволяет распознать глобальный экстремум целевой функции и определить действительно оптимальные параметры.

Решена задача оптимизации (верхний уровень) технологических параметров обжимно-заготовочного комплекса ЭСМК. Показана возможность прокатки слитка кипящей стали массой 10,7 т за 9 пропусков.

Из результатов решения задачи оптимизации следует важный для практики вывод о том, что для прокатных комплексов, отличающихся составом и компоновкой оборудования, существует оптимальное сечение заготовки, в том числе непрерывнолитой, для непрерывного стана, которое позволяет равномерно загрузить прокатные агрегаты по пропускам, снизить нагруженность наиболее слабых звеньев комплекса и согласовать такты (циклы) работы агрегатов с целью повышения производительности.

На втором уровне оптимизации необходимо определить оптимальные параметры главных линий прокатных агрегатов, а в качестве критерия целесообразно использовать динамическую нагруженность, поскольку минимизация данного показателя позволяет повысить долговечность несущих элементов, а также улучшить качество проката.

В связи с этим в качестве целевой функции целесообразно принять следующий показатель: $F = M^{\partial}$,

где M^{∂} – максимальная амплитуда момента крутильных колебаний.

Однако ряд главных линий прокатных станов включает в свой состав редуктор и шестеренную клеть, то есть являются многомассовыми системами, что усложняет решение задач оптимизации. Это связано с тем, что для повышения долговечности элементов главной линии необходимо при решении задачи оптимизации добиться минимизации динамических нагрузок во всех или наиболее слабых ее звеньях.

В общем случае для многомассовой расчетной схемы с n связями преобразованную целевую функцию можно записать в виде:

$$F = \sum_{i=1}^{n} M_i^{\partial} + \sum_{j=1}^{n-1} K_j \left(M_j^{\partial} - M_{j+1}^{\partial}\right)^2, \qquad (3)$$

где K_j – коэффициент штрафа.

Согласно вышеизложенному алгоритму оптимизации системы взаимосвязанных прокатных агрегатов при решении задач оптимизации отдельных агрегатов параметры, определенные на первом этапе оптимизации, считаются заданными и постоянными. В связи с этим задача оптимизации конструктивных параметров главной линии прокатного агрегата (второй уровень) может быть сформулирована следующим образом:

минимизировать $F^{\nu}(C_i, J_i, \Delta_i)$

при ограничениях: $C_{i1} \leq C_i \leq C_{i2}$; $J_{i1} \leq J_i \leq J_{i2}$; $0 \leq \Delta_i \leq \Delta_{i\,max}$,

где F^{ν} - целевая функция подсистемы главной линии; C_i - жесткость упругой связи; J_i - момент инерции сосредоточенной массы; Δ_i - зазор в линии привода.

Нижние границы изменения жесткости упругих связей (C_{i1}) определены на основе прочностных расчетов несущих элементов главной линии прокатного стана.

Верхние границы изменения радиального зазора ($\Delta_{i\,max}$) определены на основании сбора и статистической обработки данных по эксплуатации шпиндельных соединений главных линий прокатных станов.

В качестве примера рассмотрим процедуру оптимизации системы главной линии горизонтальной клети НЗС, имеющей в своем составе двухступенчатый редуктор.

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в системе главной линии горизонтальной клети согласно расчетной схеме, имеет вид:

$$
\begin{aligned}
J_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_{дв} - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - q_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) \\
J_2 \ddot{\varphi}_2 &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + q_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - q_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) \\
J_3 \ddot{\varphi}_3 &= C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + q_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - C_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) - q_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) \\
J_4 \ddot{\varphi}_4 &= C_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + q_{34}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - C_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) - q_{45}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5)
\end{aligned}
$$

$$J_6\ddot{\varphi}_6 = C_{56}(\varphi_5-\varphi_6)+q_{56}(\dot{\varphi}_5-\dot{\varphi}_6)-C_{67}(\varphi_6-\varphi_7)-q_{67}(\dot{\varphi}_6-\dot{\varphi}_7);$$

$$J_7\ddot{\varphi}_7 = C_{67}(\varphi_6-\varphi_7)+q_{67}(\dot{\varphi}_6-\dot{\varphi}_7)-M_{ст.7}[1-\exp(-K\varphi_7)];$$

$$\Delta\dot{\varphi} = \omega_0\left(1-\cos\sqrt[3]{\frac{\sigma\cdot\Delta_0\cdot\beta}{\omega_0}}\right);$$

$$\beta = \sqrt{\frac{R\,Bp\,tg\alpha}{J+mR^2/2}};$$

где q - коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования;

Δ_0 - зазор в линии привода.

Из анализа полученных при моделировании на ЭВМ осциллограмм распределения динамических нагрузок в системе двигатель - двухступенчатый редуктор - шестеренная клеть - валки следует, что высокие динамические нагрузки в элементах главной линии возникают при ударе в шпиндельных соединениях. Динамические нагрузки на шпинделях определяются крутильными колебаниями второй формы (β_2 = 151 1/с), причем η = 1,27 при скорости соударения $\Delta\dot{\varphi}$ = 2 1/с. Наибольшие динамические нагрузки (η = 1,85) возникают во второй зубчатой передаче, причем они определяются колебаниями третьей формы (β_3 = 312 1/с). В первой зубчатой передаче динамические нагрузки меньше (η = 1,42), чем во второй зубчатой передаче, и определяются третьей формой колебания.

Из анализа амплитуд и частот динамических нагрузок вытекает важный для практики вывод, что приведение главной линии стана с редуктором к расчетной 3-массовой системе, то есть рассмотрение редуктора в виде одной сосредоточенной массы, приводит к существенным погрешностям при расчете динамических нагрузок в зубчатых передачах в случае ударов в зазорах главной линии, поскольку динамические нагрузки на моторном валу и шпинделях не дают представления о динамических нагрузках в зубчатых передачах.

Поставим в качестве основной цели при оптимизации параметров снижение нагруженности слабого и наиболее дорогостоящего звена глав-

ной линии - зубчатых передач двухступенчатого редуктора. В связи с этим целевую функцию запишем в виде:

$$F = \left(M^{д}_{23} + M^{д}_{45}\right) + K\left(M^{д}_{23} - M^{д}_{45}\right)^2.$$

Параметры зубчатых передач редуктора в процессе оптимизации остаются неизменными, а в качестве варьируемых параметров используем жесткости упругих связей (C_{12}, C_{34}, C_{56}, C_{67}) и время переходного процесса захвата ($t_п$).

Решение задачи оптимизации параметров главной линии с использованием изложенного выше комбинированного алгоритма проведено на ЭВМ "БЭСМ-6".

Вывод информации в графической форме позволяет оценить характер распределения динамических нагрузок по элементам главной линии, исследовать поведение целевой функции вблизи ее экстремального значения и найти действительно оптимальное решение.

При оптимизации параметров главной линии в случае удара в шпиндельных соединениях максимальные динамические нагрузки, возникающие во второй зубчатой передаче, удалось существенно уменьшить и, кроме того, выравнять динамические нагрузки в I-й и 2-й зубчатых передачах. Например, при ударе в шпиндельных соединениях ($\Delta\dot{\varphi}$=2 I/с, $t_п$ = 0,I с) коэффициент динамичности во второй зубчатой передаче (η_{45}) в результате оптимизации уменьшен с I,85 до I,3, а в первой зубчатой передаче (η_{23})-с I,42 до I,32, причем наибольшее влияние на динамические нагрузки в тяжелонагруженных зубчатых передачах оказывают жесткости шпинделей и вала между редуктором и шестеренной клетью.

Таким образом, двухуровневая оптимизация основных параметров взаимосвязанных прокатных агрегатов выполняется по двум критериям: производительности или энергоемкости (верхний уровень) и динамической нагруженности (второй уровень) при условии выполнения системы ограничений, определяющих качество проката, то есть позволяет найти

наилучшее сочетание параметров технологического процесса и главных линий прокатных агрегатов.

Для обеспечения соответствия между параметрами взаимосвязанных агрегатов (верхний уровень) и между параметрами технологического процесса и привода (второй уровень) служат обратные связи, которые в случае невыполнения ограничений позволяют изменить параметры входа в соответствующую подсистему сложной системы взаимосвязанных прокатных агрегатов.

Алгоритм решения задачи двухуровневой оптимизации параметров системы взаимосвязанных прокатных агрегатов включает II этапов: I) ввод исходной информации; 2) расчет параметров технологического процесса; 3) проверка системы ограничений; 4) расчет целевой функции первого уровня оптимизации; 5) решение задачи оптимизации первого уровня; 6) проверка сходимости и оценка глобальности полученного решения; 7) расчет динамических нагрузок в элементах главной линии стана; 8) расчет целевой функции второго уровня оптимизации; 9) решение задачи оптимизации второго уровня; I0) проверка сходимости и оценка устойчивости и глобальности полученного решения; II) экспертная оценка полученных решений.

2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ АГРЕГАТА И СПОСОБОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Разработаны защищенные авторскими свидетельствами № 926636, I982 г.; № III5295, I984 г.; № II93883, I985 г.; № II95547, I985г.; № I352767, I987 г.; № I4I0357, I988 г. принципиально новые конструкции агрегата и способы циклической деформации и продольного разделения.

Агрегат циклической деформации (АЦД) предназначен для получения профилей простой и сложной формы в узком температурном интервале, с небольшими единичными обжатиями и суммарной степенью дефор-

мации за один проход 60 - 80 % и со скоростью входа заготовки в бойки 2 - 6 м/мин и выше.

Основные технические преимущества агрегата циклической деформации: I) сравнительно небольшие габариты, минимальная металлоемкость и высокая жесткость конструкции; 2) высокая универсальность, так как может работать по двух- и четырехбойковым схемам и позволяет получать широкий сортамент профилей простой и сложной формы и осуществлять продольное разделение сляба на ряд сортовых заготовок, для чего достаточно заменить комплект бойков; 3) кинематика движения бойков позволяет реализовать способ деформации, при котором бойки одновременно обжимают и продвигают заготовку, то есть не требуется специального подающего устройства. Однако для создания силы подпора в направлении движения заготовки агрегат циклической деформации может иметь задающее устройство; 4) возможность реализовать процесс циклической деформации с одновременным сдвигом, что позволяет существенно снизить силы деформации при получении листовых заготовок; 5) наличие на бойках калибрующих участков, которые определяют точность профиля независимо от степени износа рабочей поверхности бойка, хорошая возможность управлять шероховатостью бойков по длине очага деформации позволяют существенно повысить качество профилей; 6) способ деформации, реализуемый на агрегате, позволяет хорошо управлять шероховатостью по длине рабочей поверхности бойков. В частности, в зоне отставания на поверхности бойка может быть сделана накатка для улучшения условий захвата полосы и дробления окалины, а в зону опережения может подаваться смазка, что позволит снизить износ бойков, то есть повысить точность размеров профиля и качество поверхности; 7) поступательное движение рабочих бойков по замкнутой траектории, а также наличие холостых ходов позволяют осуществить хороший режим охлаждения рабочего инструмента, и, кроме того, во время пауз происходит разупрочнение металла.

Разработан способ поперечной деформации полосы и устройство для его реализации.

Способ поперечной деформации, то есть циклическое обжатие двумя бойками круглой заготовки по высоте с одновременным сдвигом в поперечном направлении, позволяет получать профили круглого сечения, создавая при этом мгновенный очаг деформации, что, учитывая разупрочнение металла между циклами обжатий, приводит к существенному снижению сил деформации.

Данный способ поперечной деформации может быть использован для получения отдельных деталей, имеющих по длине переменное сечение (крупные валы, валки и т.п.).

Разработаны конструкции кассет с двумя или четырьмя бойками, которые устанавливаются в клеть прокатного стана вместо валков, что с минимальными капитальными затратами позволяет внедрить процесс циклической деформации в производство.

В конструкции кассеты с четырьмя бойками синхронное движение обоих противолежащих бойков и сдвиг по фазе на 180^{0} по отношению к расположенной в другой плоскости пары бойков обеспечивают деформацию непрерывной полосы попеременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях, причем одновременно с обжатием полосы бойки продвигают ее в направлении подачи.

Следует отметить, что при переводе прокатных комплексов на работу с непрерывнолитой заготовкой и использовании при этом кассеты в клети прокатного стана существенно повышаются технические преимущества процесса циклической деформации, который позволяет сократить количество клетей, использовать тепло литого металла и улучшить качество профилей.

Агрегат циклической деформации силой 3500 кН изготовлен Уралмашзаводом и установлен на Сутнинском металлургическом заводе.

В 1990 г. проведена реконструкция АШД, при которой вместо электродвигателя мощностью 350 кВт установлен электродвигатель постоянного тока мощностью 800 кВт с регулируемой угловой скоростью вала от 0 до 300 об/мин и с крутящим моментом на валу 60 кН м. Это позволило создать опытно-промышленный участок на ОМЗ для получения ряда профилей простой и сложной формы.

Проведены исследования процесса деформации полос из нержавеющей стали сечением 20–30 х 45–70 мм^2, вырезанных из непрерывнолитых слябов 200 х 1000 мм^2 ЧерМК, с замером энергосиловых параметров. Вытяжка за один проход составляла λ = 2,2 – 2,5, упирение 12 – 15 мм, степень деформации 57 – 69 %. Средняя удельная сила деформации 282 – 318 МПа.

Проведено исследование нового способа деформации (а.с.№ 1410557, СССР), при котором в процессе обжатия на хорошо обработанные поверхности бойков в зоне опережения подавали смазку (минеральное масло), что позволило улучшить качество поверхности получаемых профилей из нержавеющей стали.

Разработан и реализован способ получения на АШД за один проход двутавровых профилей. Двутавровый профиль из стали У7 получен из заготовки сечением 55 х 55 мм^2 за один проход. При оценке качества полученного двутавра установлено, что по сравнению с исходной заготовкой твердость металла увеличилась на 8 – 15 %, размер зерна был 5 – 6 баллов, а стал 9 – 10 баллов и, кроме того, получена без дефектов и хорошего качества поверхность двутавра.

Установлено, что процесс циклической деформации позволяет улучшить качество профилей простой и сложной формы, получаемых из непрерывнолитых заготовок, за счет: 1) интенсивной проработки заготовки по всему сечению и получения мелкозернистой структуры металла; 2) благоприятных условий деформации, при которых дефекты литейной природы не раскрываются, несплошности и поры в приконтактном слое

заваривается; 3) хорошей возможности управлять шероховатостью рабочей поверхности по длине очага деформации.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Целью теоретического исследования процесса деформации наклонными бойками непрерывнолитого сляба с поверхностными дефектами являлась оценка напряженно-деформированного состояния металла в области и за пределами очага деформации и разработка рациональных режимов деформации непрерывнолитых слябов.

Поля напряжений σ_{ij} и скоростей v_i пластической деформации определяются с учетом допущений из системы дифференциальных уравнений:

$$\sigma_{ij}=0;\quad \sigma_{ij}-\sigma\cdot\delta_{ij}=2\lambda\xi_{ij};\quad \delta_{ij}=\begin{cases}1 & i=j\\ 0 & i\neq j\end{cases};\qquad (5)$$
$$v_{i,i}=0,$$

где $\xi_{ij}=\frac{1}{2}(v_{i,j}+v_{j,i})$; $\lambda=T/H$; $H=(2\xi_{ij}\cdot\xi_{ij})^{1/2}$,
δ_{ij} – символ Кронекера; σ – гидростатическое давление; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; T – интенсивность касательных напряжений.

Рассматривалась схема плоского деформированного состояния, из которой имеем: $v_3=\xi_{33}=\xi_{13}=\xi_{23}=\sigma_{13}=0$.

Согласно расчетной схеме (рис.2) граничные условия записаны в виде:

$$\sigma_{22}|_{S=S_2}=\sigma_{21}|_{S=S_2}=\sigma_{11}|_{S=S_3,S_5}=\sigma_{12}|_{S=S_3,S_5}=$$
$$=\sigma_{21}|_{S=S_4}=0;\quad v_2|_{S=S_4}=0;\quad v_2|_{S=S_2}=v_2^*;\qquad (6)$$
$$\sigma_{21}|_{S=S_3,S_5}=\psi\cdot\tau_S\,(v_{ск}/v^*)\cos(n,i);\quad v_{ск}=v_м-v_и;\quad \sigma_{21}|_{S=S_6}=30\text{МПа},$$

где τ_S – предел текучести материала при сдвиге; $v_{ск}$ – скорость скольжения металла относительно инструмента на поверхности S_1; v_2^* – скорость перемещения инструмента на поверхности; v^* – окружная скорость эксцентриковых валов; $v_м$ и $v_и$ – соответственно перемещение металла и инструмента вдоль оси OX_I.

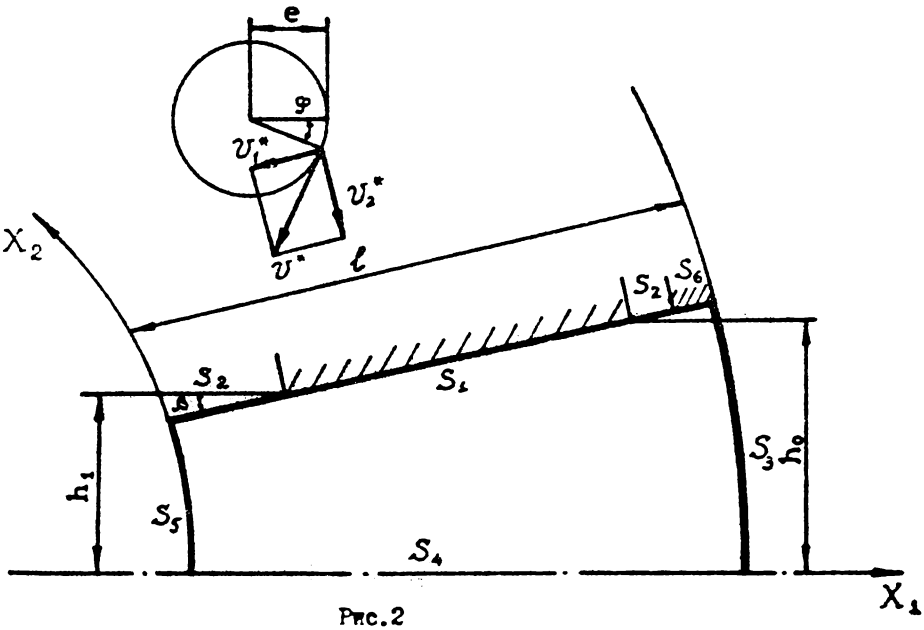
e
φ
v_1^*
v_2^*
v^*
ℓ
X_2
S_2
S_6
S_2
S_1
h_1
S_5
S_3
h_0
S_4
X_1

Рис.2

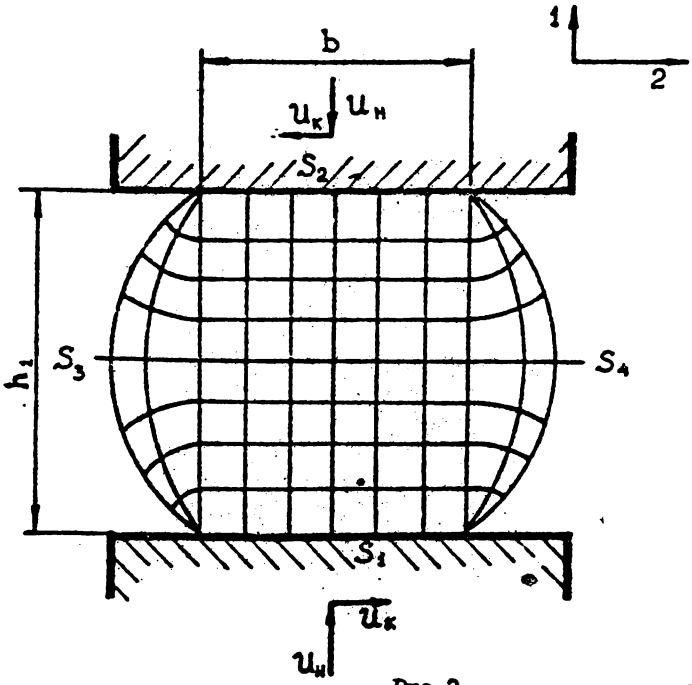
1
2
b
$u_к$
$u_н$
S_2
h_1
S_3
S_4
S_1
$u_к$
$u_н$

Рис.3

Модель деформируемой среды:

$$\tau = \tau_m \cdot H^{\gamma}/(H_0^{\gamma} + H^{\gamma}),$$

где $H_0 = 1/c$; τ_m, γ - параметры, зависящие от температуры, степени деформации и марки стали.

Решение задачи осуществляли методом последовательных нагружений, при котором процесс деформации разбивался на следующие стадии: $0^0 < \varphi \leq 20^0$; $20^0 < \varphi \leq 40^0$; $40^0 < \varphi \leq 60^0$; $60^0 < \varphi \leq 80^0$, то есть деформации были малыми.

Установлено, что при деформации бойками непрерывнолитого сляба на контактной поверхности имеют место сжимающие напряжения, достигающие наибольшей величины, равной 260 МПа, в области выхода сляба из бойков. При деформации сляба без подпора наибольшая величина растягивающих напряжений на входе равна 70 МПа, в середине очага деформации - 38 МПа, на выходе - 82 МПа. Однако эти растягивающие напряжения не будут вызывать раскрытие дефектов как на контактной поверхности заготовок, так и в приконтактном слое, поскольку их величина значительно меньше значений сжимающих напряжений.

Для устранения растягивающих напряжений в области входа сляба в очаг деформации следует в процессе обжатия сляба бойками создавать силу подпора.

Рассмотрен случай деформации сляба с подачей смазки в зону опережения, в результате установлено, что растягивающие напряжения в приконтактном слое сляба на выходе снизились с 82 МПа (деформация без смазки) до 25 МПа.

Проведено теоретическое исследование процесса поперечной деформации круглой заготовки. Для решения плоской задачи использована теория малых упругопластических деформаций, при этом система уравнений записана в виде:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} = 2\lambda \cdot e_{ij}, \qquad (7)$$

$$\varepsilon_{ii} = 3 \cdot C \cdot \sigma,$$

$$C = \begin{cases} K - \text{упруго-пластическая среда}, \\ 0 - \text{пластическая среда}, \end{cases}$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon\,\delta_{ij}; \quad \varepsilon = \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_{ij} = 0{,}5\,(u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\lambda = T/\Gamma, \quad \Gamma = (2\,e_{ij}\cdot e_{ij})^{0{,}5},$$

$$T = G\cdot\Gamma \quad \text{при} \quad T < \tau_s,$$

$$T = \varphi(\Gamma, H) \quad \text{при} \quad T \geq \tau_s,$$

где Г – интенсивность деформации сдвига; К – коэффициент объемного сжатия.

Для решения задачи использован разностный метод и численная схема решения плоских упругопластических задач, разработанные В.И.Одиноковым.

Граничные условия задачи (рис.3):

$$\sigma_2^{\kappa}\big|_{\kappa\in S_i} = \sigma_{21}^{\kappa}\big|_{\kappa\in S_i} = 0; \quad i = 3,4; \quad u_1^{\kappa}\big|_{\kappa\in S_1} = u_н; \qquad (8)$$

$$u_1^{\kappa}\big|_{\kappa\in S_2} = -u_н; \quad \sigma_{12}^{\kappa}\big|_{S = S_1, S_2} = -\psi\,\tau_s\,\frac{v_{ск}^{\kappa}}{v}\cos(n, 1).$$

На контактных поверхностях S_1 и S_2 предусмотрено автоматическое изменение граничных условий в процессе решения задачи: на поверхности S_1 при $u_1 < u_н \Rightarrow u_1 = u_н$, при $\begin{cases} u_1 = u_н \\ \sigma_{11} > 0 \end{cases} \Rightarrow \sigma_{11} = 0$;

на поверхности S_2 при $u_1 > u_н \Rightarrow u_1 = u_н$,

при $\left.\begin{matrix} u_1 = u_н \\ \sigma_{11} > 0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow \sigma_{11} = 0.$

В результате решения задачи получены эпюры напряжений и перемещений при разных углах поворота эксцентрикового вала, которые позволили оценить силовые параметры процесса поперечной деформации, а также зоны упругих и пластических деформаций по мере обжатия заготовки.

4. ДВУХУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

На стадии проектирования агрегата циклической деформации необходимо обоснованно выбрать схему компоновки линии привода и конструктивные параметры, параметры очага деформации и мощность элек-

тродвигателя, обеспечивающие выполнение заданной производительности, снижение энергоемкости и динамической нагруженности, получение профилей высокого качества, а также минимальную стоимость агрегата.

Для решения этой задачи целесообразно использовать алгоритм двухуровневой оптимизации, который, как показано выше, в совокупности с пакетом прикладных программ и статистическими данными о технологических и энергосиловых параметрах обеспечивает комплексный подход к определению оптимальных параметров прокатного агрегата.

При выборе критериев оптимизации агрегата циклической деформации следует учитывать особенности его работы в составе литейно-прокатного модуля. В этом случае к технологическому процессу предъявляется ряд технических требований, таких как выполнение заданной производительности, максимальное использование тепла литого металла, создание благоприятных условий для залечивания дефектов и интенсивной проработки литой структуры по всему сечению заготовки, возможность увеличения сечения непрерывнолитой заготовки и расширения сортамента получаемых профилей.

Учитывая актуальность экономии материально-энергетических ресурсов в качестве целевой функции при решении задачи оптимизации параметров агрегата циклической деформации на верхнем уровне целесообразно принять энергоемкость технологического процесса (Э), а на другие показатели наложить ограничения.

Таким образом, задача двухуровневой оптимизации агрегата циклической деформации может быть сформулирована следующим образом:

I. Верхний уровень.

Минимизировать $Э(\bar{X})$; $\bar{X} = [\Delta h, \omega]$; (9)

при ограничениях: $П > П_3$; $\Delta h^{(1)} < \Delta h < \Delta h^{(2)}$; $\alpha < [\alpha]$;

$\omega^{(1)} < \omega < \omega^{(2)}$; $\varepsilon^{(1)} < \varepsilon < \varepsilon^{(2)}$; $P < [P]$; $M < [M]$; (10)

$C^{к} > [C^{к}]$; $\beta \neq \rho$;

$T_м^{(1)} < T_м < T_м^{(2)}$; $M_{кв} < M_{ном}$; $M_{max}/M_{ном} < K_п$,

где Δh – единичное обжатие; ω – угловая скорость эксцентриковых валов.

2. Второй уровень.

Минимизировать $F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^{n} M_i^{\partial} + \sum_{j=1}^{n-1} K (M_j^{\partial} - M_{j+1}^{\partial})^2$;

$\bar{X} = [C_i; J_i, t_n]$;

при параметрических ограничениях: $C_i^{(1)} < C_i < C_i^{(2)}$,

$J_i^{(1)} < J_i < J_i^{(2)}$; $t_n^{(1)} < t_n < t_n^{(2)}$,

где t_n – время нарастания момента до максимальной величины.

Решение задач двухуровневой оптимизации параметров агрегата циклической деформации осуществляется с помощью математической модели, включающей математические модели очага циклической деформации и линии привода.

В период циклической деформации заготовка обжимается бойками на величину единичного обжатия Δh и одновременно продвигается на величину ΔS :

$$\Delta h = 2e(1 - \cos\varphi), \qquad (11)$$

$$\Delta S = e \sin\varphi, \qquad (12)$$

где e – величина эксцентриситета эксцентрикового вала; φ –угол поворота эксцентрикового вала, на котором происходит обжатие заготовки.

Следует отметить, что зависимость (12) справедлива в случае работы агрегата в режиме самоподачи. Однако во время холостого хода заготовка может подаваться в бойки рольгангом или задающим устройством.

В результате величина максимальной подачи заготовки за один оборот эксцентрикового вала

$$S = 0{,}5 \cdot \Delta h \cdot ctg\alpha = e \cdot ctg\,\alpha, \qquad (13)$$

где α – угол наклона рабочей поверхности бойка.

Скорость подачи заготовки в бойки

$$v = \frac{n \cdot e\,(ctg\,\alpha - \sin\varphi)}{60\,[1 - \varphi/(2\pi)]}, \qquad (14)$$

где n – частота вращения эксцентриковых валов.

Средняя удельная сила деформации (P_c) определяется по известной методике.

Для определения коэффициента напряженного состояния n_σ приведено экспериментальное исследование силовых параметров на установке циклической деформации опытного завода УралНИИчермета. В процессе исследования замерялись тензометрическим методом сила деформации P и крутящий момент $M_{кр}$.

В результате получена зависимость для расчета коэффициента напряженного состояния

$$n_\sigma = 0{,}7 + 0{,}24\ \ell/H_c + 0{,}17\ B_c/\ell + 0{,}18\ S/H_1 . \qquad (15)$$

Зависимость силы деформации от угла поворота эксцентрикового вала имеет вид:

$$P(\varphi) = P_c \cdot B_c\ \frac{0{,}5\,(H_0 - H_1) - e\,[1 - 2\,(1 - \cos\varphi)]}{tg\,\alpha} , \qquad (16)$$

где К – эмпирический коэффициент, определяющий время нарастания силы деформации до наибольшей величины. Для агрегата циклической деформации силой 3500 кН К=2.

Величина крутящего момента за один оборот эксцентрикового вала:

$$M_{кр} = \begin{cases} M_д + M_{тр} & \text{при} \quad 0 < \varphi \leq \pi/2 \\ M_{тр} & \text{при} \quad \pi/2 < \varphi \leq 2\pi , \end{cases} \qquad (17)$$

где $M_д$ – крутящий момент, необходимый для деформации металла:

$$M_д = 2\,P(\varphi) \cdot e \cdot \sin\varphi , \qquad (18)$$

$M_{тр}$ – крутящий момент, необходимый для преодоления сил трения в подшипниках агрегата:

$$M_{тр} = P(\varphi)\,d \cdot \mu ,$$

где d – диаметр цапфы подшипника; μ – коэффициент трения в подшипниках.

Предлагаемая методика расчета оптимальных параметров агрегата циклической деформации характеризуется следующими особенностями:

1. Учет связей между параметрами технологического процесса и линии привода на всех этапах расчета.

2. Оптимизация выполняется по противоречивым критериям: производительности или энергоемкости (верхний уровень) и динамической нагруженности (второй уровень) с учетом системы ограничений, определяющих качество проката.

3. На обоих уровнях оптимизации используется комбинированный алгоритм.

4. Ограничения учитываются с помощью штрафных функций.

5. Проверка сходимости, глобальности и устойчивости.

6. Одновременное решение задач выбора схемы компоновки линии привода и определение оптимальных конструктивных параметров.

Исходной информацией для решения задачи двухуровневой оптимизации агрегата циклической деформации являются следующие данные: возможные схемы компоновки главной линии и конструктивные параметры, величина эксцентриситета эксцентриковых валов, размеры и материал рабочих бойков, калибровки рабочих бойков, параметры электродвигателя, производительность нагревательных устройств, сортамент заготовок и марок стали, сопротивление металла деформации, возможные сечения непрерывнолитой заготовки, температура непрерывнолитой заготовки, скорость подачи заготовки в бойки, угол поворота эксцентрикового вала при обжатии заготовки и система ограничений (10).

После ввода исходной информации для первого сечения непрерывнолитой заготовки производится расчет технологических, скоростных и энергосиловых параметров процесса циклической деформации.

При невыполнении ограничений по какому-либо параметру целевая функция верхнего уровня оптимизации штрафуется.

После определения на данном шаге расчета минимального (максимального) значения целевой функции производится проверка сходимости и оценка глобальности полученного решения.

На втором уровне оптимизации определяются оптимальные по динамической нагруженности конструктивные параметры линии привода, причем технологические и скоростные параметры, определенные на верхнем уровне оптимизации, используются в качестве исходных данных и начальных условий при решении задачи оптимизации второго уровня.

Сначала для исходной компоновки главной линии агрегата определяются максимальные динамические нагрузки в ее элементах. После этого записывается целевая функция в виде(4) обеспечивающая снижение динамических нагрузок в наиболее слабых звеньях привода, например, в зубчатых передачах, и назначаются из условий прочности ограничения на уровень динамических нагрузок во всех упругих звеньях. Далее определяются оптимальные по динамической нагруженности конструктивные параметры. При невыполнении хотя бы одного из ограничений второго уровня оптимизации работает обратная связь между уровнями, в результате чего необходимо снова начать минимизацию (максимизацию) целевой функции верхнего уровня, изменив значение одного или нескольких параметров, например, угловой скорости эксцентриковых валов.

После завершения процедуры двухуровневой оптимизации производится экспертная оценка полученных решений по критериям производительности, динамической нагруженности, энергоемкости и металлоемкости АЦД и с учетом качества получаемых профилей.

5. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для оценки энергосиловых параметров, динамических нагрузок и производительности АЦД Ошутнинского металлургического завода после реконструкции проведены расчеты с использованием алгоритма двухуровневой оптимизации (глава 4).

Исходные данные для расчета: заготовка из стали 35ГС сечением 50 x 200 мм^2, получаемый профиль - полоса сечением 20 x 220 мм^2,

степень деформации 60 %, величина эксцентриситета эксцентрикового вала е = 5 мм, угол наклона рабочей поверхности бойка $\alpha = 15^0$.

Расчет параметров АЦД выполнен в зависимости от угловой скорости эксцентриковых валов и температуры заготовки.

При угловой скорости вращения эксцентриковых валов $\omega = 30$ 1/с и температуре заготовки $T_н = 1100^0$ С сила деформации и крутящий момент соответственно равны 2730кН и 46,2 кН·м, скорость подачи полосы 2,4 м/мин.

Агрегат циклической деформации принят к внедрению НПО "Тулачермет" в составе литейно-обжимного модуля для получения сортовых профилей. Для определения параметров агрегата использован алгоритм двухуровневой оптимизации. Расчеты выполнены для случая получения сортового профиля сечением 60 х 60 мм^2 из непрерывнолитой заготовки из стали 35ГС сечением 150 х 150 мм^2.

Полученные при оптимизации данные позволили выбрать параметры четырехбойкового агрегата циклической деформации: величина эксцентриситета эксцентриковых валов и частота вращения соответственно 5 мм и 300 об/мин , скорость подачи заготовки 2-6 м/мин , сила деформации 1700 кН, крутящий момент 40 кН·м, мощность привода 640 кВт . Решена задача оптимизации параметров главной линии АЦД, в результате чего снижен коэффициент динамичности в зубчатой передаче шестеренной клети с 1,5 до 1,36.

Из анализа качества сортовых заготовок, полученных из непрерывнолитой стали 45, установлено, что процесс циклической деформации обеспечивает получение равномерной и мелкозернистой структуры металла.

Для проведения экспериментальных исследований процесса циклической деформации непрерывнолитых заготовок разработана конструкция кассеты, позволившая установить ее в существующую конструкцию клети стана 300 опытного завода УралНИИчермет.

Для оценки влияния циклической деформации на структуру металла осуществляли обжатия непрерывнолитых образцов сечением 40х40 - 100 мм^2 в АЦД за один проход и для сравнения - на стане 300 за 3 - 4 прохода.

Установлено, что металл, продеформированный на АЦД, имеет более мелкую структуру, чем металл, прокатанный на стане 300. Средний размер зерна составляет соответственно 13 и 22 мкм.

Проведенное исследование качества поверхности металла при деформации на АЦД показало, что наибольшее влияние на разнотолщинность полосы оказывают величина подачи заготовки в бойки, а также угол наклона рабочей поверхности бойков.

Одной из актуальных проблем прокатного производства является эффективное использование материальных ресурсов, в частности, разработка технологических процессов и оборудования для переработки обрези и бракованной продукции. Для проведения исследований разработана конструкция двухбойковой кассеты для продольного разделения, которая будет использована для получения сортовых профилей из обрези толстых листов.

6. ПРИМЕНЕНИЕ АГРЕГАТА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СОСТАВЕ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫХ МОДУЛЕЙ

Решена задача двухуровневой оптимизации системы: агрегат циклической деформации - непрерывный мелкосортный стан, работающей с непрерывнолитой заготовкой сечением 150 х 150 мм^2 из стали 35ГС. Исходные данные: конечный профиль - круглая сталь диаметром 12 мм, конечная скорость прокатки 17 м/с, количество клетей непрерывного мелкосортного стана - 17.

Задача оптимизации технологических параметров литейно-прокатного модуля записана в виде:

минимизировать $Э(\bar{X})$; $\bar{X} = [\lambda_i, v_i]$ (1.)

при ограничениях: $(T_T^A - T_T^{мс})^2 \leq \varepsilon$; $П > П_3$; $П < П_{ну}$;

$\Delta h^{(1)} \leq \Delta h_i \leq \Delta h_i^{(2)}$ $\omega_i^{(1)} \leq \omega_i \leq \omega_i^{(2)}$;

$\lambda_i^{(1)} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{(2)}$; $a_i \leq [a_i]$; $v_i^{(1)} \leq v_i \leq v_i^{(2)}$; (.)

$L_i \leq [L_i]$;

$P_i \leq [P_i]$;

$M_{кр\,i} \leq [M_{кр\,i}]$;

$C_i^к \geq [C_i^к]$,

$T_{мк}^{(1)} \leq T_{мк} \leq T_{мк}^{(2)}$,

где T_T^A, $T_T^{мс}$ - соответственно такты прокатки на агрегате циклической деформации и мелкосортном стане; a_i - отношение осей полосы.

Причем для АЦД нижняя граница изменения вытяжки выбирается из условия интенсивной проработки структуры металла по всему сечению непрерывнолитой заготовки. Для агрегатов с высокими обжатиями эта величина $\lambda = 3,5$.

При решении задачи оптимизации технологических параметров процесса непрерывной прокатки и калибровки валков использована математическая модель, разработанная в работах В.К.Смирнова и В.А.Шилова.

Процедура оптимизации системы взаимосвязанных агрегатов: АЦД - непрерывный мелкосортный стан заключается в следующем. В связи с тем, что расчет параметров литейно-прокатного модуля проводится для НПО "Тулачермет", то начальное сечение непрерывнолитой заготовки известно и равно F_0. Далее из условий обеспечения интенсивной проработки литой структуры по всему сечению заготовки и хорошей вытяжной способности в случае попеременного обжатия заготовки парами бойков задается суммарная вытяжка (λ^A) для АЦД. Таким образом, сечение заготовки (F_1), выходящей из АЦД и поступающей в непрерывный мелкосортный стан, равно $F_1 = F_1 / \lambda$.

Далее производится расчет оптимальных параметров процесса циклической деформации.

Перед расчетом технологических параметров мелкосортного стана следует задать схему калибровки валков для клетей стана. После этого осуществляется распределение коэффициентов вытяжки по клетям и расчет скоростного режима непрерывной прокатки, причем суммарный коэффициент вытяжки $\lambda_{\Sigma} = F_1 / F_K$. Предельная скорость прокатки ($v_i^{(2)}$) определяется путем динамического расчета приводов клетей непрерывного стана (второй уровень оптимизации), а также характеристикой электродвигателя. Далее выполняется расчет размеров калибров и энергосиловых параметров. В процессе расчета производится проверка системы ограничений (20).

В результате определены параметры технологического процесса системы АЦД – мелкосортный стан, в частности для АЦД: сечение непрерывнолитой заготовки – 150 х 150 мм^2, сечение раската – 80 х 80 мм^2, единичное обжатие – 15 мм, угловая скорость эксцентриковых валов – 20,9 1/с, скорость подачи заготовки в бойки – 0,1 м/с, скорость выхода – 0,3 м/с. На втором уровне оптимизации проведена оценка динамической нагруженности и расчет оптимальных параметров главных линий АЦД и клетей непрерывного мелкосортного стана.

Наибольшие динамические нагрузки возникают в тихоходной зубчатой передаче редуктора в зазоре шпиндельного соединения. При скорости вращения валков 6,7 1/с коэффициент динамичности в тихоходной зубчатой передаче редуктора $\eta = 2,0$, а в быстроходной зубчатой передаче – $\eta = 1,35$. Такую неравномерность распределения динамических нагрузок следует учитывать при расчете двухступенчатого редуктора на прочность и долговечность.

Проведена оценка влияния величины обжатия на уровень динамических нагрузок, которые при одних и тех же величинах скорости валков и зазора с уменьшением величины обжатия существенно возрастают, поскольку при этом происходит снижение времени переходного процесса захвата полосы валками. Отсюда следует важный для практики вывод о

том, что снижение максимальных нагрузок, определяемых статическим моментом прокатки и величиной динамической добавки, путем уменьшения обжатий может привести не к снижению, а к увеличению максимальных нагрузок. Это связано с тем, что величина роста динамической добавки из-за уменьшения времени переходного процесса захвата в ряде случаев может превысить величину уменьшения статического момента прокатки вследствие снижения обжатия.

Наиболее высокие динамические нагрузки (η = 2,5 - 2,6) возникают в зубчатых передачах главной линии клети I7 при ударе в зазоре шпиндельного соединения.

Ввиду того, что наиболее нагруженными в линии привода клетей стана 250 являются зубчатые передачи и шпиндели, при захвате с ударом решена задача определения оптимальных конструктивных параметров главных линий с целью снижения динамических нагрузок в этих элементах привода.

Целевая функция записана в виде (4), причем такая запись целевой функции позволяет учесть нагруженность и других элементов главной линии путем ввода ограничений на величину максимального динамического момента в виде: $M_i^{\partial} \leq [M_i^{\partial}]$. После определения оптимальных значений жесткостей C проводится проверка решения на устойчивость. Расчетами установлено, что малому изменению оптимальных значений варьируемых параметров C соответствует малое изменение целевой функции, то есть полученные решения для главных линий клети стана 250 являются устойчивыми.

В процессе оптимизации было установлено, что жесткость моторного вала не оказывает существенного влияния на динамические нагрузки в зубчатых передачах и шпинделях при захвате металла с ударом в шарнирах. Существенное влияние на динамические нагрузки в шпинделях и зубчатых передачах оказывают жесткости шпинделей и вала, расположенного между редуктором и шестеренной клетью, что подтверж-

дает вывод, сделанный для главных линий клетей непрерывно-заготовочного стана. Причем наибольшее влияние на уровень динамических нагрузок в зубчатых передачах шестеренной клети оказывают жесткости шпинделей.

Установлено, что снижение жесткости шпинделей в 2,7 раза и промежуточных валов в I,5 раза обеспечивает уменьшение динамических нагрузок в зубчатых передачах редукторов в I,2 - I,5 раза, а шестеренной клети и шпинделях - в I,I5 - I,5 раза.

Показана возможность использования агрегата циклической деформации в составе мелкосортного стана 250, что позволило исключить из черновой группы 5 клетей и использовать непрерывнолитую заготовку сечением I00 x I00 мм^2. Определены параметры агрегата циклической деформации для листового литейно-прокатного модуля, где непрерывнолитой сляб сечением 50 x I200 мм^2 обжимается в АЦД за один проход до толщины 4 - 8 мм.

7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ

Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование обжимно-заготовочных комплексов ЗСМК и ЧМК, позволивший разработать, внедрить и экспериментально проверить новые режимы прокатки, обосновать необходимость реконструкции агрегатов, а также экспериментальным путем проверить ее эффективность, сократить сроки освоения ряда агрегатов, повысить эффективность заготовочного производства.

Для увеличения производительности НЗС 850/700/500 ЗСМК предложена и проведена реконструкция линии привода клети 2, что позволило повысить скорость прокатки в черновой группе на I0 %.

Для разгрузки клетей чистовой группы проведена реконструкция, в процессе которой перед существующей группой установили одну вертикальную и одну горизонтальную клети,*) что позволило прокатывать в

*) Работа выполнена на кафедре ОМД УПИ им.С.М.Кирова совместно с В.К.Смирновым, В.А.Чичигиным, В.А.Шиловым.

данной группе заготовку сечением 150 х 150 мм^2 и повысить производительность стана. После проведения реконструкции и внедрения новых режимов прокатки экспериментальным путем с замером энергосиловых параметров приведена оценка эффективности реконструкции.

Результаты теоретического и экспериментального исследования пробуксовок использованы при создании эффективной системы контроля и предотвращения пробуксовок, которая внедрена на блюминге 1300 ЗСМК. Экспериментальным путем проведена оценка системы контроля и предотвращения пробуксовок на блюминге 1300 ЗСМК. Установлено, что данная система сокращает продолжительность буксования полосы в валках и ограничивает уровень динамических нагрузок.

С использованием результатов экспериментальных исследований ножниц 12500 кН ЧМК и 16000 кН НТМК и разработанной методики расчета параметров ножниц горячей резки определены основные параметры ножниц для обжимно-заготовочного комплекса ЧМК и составлено техническое задание Уралмашзаводу на проектирование ножниц силой 16000кН.

При моделировании динамики линии привода блюминга 1250 ЧМК установлено, что при наиболее тяжелых режимах нагружения, соответствующих захвату второго слитка при раскрытых зазорах, коэффициенты динамичности составляют 1,8 - 1,9.На основе решения задачи оптимизации предложены рекомендации для снижения динамической нагруженности наиболее слабого звена линии привода - зубчатых передач шестеренной клети.

Для изыскания резервов повышения производительности прокатного комплекса ОХМК и совершенствования технологического процесса прокатки непрерывнолитой заготовки решена задача оптимизации системы взаимосвязанных агрегатов: обжимная клеть - линейный стан. В качестве целевой функции при расчете оптимальных технологических параметров принята производительность, а варьируемых параметров - обжатия в пропусках обжимного и линейного станов, скорости прокатки и число пропусков в обжимной клети.

С целью получения круглого профиля с плотной сердцевиной введено ограничение: $\lambda \geq [\lambda]$, где $[\lambda] = 8$.

Расчеты проведены для условий прокатки круглых профилей (ø 90 и ø 115) из непрерывнолитой заготовки из стали 65Г сечением 330 x 400 мм^2 и длиной 3 м. В результате определено оптимальное сечение заготовки для линейного стана, позволяющее снизить цикл прокатки на обжимной клети и согласовать пропускные способности обжимного и линейного станов.

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

Совокупность теоретических и экспериментальных научных разработок и обобщений, алгоритм двухуровневой оптимизации основных параметров системы взаимосвязанных прокатных агрегатов, новые технические решения и методики расчета, внедренные в производство с высоким экономическим эффектом, новые конструкции агрегата циклической деформации и перспективы его использования в составе литейно-прокатных модулей можно квалифицировать как теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение.

По результатам работы сделаны следующие основные выводы:

- Разработан алгоритм двухуровневой оптимизации системы взаимосвязанных прокатных агрегатов, который в совокупности с пакетом прикладных программ и статистическими данными об энергосиловых параметрах и динамических нагрузках позволяет провести комплексный анализ технологических режимов прокатки и динамической нагруженности приводов системы прокатных агрегатов с любой заданной структурой, в том числе работающей с непрерывнолитой заготовкой, и во взаимосвязи исследовать вопросы повышения производительности, снижения энергоемкости и металлоемкости и улучшения качества проката. На примерах оптимизации систем прокатных агрегатов и литейно-прокатных модулей

показана эффективность применения данного алгоритма для решения задач совершенствования технологических процессов и прокатных агрегатов. Результаты работы внедрены в НПИТИЛМаше Уралмашзавода, на ЗСМК, ЧМК и ОМЗ.

- Разработана математическая модель оптимизации технологических параметров системы взаимосвязанных прокатных агрегатов, позволяющая провести проверку правильности выбора структуры системы и состава оборудования, что особенно важно при переводе прокатных станов на работу с непрерывнолитой заготовкой.

- Разработан алгоритм расчета оптимальных по динамической нагруженности параметров главных линий прокатных агрегатов с учетом параметров зубчатых передач и зазоров при различных режимах нагружения с оценкой сходимости, глобальности и устойчивости решения.

- Разработаны защищенные авторскими свидетельствами конструкции агрегата и способы циклической деформации и продольного разделения.

- Агрегат циклической деформации силой 3500 кН изготовлен Уралмашзаводом и установлен на Омутнинском металлургическом заводе.

- Разработаны конструкции двух- и четырехбойковых кассет, которые устанавливаются в клеть прокатного стана вместо валков, что позволяет с минимальными капитальными затратами внедрить в производство процесс циклической деформации.

- Разработаны способ поперечной деформации заготовок круглого сечения двумя бойками и агрегат для его реализации, при котором бойки обжимают заготовку по высоте с одновременной сдвиговой деформацией в поперечном направлении, что позволяет существенно снизить силы деформации.

- Проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при циклической деформации непрерывнолитого сляба из нержавеющей стали с учетом внешних зон, подпора и смазки

на контактной поверхности. Установлено, что при обжатии сляба бойками со степенью деформации 60 - 80 % за один проход на контактной поверхности имеют место высокие сжимающие напряжения, которые способствуют хорошей проработке литой структуры по всему сечению сляба и завариванию дефектов.

- На основании экспериментального исследования процесса циклической деформации непрерывнолитых заготовок из нержавеющей стали установлено, что данный процесс позволяет улучшить качество листовых заготовок за счет получения однородной и мелкозернистой структуры металла и завариванию несплошностей на глубине 15 - 20 мм.

- Проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при поперечной деформации заготовок круглого сечения, установлены основные закономерности данного способа деформации и силовые параметры.

- Разработан алгоритм двухуровневой оптимизации основных параметров агрегата циклической деформации, причем оптимизация выполняется по двум критериям: энергоемкости (верхний уровень) и динамической нагруженности (второй уровень) с учетом системы ограничений, обеспечивающих выполнение заданной производительности и получение качественных профилей, особенно из непрерывнолитого металла. Предлагаемая методика использована при расчете параметров агрегатов циклической деформации для НПО "Тулачермет", ОМЗ, ИЧМ, УралНИИчермет.

- Создан опытно-промышленный участок циклической деформации на ОМЗ, проведена оценка параметров агрегата циклической деформации после установки в линию привода более мощного электродвигателя.

- Разработана конструкция и определены параметры сортового агрегата циклической деформации для литейно-прокатного модуля НПО "Тулачермет".

- Создан участок циклической деформации на опытном заводе

УралНИИчермета, на котором проведены исследования силовых параметров и качества листа.

- Поставлены и решены задачи двухуровневой оптимизации основных параметров литейно-прокатных модулей для производства сортового проката и листа. Показано, что использование агрегата циклической деформации в составе этих модулей, а также в составе черновой группы непрерывного мелкосортного стана позволяет совместить процессы разливки и прокатки, использовать тепло литого металла, снизить металлоемкость оборудования, улучшить качество проката. На основе проведенных расчетов определены основные параметры агрегата циклической деформации для литейно-прокатных модулей для производства сортового проката и листа.

- Комплекс исследований, направленных на совершенствование прокатных агрегатов ЗСМК и ЧМК, позволил разработать, внедрить и экспериментально проверить новые режимы прокатки, обосновать необходимость реконструкции агрегатов, сократить сроки освоения ряда агрегатов. Экономический эффект составил I,2 млн.руб. в год.

- Поставлена и решена задача оптимизации технологических параметров системы взаимосвязанных агрегатов: обжимная клеть - линейный стан, работающей с непрерывнолитой заготовкой. Определено исходное сечение заготовки для линейного стана, позволяющее повысить производительность данного комплекса.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

I. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. М.:Машиностроение, 1975. 184 с.

2. Lekhov O.S. Computer complex for automated calculation of basic parameters of rolling mills: Communication. Steel in the USSR, 1979, N 4.

3. Lekhov O.S. Computer complex for automated calculation of basic parameteres of rolling mills: Communication 2.

Steel in the USSR, 1979, № 8.

4. Лехов О.С. Динамика взаимодействия приводов клетей непрерывно-заготовочных станов через прокатываемый металл//Изв.вузов. Черная металлургия. 1978. № 2. С.167-171.

5. Лехов О.С. Динамика захвата полосы валками в условиях скольжения//Изв.вузов. Черная металлургия. 1972. № 8. С.88-92.

6. Лехов О.С., Волкова Т.А. Оптимизация конструктивных параметров главных линий прокатных станов//Изв.вузов. Черная металлургия. 1982. № 2. С.135-137.

7. Лехов О.С., Кигалин А.Г. Моделирование на ЭВМ динамических нагрузок в линии привода обжимного стана//Изв.вузов. Черная металлургия. 1974. № 2. С.108-112.

8. Lekhov O.S., Klimich T.G., Smirnov Yu.J., Rytikov S.K. Different designs of shears for primary mills. Steel in the USSR. 1979 № 10.

9. Лехов О.С., Волегов И.Ф. Динамика линий горизонтальных клетей непрерывно-заготовочных станов//Изв.вузов. Черная металлургия. 1977. № 6. С.170-173.

10. Лехов О.С. Оптимизация основных параметров прокатного комплекса //Теория машин металлургического и горного оборудования: Межвуз. сб.науч.тр. Свердловск: УПИ, 1983. С.147-150.

11. А.с. 1193883 СССР. Устройство для деформации длинномерных заготовок/В.В.Блюхер, О.С.Лехов, В.И.Одиноков. 1985.*)

12. А.с. 1195547 СССР. Способ получения заготовок и инструмент для его осуществления/О.С.Лехов, В.И.Одиноков. 1985.*)

13. Теоретическое исследование процесса деформации наклонными бойками непрерывнолитого сляба с точечными дефектами/О.С.Лехов, В.И.Одиноков, И.Я.Чуков, А.В.Песков//Изв.вузов. Черная металлургия. 1986. № 4. С.41-46.

---

*) Не подлежит опубликованию в открытой печати

14. Химич Т.Г., Лехов О.С. Расчет силовых параметров процесса резки заготовок//Изв.вузов. Черная металлургия. 1986. № 6. С.144-146.

15. А.с. 1115295 СССР. Устройство для деформирования заготовок /В.В.Блюхер, В.И.Одиноков, О.С.Лехов. 1984.*)

16. Теоретическое исследование процесса резания непрерывнолитых слябов/О.С.Лехов, В.И.Одиноков, Т.Г.Химич, А.В.Песков//Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 2. С.128-131.

17. А.с. 92836 СССР. Устройство для периодической деформации непрерывной полосы/В.И.Одиноков, О.С.Лехов. 1982.*)

18. Математическая модель технологического процесса прокатки в черновой группе непрерывно-заготовочного стана 850/700/500 /О.С.Лехов, В.А.Чичигин, Б.М.Антошечкин и др.//Науч.тр.МИСиСа. М.,1975. № 82. С.246-250.

19. К вопросу определения усилий резания металлов в горячем состоянии/В.И.Одиноков, О.С.Лехов, Т.Г.Химич, А.В.Песков//Изв.вузов. Черная металлургия. 1981. № 8. С.142-145.

20. Теоретическое исследование процессов резания металла в горячем состоянии/В.И.Одиноков, О.С.Лехов, Т.Г.Химич, А.В.Песков// Механика деформируемых сред. Куйбышев. 1981. С.83-86.

21. Химич Т.Г., Лехов О.С., Кигалин А.Г. Автоматизированный расчет динамических и кинематических параметров ножниц 1250 тс.// Изв.вузов. Черная металлургия. 1980. № 4. С.144-147.

22. Увеличение производительности обжимного и заготовочного станов и улучшение качества проката/Г.Ф.Коломников, В.А.Чичигин, О.С.Лехов, Б.М.Антошечкин//Сталь. 1974. № 10. С.914-916.

23. А.с. 916140 СССР. Ножницы с нижним резом закрытого типа/ Г.Л.Химич, Т.Г.Химич, О.С.Лехов//Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1982. № 12. С.55.

*) Не подлежит опубликованию в открытой печати

24. Предотвращение пробуксовок при прокатке на обжимных станах/ В.Ю.Островлянчик, В.В.Лопатин, В.Г.Кунинин, О.С.Лехов//Сталь. 1979. № 44. С.284-286.

25. Лехов О.С. Оптимизация основных параметров прокатного комплекса для производства заготовок//Новые технологические процессы и оборудование сортопрокатного производства: Тезисы докладов конференции. Свердловск, 1983. С.40.

26. Исследование процесса разделения калиброванными бойками непрерывнолитого сляба на ряд сортовых заготовок/О.С.Лехов, В.И.Одиноков, А.В.Песков и др.//Новые технологические процессы и оборудование сортопрокатного производства: Тезисы докладов конференции. Свердловск, 1983. С.39.

27. Лехов О.С., Малахов А.В. Динамика линии привода прокатных станов. Моделирование и оптимизация//Ш Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докладов. Ч.I. М., 1985. С.50-51.

28. Лехов О.С., Малахов А.В. Динамика привода агрегата циклической деформации//Ш Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докладов. Ч.I. М., 1985. С.49.

29. Лехов О.С., Малахов А.В. Повышение надежности прокатного комплекса путем оптимизации технологических параметров//II Республиканская конференция по повышению надежности и долговечности машин и сооружений: Тезисы докладов. Киев:Наук.думка, 1985. С.99-100.

30. А.с. 1352767 СССР. Способ получения сортовых заготовок из сляба и инструмент для его осуществления/О.С.Лехов, В.И.Одиноков, А.В.Малахов, М.Ю.Туев. 1987.*)

---

*) Не подлежит опубликованию в открытой печати

31. Лехов О.С., Малахов А.В., Жигалин А.Г. Оптимизация параметров многомассовых систем главных линий прокатных станов//Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. № 12. С.122-126.

32. Оптимизация основных параметров прокатного комплекса для производства заготовок/О.С.Лехов, А.В.Малахов, В.В.Бакутин, А.Г.Жигалин//Изв.вузов. Черная металлургия. 1987. № 2.С.39-44.

33. Лехов О.С.,Малахов А.В. Оптимизация параметров непрерывных сортовых станов//Всесоюзный научно-технический семинар "Улучшение качества и экономия металла за счет повышения точности прокатки сортовых профилей":Тезисы докладов. М., 1987.

34. Lekhov O.S. System of automated design of roughing and billet mill complexes // Steel in the USSR. 1982.№4.P.157-161.

35. А.с. 1410357. СССР. Способ деформации заготовок/Г.Л.Колмогоров, О.С.Лехов, С.Л.Съянов. 1988.*)

36. Лехов О.С., Одиноков В.И., Песков А.В. Исследование процесса деформации непрерывнолитых слябов из коррозионностойкой стали на агрегате циклической деформации//Всесоюзная научно-техническая конференция "Задачи технического перевооружения листопрокатного производства":Тезисы докладов. Днепропетровск, 1987. С.85.

37. Съянов С.Л., Лехов О.С. Некоторые аспекты повышения эффективности процесса циклического деформирования//Всесоюзная конференция "Получение и обработка материалов высоким давлением": Тезисы докладов. Минск: Наука и техника, 1987. С.65.

38. Исследование процесса получения заготовок простой и сложной формы на агрегате циклической деформации/О.С.Лехов, В.И.Одиноков, И.Я.Чуков, А.В.Песков, Б.П.Гуселетов, А.В.Малахов, М.Ю.Туев//Всесоюзная научно-техническая конференция "Металл и технический прогресс":Тезисы докладов. Москва, 1987. С.78.

---

*) Не подлежит опубликованию в открытой печати

39. Заявка № 4079868/31-27. Устройство для периодической деформации непрерывной полосы/Г.Л.Колмогоров, В.И.Одиноков, О.С.Лехов, С.Л.Сьянов//Положительное решение от 24.06.87.*)

40. Заявка № 4211334/31-02. Шпиндель прокатного стана/О.С.Лехов, А.В.Малахов, М.Ю.Туев. Положительное решение от 23.02.87.

41. Одиноков В.И., Лехов О.С., Песков А.В. Моделирование процессов обработки заготовок на агрегате циклической деформации с помощью ЭВМ//Всесоюзное научно-техническое совещание "Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках":Тезисы докладов. М., 1988. С.107.

42. Лехов О.С. Двухуровневая оптимизация основных параметров прокатного комплекса с помощью ЭВМ//Всесоюзное научно-техническое совещание "Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках": Тезисы докладов. М., 1988. С.94.

43. Лехов О.С., Чуков И.Я., Малахов А.В. Алгоритм двухуровневой взаимосвязанной оптимизации параметров сортопрокатного комплекса//IУ Всесоюзная научно-техническая конференция "Теоретические проблемы прокатного производства": Тезисы докладов. Днепропетровск, 1988. С.192.

44. Лехов О.С., Одиноков В.И., Гуселетов Б.П. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса циклической деформации простых и сложных профилей из рядовых и нержавеющих сталей// IУ Всесоюзная научно-техническая конференция "Теоретические проблемы прокатного производства": Тезисы докладов. Днепропетровск, 1988. С.234.

45. Лехов О.С., Чуков И.Я., Малахов А.В. Взаимосвязанная двухуровневая оптимизация основных параметров прокатного комплекса для производства заготовок//Теория машин металлургического оборудования:Межвуз.сб.науч.тр.Свердловск:УПИ, 1988. С.122-127.

*) Не подлежит опубликованию в открытой печати

46. Литейно-прокатный модуль для получения сортовых заготовок/В.П.Симонов,Л.З.Матвеев,О.С.Лехов,А.Н.Скорняков,Л.П.Заков//Всесоюзная научно-техническая конференция "Непрерывные металлургические процессы "Руда, лом - металлопрокат":Тезисы докладов.Свердловск,1989. С.6-7.
47. Разработка технологии производства простых и сложных профилей из непрерывнолитой заготовки на агрегате циклической деформации с целью улучшения их качества/О.С.Лехов,В.И.Одиноков,Б.П.Гуселетов,И.Я.Чуков,М.Ю.Туев,А.В.Малахов//Всесоюзная научно-техническая конференция исполнителей программы "Металл":Тезисы докладов.Абакан,1988.С.162-164.
48. Лехов О.С. Новый способ получения стальных профилей простой и сложной формы//Деловые связи, 1990. № 3. С.38.
49. Лехов О.С.,Одиноков В.И. Установка циклической деформации для получения профилей простой и сложной формы//Всесоюзная конференция "Совершенствование металлургических технологий в машиностроении":Тезисы докладов. Волгоград, 1990.
50. Исследование процесса циклической деформации непрерывнолитых заготовок из нержавеющей стали/О.С.Лехов,И.Я.Чуков,Н.М.Карпова,А.В.Песков// Известия вузов.Черная металлургия, № 6, 1990. С.33-34.
51. Лехов О.С.,Одиноков В.И.,Песков А.В. Теоретическое исследование процесса поперечной деформации заготовок круглого сечения//Научно-технический семинар"Механика и технология машиностроения":Тезисы докладов. Свердловск, 1990. С.44.
52. Инструмент для периодической деформации непрерывнолитых заготовок/ В.В.Бринза,О.С.Лехов,В.П.Полухин,В.П.Сухачев//Положительное решение по заявке № 4763869/27, 1990.
53. Установка циклической деформации в линии УНРС для получения листовых, сортовых и фасонных заготовок/О.С.Лехов,В.А.Густомесов,В.И.Одиноков,Е.И.Макеранец,А.В.Малахов//Заседание научного совета ГКНТ СССР "Новые процессы в черной металлургии":Тезисы докладов. Москва, 1990. С.4.

54. Ковочно-прокатный стан/О.С.Лехов, М.Ю. Туев, А.В.Ма-Малахов, В.А. Густомесов, Е.И. Макеранец// Положительное решение по заявке № 4819128, 1990г.

Подписано в печать 06.03.91 Формат 60х84 1/16
Бумага писчая Плоская печать Усл.п.л. 2,79
Уч.-изд.л. 2,14 Тираж 100 Заказ 2 Бесплатно

Редакционно-издательский отдел УПИ им.С.М.Кирова
620002, Свердловск, УПИ, 8-й учебный корпус
Ротапринт УПИ. 620002, Свердловск, УПИ, 8-й учебный корпус