



Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

Редакционная коллегия

Главный научный редактор

Корчунов А.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Заместитель главного научного редактора

Анцупов В.П. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Бобарикин Ю.Л. – «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

Горбатюк С.М. – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», профессор, доктор технических наук.

Кузьминов А.Л. – «Череповецкий государственный университет», профессор, доктор технических наук.

Раскатов Е.Ю. – «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор, доктор технических наук.

Трофимов В.Н. – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор, доктор технических наук.

Ответственный редактор

Слободянский М.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент, кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.

Периодичность выхода – 2 номера в год.

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-07, 29-84-51

Website: www.momz.magtu.ru

E-mail: momz-magtu@yandex.ru
momz-magtu@mail.ru

Журнал отпечатан издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова,

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 25.06.2018. Заказ 310.

Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

В.Е.Антонюк

Перспективы использования динамической стабилизации при изготовлении и восстановлении бурильных труб

5

V.E. Antonyuk

Prospects of applying dynamic stabilization, when manufacturing and reconditioning drill pipes

5

А.В. Козлов, А.С. Верещагин

Проектирование системы управления трубогибом

9

A.V. Kozlov,**A.S. Vereshchagin**

Designing a pipe bender control system

9

А.М. Милукова, А.И. Горчанин, Н.В. Бурносков, Г.П. Горецкий

Улучшение эксплуатационных характеристик стальных режущих инструментов сложного профиля, упрочнённых комбинированной магнитно-импульсной обработкой

17

A.M. Milyukova, A.I. Gorchanin, N.V. Burnosov, G.P. Goretsky

Improving the performance of steel cutting tools with a complex profile, strengthened with a combined magnetic-pulse processing

17

М.З. Певзнер, В.А. Жуйков, К.В. Иванов-Польский, Е.А. Куимов, В.Д. Перевощиков

Современное состояние и перспективы развития системы сбора, хранения, статистической обработки и представления информации при управлении прокатным оборудованием на предприятии цветной металлургии

23

M.Z. Pevzner, V.A. Zhuikov, K.V. Ivanov-Polsky, E.A. Kuimov, V.D. Perevoshchikov

The current state and development prospects of the system of collection, storage, statistical treatment and representation of information, when operating rolling equipment at a nonferrous metallurgy plant

23

С.Г. Шахрай, А.А. Дектерев, А.В. Минаков, П.А. Необъявляющий, Н.А. Шарыпов

Модернизация анодного кожуха алюминиевого электролизера Содерберга

34

S.G. Shakhray, A.A. Dekterev, A.V. Minakov, P.A. Neobyavlyayushchy, N.A. Sharypov

Modernization of an anode shell of a Soderberg aluminum electrolyzer

34

М.П. Шишкарёв

Выбор адаптивных фрикционных муфт для приводов машин металлопрокатного производства

40

M.P. Shishkarev

Adaptive friction couplings for drives of steel rolling facilities

40

И.В. Горлов, Е.В. Полетаева, М.Г. Рахутин

Технологическое оборудование при изготовлении торфяных машин в условиях многономенклатурного производства

53

I.V. Gorlov, E.V. Poletaeva, M.G. Rakhutin

Process equipment, when manufacturing peat machines at a multiproduct plant

53

Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский

Расчет параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине с учетом прогиба и износа бочек роликов

60

E.A. Maksimov, E.P. Ustinovsky

Calculating plate leveling parameters for a roller leveler subject to bending and wear of roller bodies

60

В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.А. Плащинский

Способ предотвращения налипания жидкого алюминия к поверхности медного кристаллизатора

66

V.I. Bolobov, A.P. Batalov, V.A. Plashchinsky

Method of preventing liquid aluminum from sticking to the surface of a copper mold

66

Е.И. Устинова, А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц

Выбор оптимальной схемы калибровки валков для прокатки швеллеров, как первого этапа оптимизации

72

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

Identifying optimum channel forming roll calibration process as the first stage of optimization

72



**От коллектива кафедры «Инжиниринг
технологического оборудования» НИТУ «МИСиС»
и редакции журнала «Механическое оборудование
металлургических заводов»**

Поздравляем с юбилеем!

23 июля 2018 г. 80-летний юбилей отмечает доктор технических наук, профессор кафедры «Инжиниринг технологического оборудования» НИТУ МИСиС Чиченев Николай Алексеевич.

Николай Алексеевич родился в городе Люберцы Московской области. В 1955 году после окончания средней школы он поступил в Московский энергетический институт (МЭИ), который закончил в 1961 году по специальности инженер-электромеханик. В МЭИ Чиченев Н.А. работал с 1961 по 1964 год в должности ассистента на кафедре сопротивления материалов. С 1964 года и по настоящее время Николай Алексеевич работает в МИСиС, в начале научным сотрудником, затем доцентом, профессором, заведующим кафедрой, деканом факультета, профессором-методистом.

Кандидатскую диссертацию Н.А. Чиченев защитил в 1968 г., в 1994 г. – докторскую. В 1975 г. ему присвоено ученое звание доцента, а в 1991 г. – профессора.

Большое значение в научной деятельности Н.А. Чиченева имели научные стажировки в США (1969 – 70 г.г.) и Англии (1977 г.). В 1972 г. он читал лекции в Индийском технологическом университете.

Н.А. Чиченев разработал и успешно читает большое количество учебных курсов. В том числе, общепрофессиональный курс для студентов металлургических специальностей "Прикладная механика и механическое оборудование металлургических цехов", специальные курсы для студентов-механиков «Математическая теория надежности технических систем», «Эксплуатация и ремонт металлургических машин и оборудования», «Основы научных исследований и инженерного творчества», «Машины и агрегаты для подготовки шихтовых материалов». Созданные им комплекты раздаточного материала по курсам лекций, курсовому и дипломному проектированию, успешно используются в учебном процессе.

Николай Алексеевич является квалифицированным преподавателем, который проводит занятия на высоком уровне, при этом много внимания уделяя воспитательной работе с учащимися. Все виды учебных занятий он проводит на высоком научном и методическом уровне.

Н.А. Чиченев активно участвует в организационно-методической работе по перестройке высшей школы и в подготовке кадров высшей квалификации. По его инициативе в НИТУ МИСиС с 1989 г. организована подготовка инженеров-механиков по специальности «Металлургические машины и оборудование» и аспирантов по направлению «Машины и агрегаты металлургического производства». За это время на кафедре подготовлено более 300 специалистов, защищено 3 докторских и 13 кандидатских диссертаций.

Более 20 лет он работает в составе диссертационных советов НИТУ МИСиС, Московского вечернего металлургического института и Всесоюзного научно-исследовательского института металлургического машиностроения им. академика А.И. Целикова по присуждению ученых степеней кандидатов и докторов технических наук по специальностям «Технологии и машины обработки давлением», «Обработка металлов давлением» и «Машины и агрегаты металлургического производства». Под его руководством подготовлено 12 кандидатов технических наук.

С 1991 г. Н.А. Чиченев является председателем учебно-методической комиссии по специальности 1703 «Металлургические машины и оборудование» Министерства образования Российской Федерации, которой подготовлены государственные квалификационные требования к специалистам с высшим образованием, государственный образовательный стандарт высшего професси-

онального образования, типовой учебный план, перспективный план подготовки и издания учебников и др.

Он является председателем комиссии по специальности «Металлургические машины и оборудование» Оргкомитета Российского конкурса с международным участием дипломных проектов и работ и магистерских диссертаций в области металлургии «Металлургия -2004 – Металлургия-2012».

Н.А. Чиченев активно участвовал в создании кафедры металлургического оборудования в Новотроицком филиале МИСиС (Оренбургская область), на базе которой подготовлено более 250 инженеров-механиков для Орско-Халиловского металлургического комбината (ОАО «Уральская Сталь»). К учебному процессу, кроме преподавателей МИСиС, привлечены ведущие специалисты промышленности и Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова.

Профессор Н.А. Чиченев является одним из ведущих специалистов в области экспериментальной механики процессов и машин обработки металлов давлением не только в России, но и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Им создано перспективное научное направление – агрегаты и непрерывные линии для производства прецизионных и многослойных материалов из труднодеформируемых металлов и сплавов. Это направление относится к одному из наиболее прогрессивных в технологии обработки металлов давлением и металлургическом машиностроении. Научная значимость работ Н.А. Чиченева состоит в создании фундаментальных основ методологии проведения эксперимента, в теоретическом обобщении и развитии современных методов и средств экспериментальной механики. Практическую ценность представляют разработанные Н.А. Чиченевым методики проведения эксперимента, алгоритмы и программы, которые широко используются как при проведении научно-исследовательских работ, так и в учебном процессе.

Внедрение разработок на ряде ведущих предприятий металлургической и электронной промышленности обеспечило получение значительного технико-экономического эффекта за счет повышения долговечности оборудования и улучшения качества выпускаемой продукции, сокращения расходов на проведение исследований.

По результатам научных исследований опубликовано более 380 научных работ, в т.ч. 18 монографий и 34 учебных пособий для вузов, получено более 40 авторских свидетельств на изобретения и патентов.

Труды профессора Чиченева Н.А. хорошо известны сотрудникам научно-исследовательских организаций, инженерно-техническим работникам металлургических и машиностроительных предприятий, преподавателям и студентам вузов.

Под его руководством создана научная школа «Экспериментальная механика процессов и оборудования металлургического производства».

Чиченев Н.А. является лауреатом Премии Совета Министров СССР, почетным работником высшего профессионального образования РФ. Заслуженным деятелем науки РФ. Он награжден орденом «За заслуги в материаловедении», «Ветеран труда», «Заслуженный металлург МИСиС».

Чиченев Н.А. действительный член международной академии энергоинформационных наук, почетный профессор Северо-Кавказского горно-металлургического института, председатель учебно-методической комиссии Минобрнауки по специальности «Металлургические машины и оборудование», председатель редакционного совета НИТУ «МИСиС», имеет почетное звание «Основатель научной школы». Руководитель научно-методического совета «Технологические машины и оборудование» Федерального учебно-методического объединения по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 15.00.00 «Машиностроение». Сопредседатель Оргкомитета всероссийского совещания-семинара Учебно-методического объединения по направлению «Технологические машины и оборудование» на базе ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (АГТУ) – вот далеко не полный перечень заслуг профессора Николая Алексеевича Чиченева.

Поздравляем Николая Алексеевича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, счастья в личной жизни и новых творческих успехов в научной и педагогической деятельности!



УДК 539.3

В.Е. Антонюк

Государственное научное учреждение
«Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси»,
г. Минск, Беларусь
E-mail: vladi@tut.by
Дата поступления 16.01.2018

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Аннотация

Рассмотрены особенности технологии изготовления бурильных труб для достижения геометрической точности. Предложены пути повышения геометрической точности и эксплуатационных параметров при изготовлении и восстановления бурильных труб за счет использования циклического нагружения.

Ключевые слова: бурильная труба, отклонение от прямолинейности, остаточные напряжения, циклическое нагружение, правка.

Введение

В настоящее время для горизонтального и глубокого бурения роторным способом преимущественно используются высокопрочные утяжеленные бурильные трубы. При бурении часто встречается искривление скважин, которое влечет за собой ряд таких проблем, как нарушение сроков бурения, повышенный износ бурильных труб, ухудшение качества изоляционных работ, невозможность использования штанговых насосов при эксплуатации скважин и т.д. Одной из причин искривления скважин являются применение искривленных бурильных труб и самопроизвольное искривление труб в процессе бурения.

В данной работе предлагается использовать циклическое нагружение для повышения геометрической точности оси бурильных труб и снижения остаточных напряжений, которые в ряде случаев являются причиной искривления труб в процессе эксплуатации.

Технологии изготовления и правки бурильных труб

Требования и общие технические условия к бурильным трубам определяются ГОСТ Р 51245 - 99 «Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия» [1], ГОСТ 631 - 75 «Трубы

бурильные с высаженными концами и муфты к ним. Общие технические условия», а также ГОСТ 631-75 и ТУ 14-3-126-73, ТУ -14-3-1928-94, ТУ-14-3-1919-93, ТУ 14-3-15-71-88, ТУ 1234-010-26602587-2007 и т.д.

Согласно требований этих ГОСТов общая кривизна трубы не должна превышать 1:2000 её длины, т. е. максимальная кривизна трубы длиной 6 метров равна 3 мм, а трубы длиной 12 метров - 6 мм.

Для утяжеленных бурильных труб кривизна канала трубы относительно ее теоретической оси в середине трубы не должна превышать: 4,5 мм для труб диаметром 120 и 133 мм; 3,0 мм – 146 и 178 мм; 2,0 мм для труб остальных диаметров. Допускается требуемую кривизну труб обеспечивать холодной правкой.

По геометрическим параметрам большинство бурильных труб по наружному диаметру находятся в диапазоне 45...120 мм и длине от 6 до 10 м, в связи чем по соотношению длины и диаметра бурильные трубы находятся в пределах $L/d > 10$, что позволяет считать их нежесткими деталями как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации.

В процессе изготовления трубы подвержены различным видам деформаций, приводящих к изменению их геометриче-

ских параметров. Трубы могут деформироваться от сил резания, от сил зажима, от перепада температур, от структурных изменений и т.д.

Для исключения этих деформаций на последней стадии обработки труб применяются различные виды правки. Основные технологические операции и оборудование для изготовления буровых труб включают разрезку труб и обработку концов, первую правку, высадку (или приварку) замков, проточку и расточку замков, нарезание резьбы, термическую обработку, вторую правку.

Первая правка производится для трубы без замков. Такая правка может производиться как на прессе, так и на роликовых машинах. Правка труб на косовалковых машинах является наиболее перспективной по обеспечению точности труб [2]. Основным преимуществом правки труб на правильных косовалковых машинах является то, что в процессе правки труба не вращается, и правка происходит при циклических знакопеременных изгибах, при этом продольная кривизна выправляемых труб не превышает 0,5 мм/п.м. В оборудовании для правки труб используют десятивалковые правильные машины. Технологии изгиба труб внутри калибра также успешно реализуются на более дешевых шестивалковых и восьмивалковых правильных машинах [3].

Вторая правка производится для окончательно изготовленной буровой трубы, которая по своей конструкции имеет увеличенные диаметры с обеих сторон, которые не позволяют использовать роликовые схемы правки и оставляют возможность правки только на прессе.

В результате статическая правка на прессе для окончательно изготовленной буровой трубы исправляет кривизну трубы, но сохраняет остаточные напряжения.

Остаточные напряжения даже при простом хранении трубы в результате релаксации приводят к её искривлению трубы. В процессе эксплуатации под действием знакопеременных нагрузок, причем достаточно высоких уровней, процесс релаксации остаточных напряжений в трубе

ускоряется, что приводит к искривлению трубы.

В технической литературе приведены катастрофические случаи искривления буровых колонн причиной которых являлось неблагоприятное сочетание различных факторов. Однако пока процесс релаксации остаточных напряжений в буровых трубах в процессе эксплуатации недостаточно изучен и ему не уделялось достаточного внимания.

Имеющаяся информация о влиянии остаточных напряжений на геометрические параметры маложестких стержневых изделий позволяет предполагать возможности существенного влияния остаточных напряжений на искривление буровой колонны в процессе эксплуатации. Особенно остро эта проблема относится к настоящему времени, когда преимущественное применение находит роторное бурение и увеличивается глубина новых скважин.

Известно, что зарубежные изготовители маложестких деталей применяют правку с многократным приложением знакопеременных нагрузок, при этом отмечается высокая точность независимо от исходной погрешности, уменьшение внутренних напряжений, стабильность геометрической формы деталей при последующей обработке, сокращение операций термической обработки, увеличение срока службы, однако в этой и других публикациях полностью отсутствует информация о режимах и особенностях такой правки [4].

Метод динамической стабилизации

Для исправления и стабилизации минимальной кривизны труб, а также снятия внутренних напряжений целесообразно использовать метод динамической стабилизации [5-7]. К настоящему времени выявлены основные физические закономерности динамической стабилизации, экспериментально подтверждено явление стабилизации геометрической оси тела при нагружении знакопеременной циклической нагрузкой. При этом знакопеременные нагрузки изменяются по определенному закону. Суммарное количество циклов назначается в пределах от 100 до 800 циклов. Для целе-

направленного использования динамической стабилизации разработана инженерная методика расчета режимов нагружения.

В отличие от правки на правильных станах, где все трубы правятся практически на одном и том же режиме нагружения, установка для динамической стабилизации на современном уровне выполняется с системой управления циклограммой нагружения на основе ЧПУ и позволяет устанавливать любые режимы правки применительно к конкретной трубе.

Можно прогнозировать, что использование динамической стабилизации при изготовлении бурильных труб обеспечит кривизну трубы на всей длине в пределах 0,5... 1,0 мм. Но самое главное - позволит снизить их деформацию во время бурения за счет снятия внутренних напряжений, повысит надежность и долговечность труб. Динамическая стабилизация может быть также использована для исправления кривизны труб при их реставрации.

Динамическая стабилизация мало жесткого стержневого изделия типа бурильных труб осуществляется за счет создания в нем циклического нагружения при вращении. В исходном положении труба зажимается с двух сторон по наружному диаметру и приводится во вращение с изменением величины прогиба по заданной циклограмме (рисунок 1) [8].

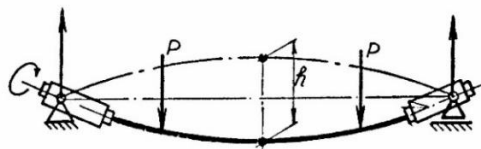


Рисунок 1. Принципиальная схема динамической стабилизации труб

Установка для динамической стабилизации состоит из станины, на которой расположены два шпиндельных устройства с быстродействующими патронами, в которых крепится по наружным диаметрам труба (рисунок 2). Шпиндельные устройства имеют привод вращения и силовой привод для их поворота относительно оси вращения торсионного вала.

Частота вращения патронов шпиндельного устройства и силового привода для поворота относительно оси вращения трубы управляются по специальной цикло-

грамме с помощью системы ЧПУ (рисунок 3). Система ЧПУ позволяет устанавливать управляющие программы, вносить в них корректировки, работать в автоматическом и ручном режимах.

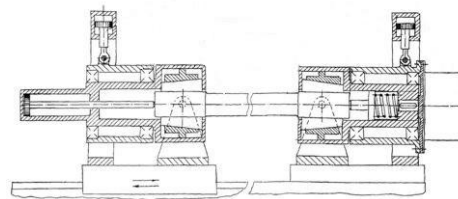


Рисунок 2. Конструктивная схема установки для динамической стабилизации труб

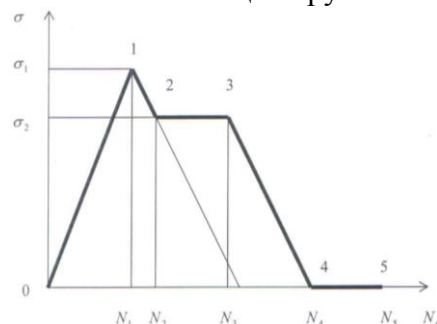


Рисунок 3. Циклограмма динамической стабилизации

Для проведения исследования динамической стабилизации деталей типа валов была создана опытная установка со следующими техническими характеристиками:

- длина подвергаемых динамической стабилизации валов - 740...1600 мм;
- диаметр рабочей части валов - 35...45 мм;
- частота вращения вала - 1000 мин⁻¹;
- максимальный прогиб вала при максимальной длине - 85 мм;
- суммарная мощность приводов - 17 кВт.

При правке валов длиной 1200 мм с диаметром рабочих шеек 40 мм достигнуто биение вала в пределах 0,3...0,5 мм при исходном биении от 5 до 10 мм.

Принципиальной особенностью динамической стабилизации валов было то, что высокая окончательная точность достигалась независимо от исходной погрешности и не требовалось проводить измерения исходной погрешности. Результатом динамической стабилизации валов было сохранение достигнутой точности на протяжении хранения через 3 месяца, что позволяет сделать вывод об отсутствии остаточных

напряжений после динамической стабилизации. Достигнутые результаты использования динамической стабилизации позволяют прогнозировать как повышение точности, нагрузочной способности и ресурса деталей типа труб и валов, так и снижение технологических затрат на их изготовление.

Для создания промышленной установки с ЧПУ для динамической стабилизации бурильных труб к настоящему времени в Объединенном институте машиностроения Национальной академии наук Беларуси разработаны конструктивные схемы и расчетные зависимости для определения основных силовых параметров установки для динамической стабилизации утяжеленных бурильных труб в диапазоне наиболее широко используемых длин и диаметров. Для проектирования и изготовления промышленных установок для динамической стабилизации бурильных труб имеются возможности использования предприятий станкостроения как в Белоруссии, так и в Российской Федерации.

Особенностями используемой системы ЧПУ установки для динамической стабилизации утяжеленных бурильных труб является программное обеспечение, что позволяет оперативно вносить корректировки в циклограммы нагружения для одного и того же типоразмера трубы при необходимости уточнения свойств материала и других особенностей трубы.

На основании этого при использовании динамической стабилизации появляется возможности выявлять трубы со скрытыми дефектами и отклонениями от заданных механических свойств, которые практически невозможно обнаружить другими методами без разрушения трубы.

Заключение

1. Предложено использовать метод динамической стабилизации для повышения точности геометрических параметров при изготовлении утяжеленных бурильных труб с отношением длины к диаметру свыше 30 с достижением точности геометрической оси 0,25...0,40 мм на 1000 мм длины детали. В результате можно повысить точность изготовления бурильных

труб по кривизне примерно в 2 раза и снизить остаточные напряжения, что в конечном итоге позволит повысить точность бурения.

2. Предложено использовать метод динамической стабилизации на первом этапе реставрации бурильных труб для выявления труб со скрытыми дефектами, которые практически невозможно обнаружить другими методами без разрушения трубы, с последующей правкой с достижением требуемой точности.

Библиографический список

1. Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия: ГОСТ Р 51245-99. – М.: Госстандарт России, 2000. – 15с.
2. Ротов И.С. Машины для правки труб. Конструкции, расчеты, исследования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. – 269 с.
3. Завгородній Д.В. Удосконалення технологічних режимів процесу та конструкцій обладнання для виправлення труб та трубних заготовок: дисс. на соиск. уч. ст. кандидата техн. наук. – Краматорск, 2006. – 225 л.
4. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
5. Антонюк В.Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 216 с.
6. Антонюк В.Е., Берестнев О.В. Основные положения динамической стабилизации геометрических форм деталей // Доклады Национальной Академии наук Беларуси. 2005. Т.49. № 3. С.98 – 102.
7. Антонюк В.Е. Расчетные зависимости управления петлей механического гистерезиса для динамической стабилизации // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 10. С.21-24
8. Антонюк В.Е. Технологические возможности повышения точности изготовления дисков и валов // Технология машиностроения. 2005. № 6. С.43–48

PROSPECTS OF APPLYING DYNAMIC STABILIZATION, WHEN MANUFACTURING
AND RECONDITIONING DRILL PIPES

Abstract

The paper focuses on process features of manufacturing drill pipes to control their geometry. It suggests ways to increase geometric accuracy and operating parameters, when manufacturing and reconditioning drill pipes, by applying cyclic loading.

Keywords: drill pipe, out-of-straightness, residual stress, cyclic loading, leveling.



УДК 621.774.63

А.В. Козлов, А.С. Верещагин

ФГАОУ ВО Филиал «Южно-Уральского государственного
университета» в г. Златоусте

г. Златоуст, Российская Федерация

E-mail: arta2009@mail.ru

Дата поступления 17.04.2018

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРУБОГИБОМ

Аннотация

Произведена модернизация серийного трубогиба ИВ-3430 для холодной гибки труб методом раскатывания. В ходе производственных испытаний модернизированного трубогиба выявлены ряд недостатков в существующей системе управления трубогибом, оказывающие негативное влияние на качество гибки труб. Для устранения недостатков и расширения технологических возможностей трубогиба произведено совершенствование данной системы с применением современных электронных устройств. Для упрощения работы оператора организован человеко-машинный интерфейс. Разработаны принципиальные схемы функционирования, а также циклограмма работы трубогиба. Представлены результаты испытаний модернизированной системы управления, показывающие целесообразность её внедрения.

Ключевые слова: совершенствование, управление, трубогиб, раскатывание, модернизация.

В Южно-Уральском государственном техническом университете разработана не имеющая аналогов технология холодной гибки труб большого диаметра и оборудование для её реализации, в основе которой лежит воздействие на изгибаемую трубу вращающегося раскатника [1].

На основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований было разработано оборудование для гибки труб диаметром 20–200 мм. В частности, проведена модернизация серийного трубогиба ИВ-3430. Трубогиб был снабжен механизмом раскатывания изгибаемой трубы и

механизмом создания натяга, выполненном в виде инерционного нагружателя [2].

Кинематическая схема (рисунок 1) состоит из: 1 – электродвигатель А112МА6У1; 2, 4, 18, 20 – шкивы; 3 – ременная передача; 5 – подшипник радиальный; 6 – червячный редуктор РЧУ100-20-51-У2; 7 – муфта; 8 – подшипник радиально-упорный; 9 – червяк; 10/11, 12/13 – зубчатые передачи; 14 – эксцентриковый зажим; 15 – ролик гибочный; 16 – ролик раскатной, 17 – зажимной винт; 19 – инер-

ционный нагружатель; 21 – электродвигатель АИР100Д6У3; 22 – электродвигатель АИР63В4; 23 – насос Х1422М.

Рассмотрим подробно данную кинематическую схему. Труба крепится на борштангу, к концу которой закреплена раскатная головка 16. Концы трубы прижимают к гибочному ролику 15 с помощью эксцентрика 14. В таком состоянии установка готова к началу работы. Двигатель М1 посредством клиноременной передачи 3, червячного редуктора 6, муфты 7 и системы зубчатых передач 10-11, 12-13 передает крутящий момент на гибочный ролик 15.

Таким образом осуществляется продольное перемещение трубы. Двигатель М2 приводит во вращение шпиндельный узел, вращающий борштангу и инерционный нагружатель 19. Это обеспечивает вращение раскатной головки 16 и создание натяга. Двигатель М3 запускает насос 23, подающий в областьгиба охлаждающую жидкость.

Рассмотрим подробнее механизм создания натяга (рисунок 2), основными узлами которого являются: 1 – зажимной винт; 2 – раскатная головка; 3 – борштанга; 4 – шток; 5 – шкив; 6 – шпиндельный узел; 7 – рычаги; 8 – подвижная втулка; 9 – груз.

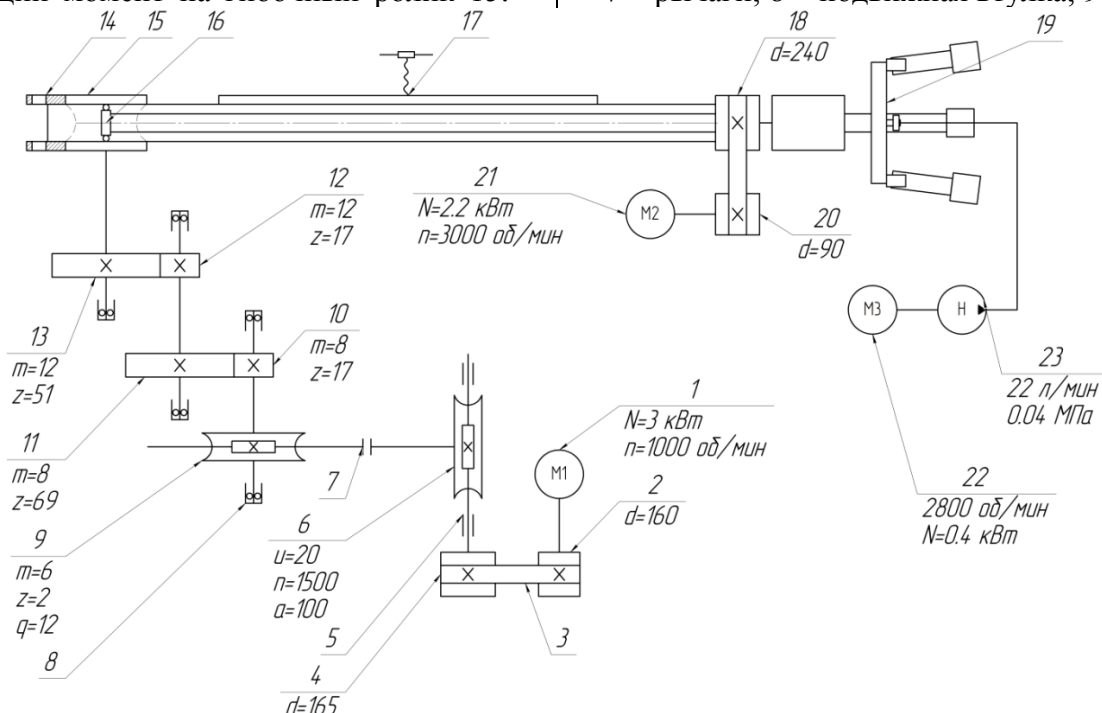


Рисунок 1. Кинематическая схема модернизированного трубогиба ИВ-3430

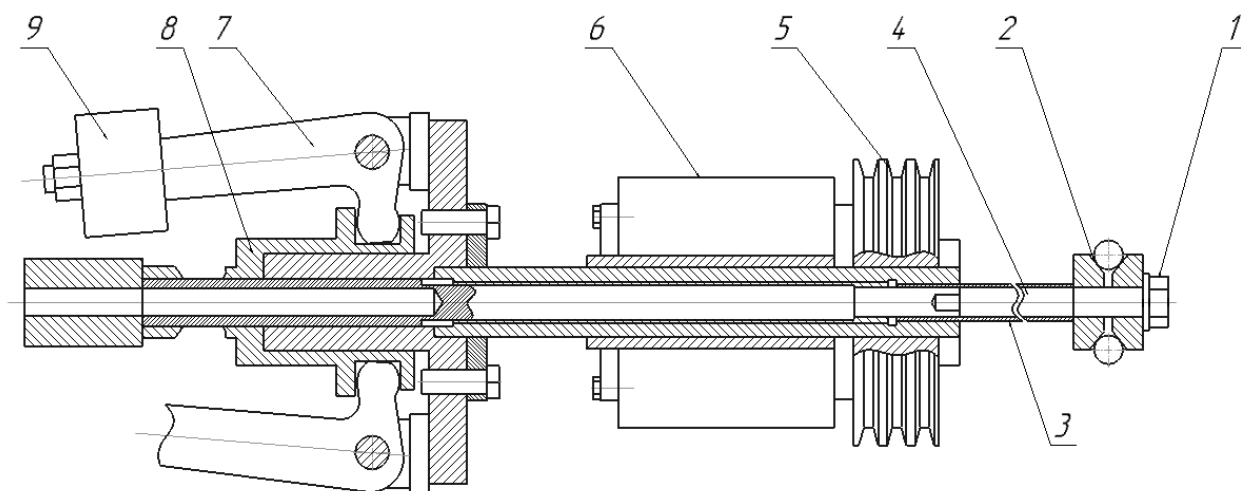


Рисунок 2. Инерционный нагружатель

Конструкция инерционного нагружателя состоит из рычагов 7, подвижной втулки 8 и груза 9. Втулка 8 соединена с подвижным штоком 4, который находится внутри борштанги 3. Также на борштанге закреплён шпindelный узел 6 со шкивом 5. На конце штока закреплена раскатная головка 2 и зажимной винт 1. При вращении борштанги двигателем М2 происходит разведение грузов 9 инерционного нагружателя в стороны. Рычаги 7 под действием сил инерции отводят в сторону втулку 8, которая перемещает в осевом направлении шток 4. При этом винт 1, закреплённый на конце штока, упирается в раскатную головку 2, создавая таким образом натяг.

На рисунке 3 представлена электрическая схема данного трубогиба: М1, М2 –

двигатели асинхронные; М3 – электронасос; КК1...КК3 – реле электротепловое; КМ1...КМ4 – магнитные пускатели; QF1 – выключатель автоматический; SB1...SB8 – кнопки пуска/останова. Запуск системы происходит замыканием QF1. Прямой и обратный ход трубы осуществляется двигателем М1 и кнопками SB1 и SB2 соответственно. Включение двигателя раскатки М2 происходит кнопкой SB5. Кнопка SB7 запускает двигатель М3, запускающий подачу жидкости в областьгиба. При необходимости остановки всех двигателей используется кнопка SB8. Защиту от перепадов напряжения, высоких токов нагрузки и т.п. осуществляют электротепловые реле и автоматический выключатель.

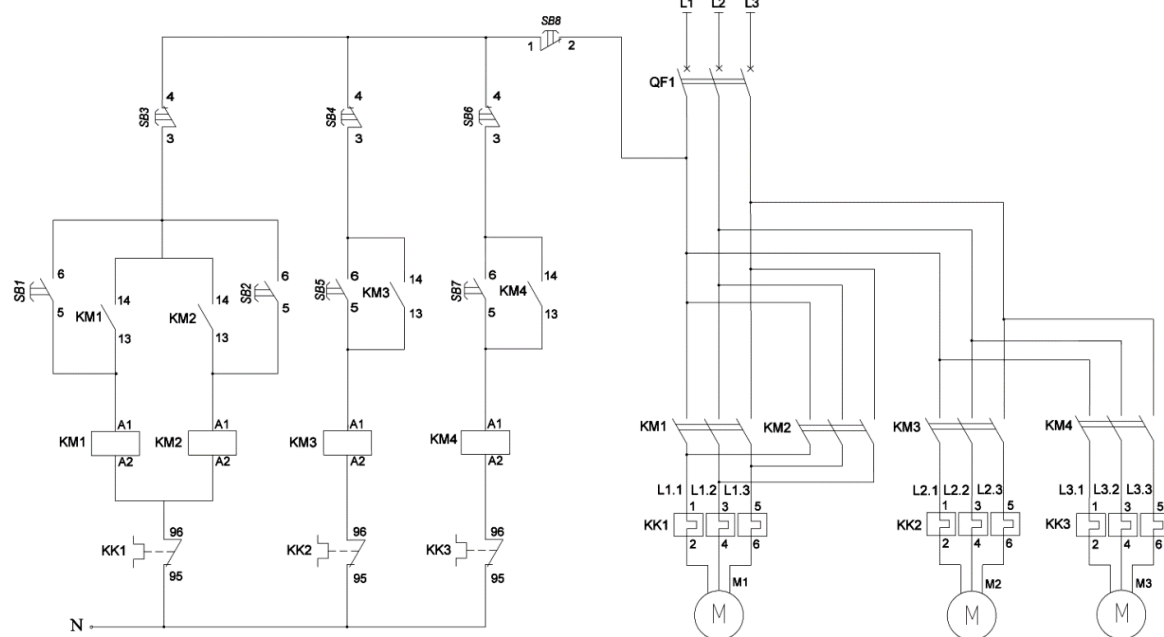


Рисунок 3. Электрическая схема трубогиба ИВ-3430

Многолетние испытания гибки труб методом раскатывания выявили ряд недостатков в приведенной системе управления [3]. Как видно из электрической схемы (рисунок 3), двигатели М1 и М2 работают не согласованно. Отсутствие регулировки времени выхода двигателей на максимальные обороты приводит к образованию на внутренней части трубы нежелательных уступов в начальный и конечный моменты временигиба (рисунок 4, 5). Данный дефект может негативно сказаться на эксплуатационных свойствах трубы, а также стать

причиной её разрушения в данных сечениях.

Также невозможность плавного пуска двигателей приводит к сокращению их срока службы. Ввиду отсутствия регулировки частоты вращения двигателей, гибка различных по толщине и диаметру труб осуществляется при одинаковых режимах работы.

Ряд перечисленных проблем можно решить путем совершенствования системы управления трубогибом, что позволит

упростить работу оператора, а также повысить точность и производительность гибки труб методом раскатывания. Для этого была разработана функциональная схема управления трубогибом (рисунок 6). Выделим главные функции системы управления:

1. Управление инерционным нагрузателем;
2. Прямой/обратный ход гибочного ролика;
3. Отображение и редактирование параметровгиба;
4. Контроль углагиба.

Преобразователи частоты устраняют выделенные проблемы, связанные с работой и регулировкой частоты вращения двигателей. Датчик угловых перемещений является высокоточным устройством, который работает напрямую с промышленным контроллером.

На рисунке 6 приведены следующие обозначения:

 – приборная панель оператора;  – персональный компьютер; ЭНК – датчик угловых перемещений (энкодер); БП – блок

питания; ПЛК – программируемый логический контроллер; М1 – привод механизма раскатки; М2 – привод механизма продольного перемещения трубы; ПЧ1/ПЧ2 – преобразователи частоты.



Рисунок 4. Дефект внутренней стороны трубы в началегиба



Рисунок 5. Дефект внутренней стороны трубы в концегиба

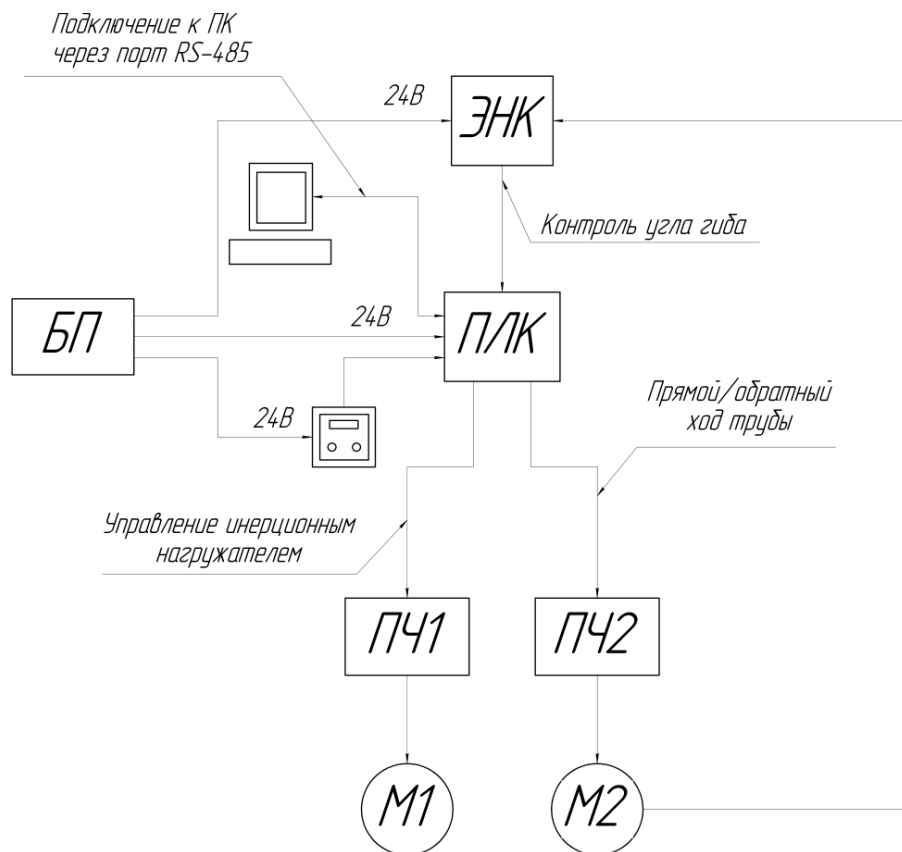


Рисунок 6. Функциональная схема системы управления трубогибом

Двигатели для плавного пуска, останова и регулирования частоты вращения подключены к преобразователям частоты. Ввод технических данных для гибки производится как с контроллера, так и с приборной панели оператора, подключенной к ПЛК.

Гибка начинается по нажатию кнопки «пуск» с панели оператора. Энкодер отправляет сигнал на ПЛК о начальном (нулевом) положении гибочного ролика. ПЛК отправляет сигнал на включение двигателей. В этот момент происходит гиб трубы. Данные об изменении положения гибочного ролика отправляются для сравнения с требуемым на ПЛК посредством обратной связи. При достижении требуемого углагиба, контроллер останавливает двигатели.

По нажатию кнопки «реверс» с панели оператора происходит отжим трубы двигателем М2 от гибочного ролика. Угол отжима является задаваемым параметром. При достижении этого угла происходит останов двигателя М2. Все изменяемые параметры отображаются на панели оператора.

Внедрение новых устройств в текущую систему управления приводит к изменению электрической схемы трубогиба. На основании функциональной схемы управления (рисунок 6), была разработана принципиальная электрическая схема (рисунок 7). Установленные ПЧ1 и ПЧ2 заменяют собой магнитные пускатели КМ1-КМ4 и защитные теплореле КК1-КК3 для двигателей, что повышает надежность системы в целом.

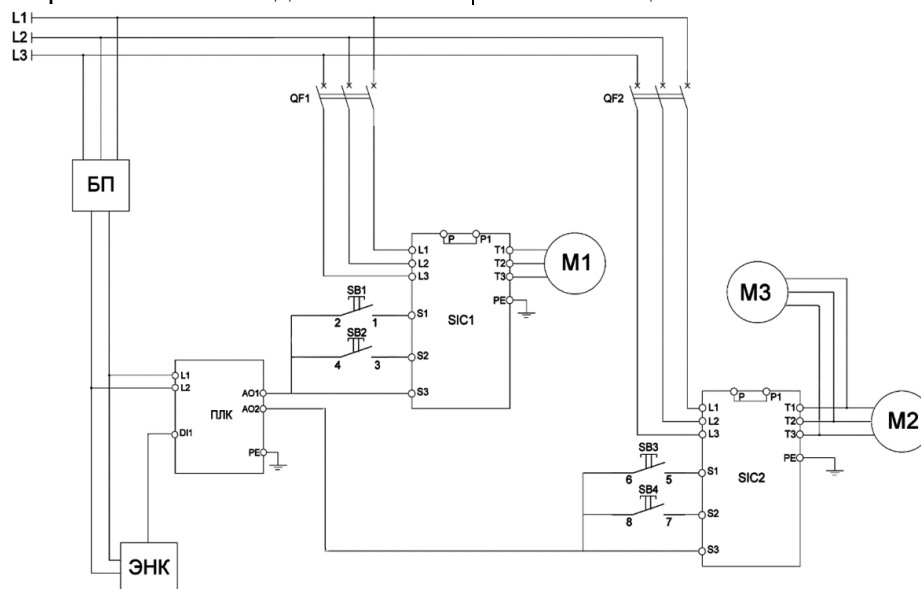


Рисунок 7. Схема электрическая принципиальная

На рисунке 7 приведены следующие условные обозначения:

М1 – двигатель гибочного ролика; М2 – двигатель раскатной головки; М3 – двигатель подачи охлаждающей жидкости; QF1/QF2 – автоматические выключатели; SB1/SB3 – кнопки пуска и останова; SB2/SB4 – кнопки реверса и останова; SIC1/SIC2 – преобразователи частоты; ПЛК – программируемый логический контроллер; ЭНК – датчик угла поворота; БП – блок питания.

Составление алгоритма работы системы является важной задачей, позволяю-

щей подробно раскрыть логику работы разрабатываемой системы. Необходимо учесть такие параметры, как считывание углагиба с момента последней работы трубогиба, угол догиба и реверс двигателей для отжима трубы. Эти значения необходимо отслеживать оператору, а также при необходимости изменять перед следующей гибкой труб. Подробный алгоритм работы трубогиба представлен на рисунке 8.

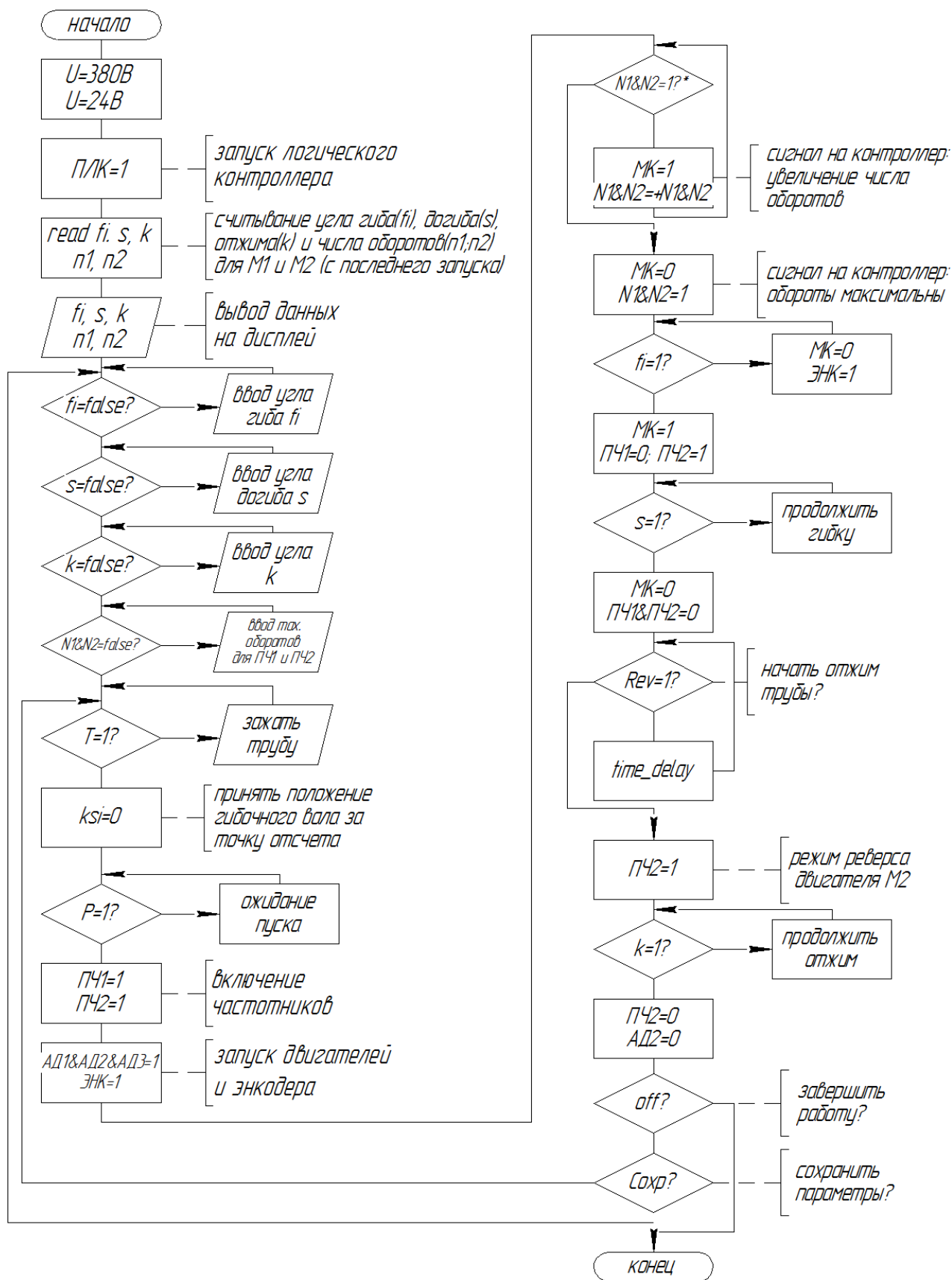


Рисунок 8. Алгоритм работы трубогиба

По алгоритму разработана циклограмма работы трубогиба, представленная на рисунке 9. Цикл гибки трубы можно условно разделить на три временные группы: 1 – закрепление трубы; 2 – гибка трубы; 3 – снятие трубы. На участке 1 происходит загрузка трубы. В этот момент подается питание и включается ПЛК. На участке 2-3 происходит закрепление трубы с помощью зажимного механизма. Этот процесс занимает длительное время, т.к. возникает необходимость в точном позиционировании трубы на раскатной головке. На участке 4 происходит плавный пуск двигателей раскатной головки и гибочного вала от ПЧ. Также включается датчик угла поворота, который передает информацию о положении гибочного вала на ПЛК. Участок 5-6 представляет собой прямой рабочий ход. На этом этапе происходит гибка

трубы гибочным роликом. На участке 7 показан плавный останов рабочего хода. Трубу на участке 8 перед обратным ходом необходимо немного отжать. В противном случае снять трубу будет проблематично ввиду нагрузок, которые труба оказывает на механизм зажима. На участках 9-11 показан обратный ход и плавный останов двигателя гибочного ролика. Данный процесс занимает продолжительное время ввиду невысоких оборотов гибочного вала. После полной остановки происходит окончательный отжим трубы (участок 12). На участке 13 происходит снятие готовой трубы и трубогиб переходит в режим ожидания, который показан на участке 14.

Общее время работы составляет 8 минут 30 секунд и может варьироваться в зависимости от параметров трубы, технических требований, а также профессиональных навыков и опыта оператора.

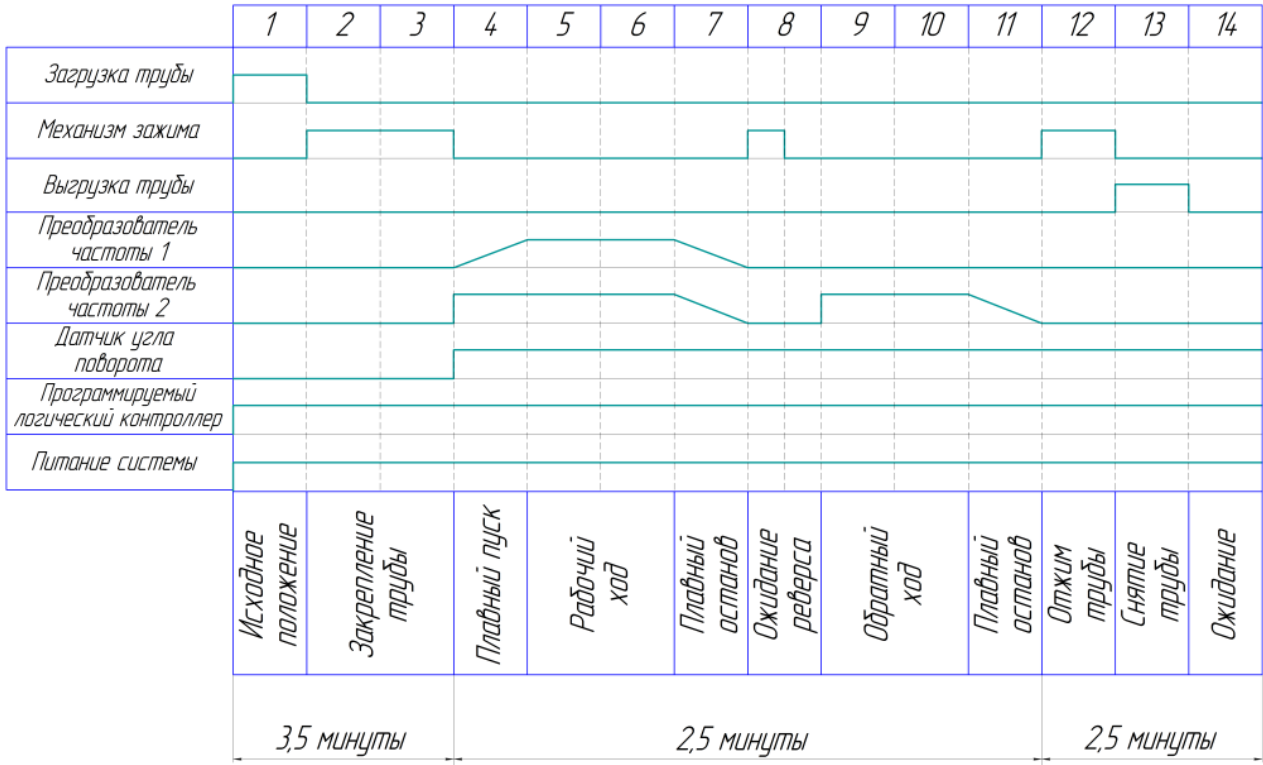


Рисунок 9. Циклограмма работы трубогиба ИВ-3430

Заключение

В настоящее время реализовано векторное частотное управление асинхронными двигателями. Модернизированный трубогиб внедрён в производство. Была произведена гибка

опытной партии труб диаметром 52×5 мм из стали марки 12Х18Н10Т (рисунок 10) и диаметром 108×5 мм из стали марки 20. Удалось добиться плавного перехода на внутренней стороне трубы.



Рисунок 10. Фото продольного сечения изогнутой трубы из стали марки 12Х18Н10Т

Библиографический список

1. Патент 818 707 РФ МКИ В 21D 9/14. Способ гибки труб С.Г. Лакирев, Я.М.Хилькевич (РФ), №2713945/25; Оpubл. 07.04.81. бюл. №13
2. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 169 с.
3. Козлов, А.В. Разработка оборудования для холодной гибки труб с раскатыванием / А.В. Козлов // Вестник МГТУ им. Носова. –2010. – № 1. – С. 50–51.
4. Козлов, А.В. Опыт гибки тонкостенных труб в холодном состоянии / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов, Я.М. Хилькевич // Технология машиностроения. –2008. –№ 10. – С. 21–22.
5. Козлов, А.В. Контроль состояния материала труб при гибке с раскатыванием / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 11. – С.49–53.

Information about the paper in English

A.V. Kozlov, A.S. Vereshchagin

The Zlatoust Branch of the South Ural State University,
Zlatoust, Russia

E-mail: vladi@tut.by

Received 17.04.2018

DESIGNING A PIPE BENDER CONTROL SYSTEM

Abstract

Serial pipe bender IV-3430 for pipe cold bending by rolling was modernized. When conducting production tests of the modernized pipe bender, we revealed some faults in an existing pipe bender control system, affecting the quality of pipe bending. To eliminate such faults and expand technological capabilities of the machine, such system was upgraded with modern electronic devices. An HMI was introduced for an operator's convenience. Basic diagrams and a cyclogram of the pipe bender were developed. The paper contains results of tests of the modernized control system, showing feasibility of such developed system.

Keywords: upgrading, control, pipe bender, rolling, modernization



УДК 621.98.044.7

А.М. Милюкова, А.И. Горчанин,

Н.В. Бурносков, Г.П. Горецкий

Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт НАН Беларуси»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: annart@mail.ru

Дата поступления 19.03.2018

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ, УПРОЧНЁННЫХ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Аннотация

С целью повышения износостойкости и качества сложнопрофильных ножей для резки сахарной свеклы применен новый метод магнитно-импульсной обработки (МИО). Проведены их испытания в условиях производства на ОАО «Скидельский сахарный комбинат». Металлографические и дюрOMETрические исследования образцов ножей после комбинированной магнитно-импульсной обработки и испытаний показали, что этот метод позволил за счет улучшения микроструктуры поверхностного слоя повысить период стойкости в 1,8 раза. Выявлены режимы МИО, при которых снижается шероховатость упрочняемых рабочих поверхностей ножей, что повышает качественные характеристики свекольной стружки.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, образцы ножей, микроструктура, микротвердость, шероховатость, качество поверхности, режимы упрочнения.

Введение

Условия работы режущих инструментов обрабатывающих машин весьма разнообразны и в каждом конкретном случае зависят от множества факторов, которые можно классифицировать по технологическим признакам: факторы, зависящие от характеристик и свойств обрабатываемого материала; факторы, относящиеся к режущему инструменту, и режимы обработки, обеспечивающие необходимые требования к показателям выпускаемой продукции. Основное требование к режущим инструментам — это обеспечение их высокой работоспособности.

Факторы, характеризующие физико-механические и другие свойства обрабатываемого материала, достаточно стабильны, специфичны каждому виду производства и практически изначально заданы. Режимы обработки оптимизируются, задаются и обеспечиваются техническими характеристиками оборудования и инструментов в зависимости от требуемых параметров продукции и экономических показателей производств [1–3].

Наиболее значимые и разнообразные факторы, обеспечивающие высокоэффективные экономические показатели процессов обработки, относятся к режущим инструментам. Зачастую это факторы взаимовлияющие, например, высокая твердость инструментов, как правило, повышает их хрупкость и снижает способность выдерживать динамические нагрузки [4, 5].

В целом все элементы резцов имеют определенные требования в совокупности, обеспечивающие их длительную работоспособность. Режущая кромка — наиболее важный элемент, влияющий на все основные показатели процесса обработки (качественные и экономические). Режущая кромка образуется рабочими поверхностями инструмента, формируя заданный ею профиль свойства, которые и обеспечивают стабильность характеристик процесса резания во времени.

Заданные свойства рабочих поверхностей в основном зависят от материала инструментальных сталей, разнообразие которых весьма значительно. Существующие технологии изготовления инструментов ис-

пользуют разнообразные способы, повышающие прочность и износостойкость рабочих поверхностей. Кроме этого, качество и шероховатость поверхности должны быть достаточно высокими, так как стружка при движении не должна создавать значительного трения и интенсифицировать процесс износа инструментов, а при получении стружки-продукта не должны ухудшаться ее качественные характеристики.

В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработали и применили технологию упрочнения МИО с целью повышения износостойкости сложнопрофильных ножей немецкой фирмы «Putsch» для резки сахарной свеклы (рисунок 1) [6 - 8].

Эти ножи сложной конструкции с зигзагообразной режущей кромкой изготавливают путем фрезерования или штамповки заготовок из углеродистых и инструментальных сталей. Режущие свойства ножей восстанавливают до 5 раз на специальных правильных и заточных станках, что продлевает их временной ресурс эксплуатации.



Рисунок 1. Нож для резки сахарной свеклы

При определенных режимах воздействия импульсного магнитного поля на токопроводящий металл изделия устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла, что обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, столь необходимые для повышения работоспособности металлических изделий [9].

Учитывая вышесказанное и специфику переработки сахарной свеклы на стружку-продукт, рассмотрим возможности усовершенствования процесса подго-

товки сложнопрофильных режущих инструментов, повышающих их работоспособность на основе упрочнения и уменьшения шероховатости методом МИО.

Цель настоящего исследования заключалась в определении влияния МИО на микроструктуру, твердость, качество поверхности и работоспособность свеклорезных ножей.

Предметом исследования являлись ножи для резки сахарной свеклы, используемые на ОАО «Скидельский сахарный комбинат» [10].

Методы исследования

Для проведения исследований разработана, изготовлена и испытана новая технологическая оснастка для магнитно-импульсных установок, изготовленных в Физико-техническом институте НАН Беларуси (рисунок 2).

Проведена МИО с целью определения оптимального режима на специальных установках МИУ-2 и МИУ-3 в цилиндрическом и на плоском индукторах (рисунок 3).

Обработка ножей проводилась по режимам, отличающимся применяемыми индукторами (рисунок 3) и энергией воздействия электромагнитного поля от 6 до 8 кДж.



Рисунок 2. Магнитно-импульсные установки МИУ-2 и МИУ-3

Комплексная МИО свеклорезных ножей последовательно в цилиндрическом и на плоском индукторах упрочняет не только края режущей кромки лезвий ножа, но и граней, на которых формируются эти лезвия, что обеспечивает сохранение после переточки модифицированной микроструктуры поверхностного слоя.

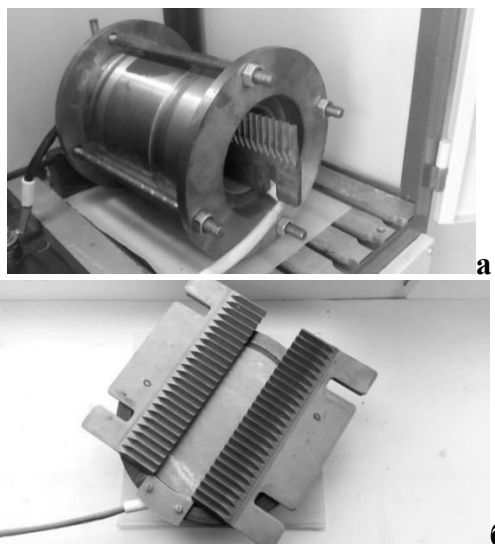


Рисунок 3. Внешний вид использованных индукционных систем:

а – цилиндрический индуктор;
б – плоский индуктор

Опытную парию упрочненных ножей установили в едином комплекте в соответствии с техническими характеристиками свеклорезной машины марки «Putsch» (Германия) в цехе резки свеклы ОАО «Скидельский сахарный комбинат» (Беларусь). В соответствии с техническим регламентом технологического процесса проводился постоянный контроль качества свекольной стружки. При достижении предельно допустимых параметров свекольной стружки ножи подлежали замене.

Ножи, прошедшие производственные испытания, подвергли лабораторным исследованиям. Были изготовлены образцы для измерения микротвердости поверхностного слоя, шероховатости, проведения металлографических исследований. Приготовление шлифов и металлографические исследования микроструктуры, а также дюрометрический анализ проводились по известным методикам [11–12].

При выполнении лабораторных исследований применяли следующие технические средства: микротвердомер ПМТ-3 для измерения микротвердости поверхностного слоя шлифов; металлографический комплекс МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М, для измерения шероховатости использовался профилометр цеховой с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем, модель 296.

Основные положения

К упрочнению поверхности стальных изделий под воздействием магнитного импульса, кроме деформаций, приводящих к уплотнению структуры вблизи поверхности, относятся также явления фазовых превращений аустенит – мартенсит, миграции примесей и дефектов вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности заготовки, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита. Осуществление этих процессов непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов и магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [13].

Известно, что прочностные свойства стальных изделий не зависят линейно от твердости и во многом определяются микроструктурой стали [14]. После МИО были проведены металлографические исследования образцов, результаты которых представлены на рисунке 4.

После комбинированной МИО при самом эффективном режиме поверхностный слой исследуемых ножей приобрел однородную мелкозернистую структуру троосто-сорбита с упрочненным поверхностным слоем глубиной 40–60 мкм (рисунок 5). Как видно из рисунка 5, создана градиентная структура с упрочнением лишь поверхности рабочих режущих кромок, а сердцевина ножа сохранила свои свойства с бейнитно-трооститной структурой. Такая структура обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, необходимые для ножей, работающих в условиях циклических ударных нагрузок [15].

Микроструктура режущих кромок ножей для резки свеклы после производственных испытаний представлена на рисунке 6. Как видно из рисунка 6 поверхностный слой упрочненного ножа подвергся износу в процессе испытаний в малой степени, что свидетельствует о повышении износостойкости режущей кромки.

Проведено измерение твердости ножа в разрезе. Результаты измерения представлены на рисунке 7.

Твердость материала ножа (аналога стали 38ХГНМ) на державке составляет 20 HRC, а на лезвии – 37–40 HRC, что свидетельствует о том, что нож прошел индукционную закалку только в области режущей кромки лезвия. На рисунке 7 пунктирной линией показана твердость ножа до МИО, а сплошной – повышенная твердость после упрочнения комбинированной МИО. Определены технологические режимы МИО, при которых повышается качество упрочняемых рабочих поверхностей ножей, снижается их шероховатость. Была проведена серия экспериментов по установлению влияния энергетических режимов на показатели качества поверхности. Результаты приведены в таблице 1.

Установлено, что при режиме 1 шероховатость уменьшается на 19,2 %. Улучшение показателей шероховатости поверхности ножей способствует повышению качества свекольной стружки и производительности свеклорезного оборудования.

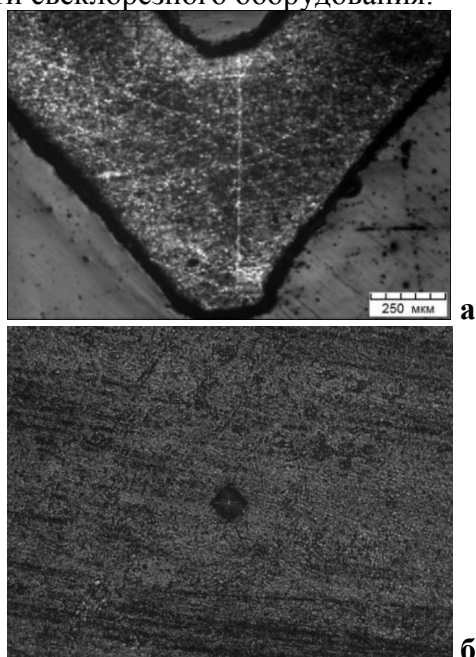


Рисунок 4. Микроструктура свеклорезного ножа после МИО:

- а* – профиль со светлым поверхностным слоем, образовавшимся после МИО,
- б* – сердцевина ножа после измерения твердости

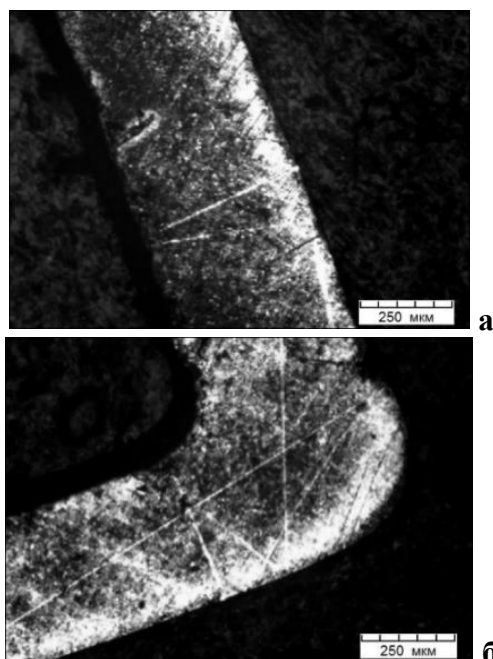


Рисунок 5. Микроструктура ножа для резки свеклы после МИО до испытаний:

- а* – грань режущей кромки ножа;
- б* – вершина рифления режущей кромки ножа

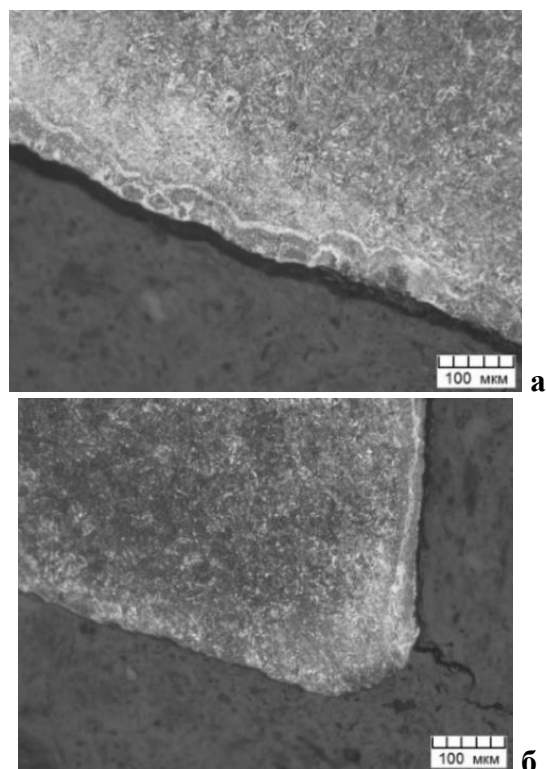


Рисунок 6. Микроструктура образцов ножей, упрочненных МИО, после испытаний:

- а* – грань режущей кромки ножа;
- б* – вершина рифления режущей кромки ножа

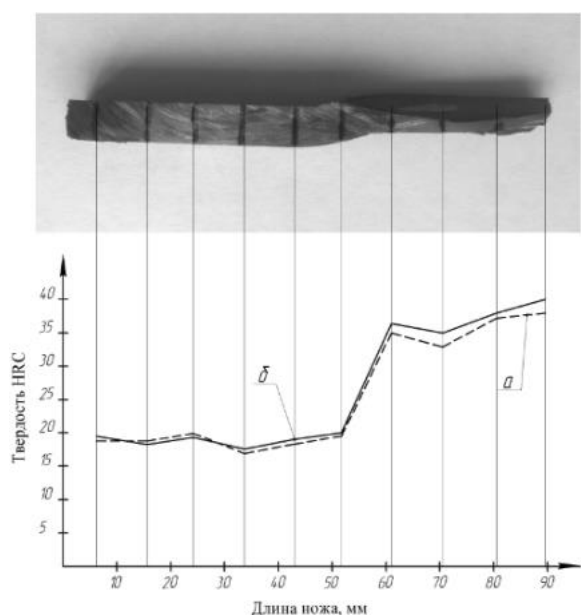


Рисунок 7. Изменение твердости ножа до (а) и после комбинированной МИО (б)

Производственные испытания упрочненных МИО ножей показали увеличение периода работоспособности в 1,8 раза по сравнению с неупрочненными ножами. Таким образом, результаты испытаний немецких свеклорезных ножей в производственных условиях показали эффективность разработанной упрочняющей технологии МИО и возможность значительно увеличить их работоспособность.

Таблица 1

Результаты исследования изменения шероховатости поверхности ножей при МИО

№ образца	Режим	Шероховатость, мкм		% изменения
		До МИО	После МИО	
1	Режим 1	1,47	1,19	19,2
2	Режим 2	1,48	1,29	12,8
3	Режим 3	1,38	1,19	14,2
4	Режим 4	1,36	1,34	8,4
5	Режим 5	1,42	1,31	8,8

Выводы

Методом комбинированной магнитно-импульсной обработки была упрочнена опытная партия стальных свеклорезных ножей с режущей кромкой сложного

зигзагообразного профиля с улучшением качества поверхности и без изменения их геометрических параметров.

Изучено изменение микроструктуры ножей после МИО при различных режимах, заключающиеся в формировании поверхностного слоя глубиной 40–60 мкм с мелкозернистой и однородной трооститно-сорбитной структурой, при этом происходит повышение показателя шероховатости поверхности до 19,2%.

Установлено увеличение периода работоспособности упрочненных ножей в 1,8 раза, что позволяет рекомендовать применение упрочняющей МИО для инструмента сложного профиля на предприятиях сахарной отрасли пищевой промышленности.

Такая технология позволит снизить потребность в закупках импортных ножей и повысить экономические показатели производства.

Библиографический список

1. Боровский Г.В., Григорьев С.Н. Справочник инструментальщика / под общей ред. А.Р. Маслова. — 2-е изд., испр. — М.: Машиностроение, 2007. — 464 с.
2. Звягольский, Ю. С. Технология производства режущего инструмента: учебное пособие для вузов / Ю. С. Звягольский, В. Г. Солоненко, А. Г. Схиртладзе. — Москва: Высшая школа, 2010. — 334 с.
3. Баршай, И. Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом. — Минск: УП «Технопринт», 2003. — 244 с.
4. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин — Минск, 1998.
5. Ящерицин, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков — Минск, 1977.
6. Алифанов, А.В. Повышение износостойкости ножей для резки сахарной свеклы методами высокоэнергетической обработки / А.В. Алифанов, [и др.]

- // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14-16 сентября 2016 г. В 3 кн. / 2 кн. – 2016. – Мн.: ФТИ НАН Беларуси. – С. 4–10.
7. Горчанин, А.И. Влияние магнитно-импульсной обработки на структуру и свойства сложнопрофильного режущего инструмента / А.И. Горчанин, А.М. Милюкова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13-15 сентября 2017 г. В 3 кн. / 2 кн. – 2017. – Мн.: ФТИ НАН Беларуси. – С. 48-53.
 8. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А.М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2017 г. — Гл. 13.– С. 31-52.
 9. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. – М.: Машиностроение, 1998. – 130 с.
 10. Стандарт СЭВ 4399-83. Ножи свекло-резные. Основные размеры, технические требования. – Введ. 01.12.1983. – Дрезден.: Издательство стандартов, 1983. – 5 с.
 11. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справ. изд. / Л.В. Баранова, Л.М. Демина – М.: Металлургия, 1986.– 256 с.
 12. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: ГОСТ 9013-59.– Введ. 01.01.1969. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. – 11 с.
 13. Алифанов, А.В. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А.В. Алифанов, Д.А. Ционенко, А.М. Милюкова, Н.М. Ционенко // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — №4. — С. 31–36.
 14. Металловедение. Сталь: Справочник: в 2т. / В. Енике, В. Даль, Г.Ф. Кленер и др.: Перевод с немецкого. Москва: Металлургия, 1995.
 15. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

Information about the paper in English

A.M. Milyukova, A.I. Gorchanin, N.V. Burnosov, G.P. Goretsky
 The Physics and Technology Institute of the
 National Academy of Sciences of Belarus,
 Minsk, Belarus
 E-mail: annart@mail.ru
 Received 19.03.2018

IMPROVING THE PERFORMANCE OF STEEL CUTTING TOOLS OF COMPLEX PROFILE, STRENGTHENED WITH A COMBINED MAGNETIC-PULSE PROCESSING

Abstract

To improve the wear resistance and quality of complex knives for cutting sugar beet, a new method of magnetic pulse treatment (MPT) has been applied. They were tested in production conditions at JSC Skidelsky Sugar Refinery. Metal-graphical and durometric studies of knife samples after combined magnetic pulse treatment and testing showed that this method made it possible to increase the durability period 1.8 times due to the improvement of the microstructure of the surface layer. The MPT regimes are revealed under which the roughness of the hardened working surfaces of the knives is reduced, which increases the quality characteristics of the beet chips.

Keywords: magnetic pulse treatment, knife samples, microstructure, microhardness, roughness, surface quality, hardening modes.



УДК 519.248: 621.771.23

**М.З. Певзнер, В.А. Жуйков,
К.В. Иванов-Польский,
Е.А. Куимов, В.Д. Перовощиков**
ФГБОУ ВО «Вятский государственный
университет»,
г. Киров, Российская Федерация
E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru
Дата поступления 18.03.2018

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ СБОРА, ХРАНЕНИЯ, СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОКАТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ НА ПРЕДПРИЯТИИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация

Представлены результаты внедрения системы контроля и управления прокатным производством и рассмотрены возможные пути дальнейшего совершенствования статистического менеджмента качества. Для эффективного оперативного управления в режиме online предложена модернизация используемых контрольных карт и создание интегрированной автоматической системы регулирования толщины, основывающейся на результатах статистического контроля качества. Оцениваются возможности использования инструментов анализа временных рядов и нейронных сетей, предлагаемых современными статистическими программами, для межоперационного менеджмента качества.

Ключевые слова: производство проката, менеджмент качества, мониторинг непрерывного процесса, контрольная карта, статистическое управление.

Введение

Непрерывность современного металлургического производства с одной стороны затрудняет контроль процесса и управление им в ходе обработки, с другой - делает их особо актуальными. Действительно, оперативное online управление невозможно без непрерывного контроля движущегося материала, который, в свою очередь, достаточно сложно организовать [1]. Впрочем, в отличие от других характеристик качества, толщину проката уже достаточно давно непрерывно контролируют рентгеновскими, контактными и т.п. толщиномерами. Задача состояла в организации наиболее эффективного статистического управления процессами (SPC) прокатки. Первоначально контрольные карты (КК), осуществляющие статистический

контроль и управление качеством в прокатном производстве на Кировском заводе ОЦМ, строились автоматически в рамках программы Excel, но такая система имела существенные недостатки [2]. В настоящей работе представлены результаты внедрения в прокатном цеху предприятия¹ специализированной локальной сети сбора, хранения, статистической обработки и представления информации и обсуждаются возможности её дальнейшего развития. Она разрабатывалась² при нашем участии, в частности, в организации статистического контроля и управления.

Результаты внедрения системы

Система формирует широкую базу данных в виде временных рядов (ВР) входной и выходной толщины ленты, управляющих сигналов и всех основных энергосиловых и скоростных параметров прокатки

¹ В работе участвовали С.Н. Счастливцев, М.В. Ральникова, А.А. Созонтов, А.В. Колышницын, С.Н. Поляев, А.Л. Земцова и др.

² Программное обеспечение ООО «ПП Экон», г. Кирово-Чепецк, программисты А.В. Пьянков, С.Н. Жёлобов.

при обработке каждого рулона ленты на каждом проходе и имеет трёхуровневую структуру (рисунок 1):

- нижний уровень - автоматизированные рабочие места оперативного персонала, осуществляющие контроль и управление технологическими процессами, на базе персональных компьютеров (технологические компьютеры);
- средний уровень - выделенный сервер баз данных и программное обеспечение сбора информации с рабочих станций;
- верхний уровень - автоматизированные рабочие места технологического, эксплуатационного и административного персонала («пользователь») на базе персональных компьютеров, работающих под управлением операционной системы Windows, находящихся во внутризаводской сети и подключенных к выделенному серверу [3, 4, 5].

Таким образом, система позволяет непрерывно контролировать процесс производства, в частности, выводить информацию о процессе прокатки прямо на ПК технологов, исследователей, руководителей и других ИТР.

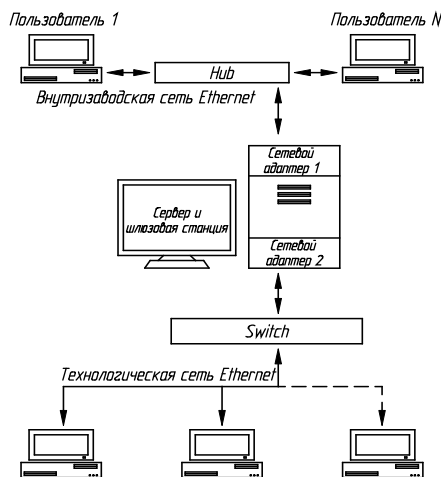


Рисунок 1. Структура системы

После окончания каждого прохода реверсивного стана горячей прокатки (наряду с данными о нагреве и обработке слитков с пирометров Raytek 1 и 2) производится передача информации в заводскую базу данных на сервер (рисунок 2), к которому имеют доступ пользователи внутризаводской сети. Аналогично, технологические рабочие станции станов холодной прокатки осуществляют сбор информации о резуль-

татах прокатки с объектов управления и сохранение её на жёстком магнитном носителе в виде отдельных бинарных или текстовых файлов.

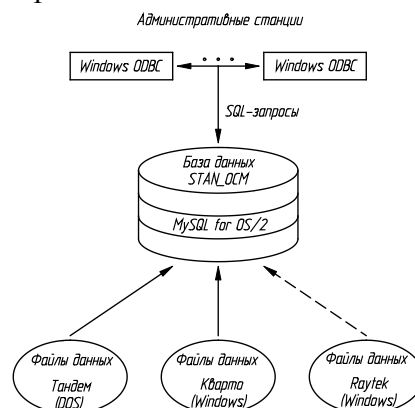


Рисунок 2. Информационные потоки системы

Методическая печь газового нагрева слитков работает не совсем в методическом режиме: имеются периоды подогрева слитков, когда реверсивный стан горячей прокатки не работает. Поэтому особенно важно следить за температурным режимом, как нагрева слитков, так и горячей прокатки во времени (горизонтальная шкала графиков на рисунке 3).

Пунктом «Просмотр» главного меню открывается вся основная информация базы данных, получаемых со станов холодной прокатки, включая текущий и ежедневные списки прокатанных рулонов с разграничением по времени обработки и сплавам (рисунок 4).

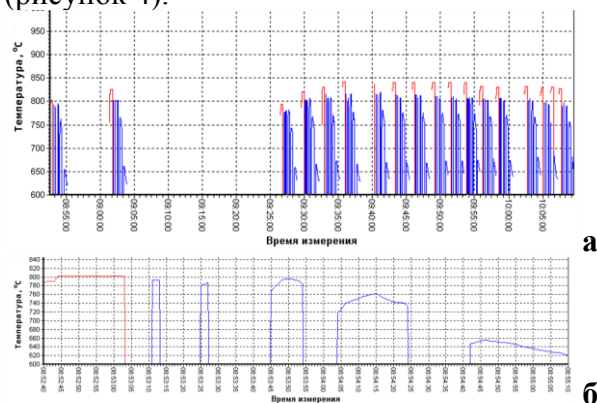


Рисунок 3. Температурный график последовательного по времени нагрева (красный цвет) и горячей прокатки по проходам (синий цвет) находящейся одновременно в печи партии слитков (а) и в развернутом виде - отдельного слитка (б)

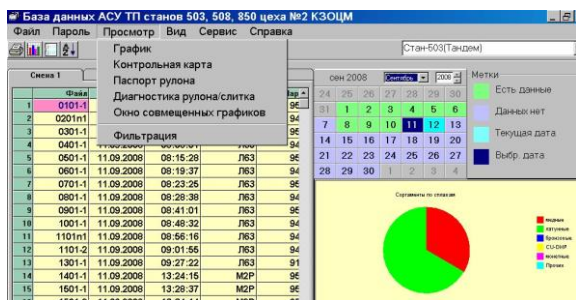


Рисунок 4. Меню программы на фоне списка прокатанных рулонов

Подпункт меню «график» позволяет получать графики изменения по длине рулона каждого из 16 непрерывно контролируемых параметров прокатки, в частности, толщины ленты. Подпункт «диагностика рулона» открывает таблицу, столбцами которой являются все измеряемые параметры собственно прокатки и автоматической системы регулирования толщины (АСРТ), а строками – результаты последовательных измерений их значений, начальные значения которых (обычно число строк доходит до нескольких тысяч) представлены в таблице 1. С его помощью можно экспортировать («файл» - «экспорт») всю таблицу или её отдельные столбцы во внешние пакеты, предназначенные для работы с табличными данными (Excel, Statistica и т.д.).

Подпункт меню «окно совмещённых графиков» (см. рисунок 4) позволяет сравнивать до 5 графиков, например, разнотолщинности рулонов различных партий, выбирая лучший технологический вариант, или одного рулона по проходам, контролируя, например, уменьшение или увеличение разнотолщинности от прохода к проходу. Для удобства анализа изменения характеристики качества по проходам в меню «Сервис» панели «Совмещённые графики» (рисунок 5) имеется опция «Развернуть график». Она позволяет делать начало графика его концом и наоборот (что фактически и происходит при реверсивной прокатке) и тем самым облегчает сравнение графиков, например, при анализе изменения разнотолщинности по проходам.

При выборе подпункта главного меню «Контрольная карта» (см. рисунок 4) КК строится автоматически на основе таблицы из 25 выборок, взятых равномерно по длине

ленты (рисунок 6). Число строк этой таблицы равно «кол-во измерений в выборке» + 2, т.к. в предпоследнюю строку выводятся средние по выборке значения, а в последнюю строку таблицы выводятся размахи выборок. Задаваемое одинаковое количество измерений с начала и конца рулона («Нач № изм»), которые, как правило, не предъявляются при приёмке готовой продукции, исключается из рассмотрения. Автоматически рассчитывается:

- «шаг», определяющий распределение выборок в ряду измеренных значений толщины, из общего количества измерений (N) по формуле;

$$\text{«шаг»} = (N - 2 * \text{«Нач № изм»}) / 25$$

- среднее значение и размах каждой выборки;

- общая средняя (СРД), верхняя (ВКГ) и нижняя (НКГ) контрольные границы (границы регулирования) по известным формулам [6-9] с нанесением их на график (см. рисунок 6).

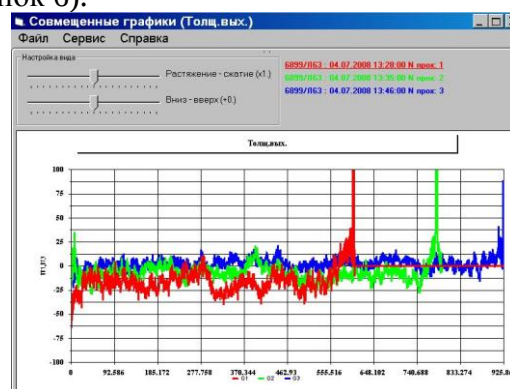


Рисунок 5. Пример использования инструмента «Окно совмещённых графиков»: последовательное изменение от прохода к проходу разнотолщинности ленты латуни Л63 при прокатке с 1,45 до 0,77 мм

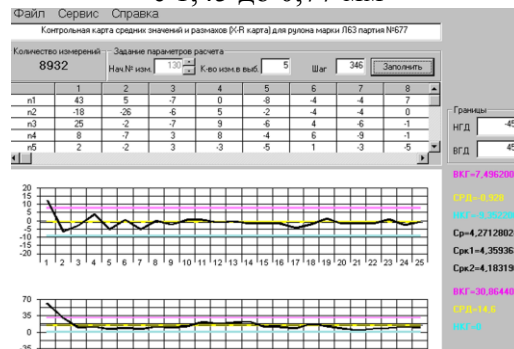


Рисунок 6. Фрагмент таблицы выборок и строящаяся на её основе контрольная карта Шухарта средних значений и размахов

Таблица 1

Фрагмент результатов измерений, полученных при прокатке ленты из латуни Л68 (партия 10320) с 1200 мкм до 959 мкм.

Показания толщиномеров на входе dH и выходе dh		Текущее положение ближнего, Нбт и дальнего, Ндт гидроцилиндра, мкм		Усилия ближнего Р1 и дальнего Р2 гидроцилиндра, т		Сигнал-управление АСРТ, регулирование по возмущению, dS1 и по отклонению, dS2, мкм		Управление сервоклапанами, УМ1 и УМ2		Задание положения ближнего, Нбз и дальнего, Ндз гидроцилиндра		Скорость прокатки, мм/сек SPEED	Натяжение левой (Т_1) и правой (Т_2) моталки	
0	-10	11804	9917	132	166	1	-6	2190	2087	11803	9915	601	770	8110
3	-7	11803	9919	142	167	1	-6	2088	2087	11806	9918	601	770	8110
5	-8	11807	9922	147	168	-1	-6	2118	2077	11809	9921	601	770	8110
8	-5	11809	9922	143	172	-6	-6	2067	1986	11814	9926	601	770	8110
7	-4	11815	9926	145	171	-9	-6	2190	2047	11814	9926	601	770	8120

Здесь рассчитывается индекс воспроизводимости процесса (считается, что процесс находится в состоянии статистической управляемости) CP [10], характеризующий, степень рассеяния («изменчивость процесса») относительно ширины допуска. Также рассчитываются нижний и верхний индексы воспроизводимости C_{pkL} и C_{pkU} [10] для заданных нижней и верхней границ поля допуска (НГД и ВГД), которые у нас обозначаются C_{pk1} и C_{pk2} (см. рисунок 6), характеризующие точность настройки.

Обсуждение перспектив развития системы

В целом внедрённая система решает задачу управления процессом и анализа его результатов. Но отбор контролируемых данных, их статистический анализ и представление, в частности, в виде КК, по нашему мнению, нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Так, таблица из 25 выборок формируется независимо от типа прокатного стана (заготовительного или для окончательной прокатки), длины прокатываемого рулона и длины сформировавшегося ряда наблюдений, которые могут различаться в десятки раз. Известно, что используемая здесь «механическая» выборка менее репрезентативна, чем, например, случайная [11]. Кроме того в этом случае нет гарантии исключения серьёзной систематической погрешности, если значения толщины рассматриваемого проката будут изменяться с той же периодичностью, что и отбор элементов в выборку. Наконец, раз-

мах далеко не самая эффективная характеристика степени рассеяния случайной величины [11]. Такого рода недостаточный обоснованный подход к выборочному контролю не позволяет в полной мере учитывать особенности производства конкретного проката, например, наличие сварных швов с заведомо выпадающими значениями толщины. Представление результатов также нуждается в совершенствовании. Например, КК строится уже после завершения прохода прокатки, а на пульте оператора отражается лишь график значений непрерывно контролируемой толщины. Между тем, в первую очередь именно оператору стана важно видеть контрольные («предупреждающие») границы, свойственные КК Шухарта [6, 7]. Инструмент «окно совмещённых графиков» (см. рисунок 4) позволяет сравнивать графики только по одному параметру, например, «толщина выходная» (см. рисунок 5) и только для одного прокатного стана. Между тем, для выбора наиболее оптимальной технологической схемы целесообразно сравнивать результаты прокатки на различных станах, а для анализа влияния различных технологических параметров на колебания толщины необходимо сравнивать графики по различным параметрам. Остаётся неисследованной в достаточной степени возможность привлечения к анализу получаемых данных также современных статистических программных средств, например, наиболее успешный, на наш взгляд, пакет STATISTICA [12]. Нако-

нец, классические материалы по промышленной статистике [8-9] не учитывают ряда специфических особенностей непрерывного прокатного производства [13] и прогресса в вычислительной технике, произошедшего в последнее время. Например, особенностью современной прокатки полос и лент является непрерывный контроль их толщины [3-5], а возможности вычислительной техники в настоящее время позволяют оперативно обрабатывать данные практически любого объёма. Возникает вопрос: всегда ли стоит сужать объём обрабатываемой информации от генеральной совокупности до выборок, пусть даже самых репрезентативных, а не использовать все возможности анализа формирующихся полномасштабных ВР [14, 15]?

Известно деление инструментов «обеспечения результативного управления ходом процесса» на инструменты «текущего» (или «непрерывного») и «межоперационного менеджмента» [16, 17]. Соответственно этому выделяют два дополняющих друг друга направления менеджмента: оперативное управление в режиме online в ходе «операции-события» и интегральное управление, осуществляемое в промежутки времени между «операциями-событиями» [18]. По нашему мнению [5, 19], применительно к прокатке следует выделить два направления аналогичных, но имеющих специфику, характерную только для этого процесса: управление в режиме online при прокатке и технологическое регулирование между проходами прокатки или перед прокаткой новой партии. Возможности совершенствования каждого из этих направлений следует рассмотреть отдельно.

1. Оперативное управление.

При оперативном контроле «настройка» процесса в ходе обработки (повышение «меньшего индекса воспроизводимости» C_{pk}) должна осуществляться в режиме online на основе анализа n последних постоянно обновляемых отдельных значений ВР толщины h_i («оперативный интервал»). Необходимо сохранять в памяти текущее накапливаемое значение суммарного количества измерений $N_{i..}$. На пульт управления прокатного стана должна выно-

ситься постоянно обновляемая КК индивидуальных значений, строящаяся на основе этого оперативного интервала. Это удобно также тем, что по виду такая КК близка обычно выносимому на пульт графику толщины, но, кроме ВГД и НГД, там будут и другие свойственные КК характеристики процесса ВКГ, НКГ, C_p , C_{pk} [10], СРД и т.д., (см. рисунок 6). Длина оперативного интервала n должна назначаться в зависимости от конкретного обрабатываемого материала. Такой переход по сути дела к безусловно нужному непрерывному статистическому контролю согласуется с представлениями А.И. Орлова об «основном парадоксе выборочного контроля», что с повышением качества увеличивается объём контроля [20]. В этом случае объём выборки равен размеру «скользящего оперативного интервала». Заметим, что в отличие от общепринятых представлений, в этом случае термин «сплошной» не связан с удорожанием контроля.

Следует максимальным образом формализовать и автоматизировать выбор алгоритма проводимых расчетов, построений, выработки заключений и принятия управляющих действий при работе в режиме online на пультах управления прокатных станов и сохранении возможности варьирования параметров расчётов в ручном режиме, для чего, в частности:

- для конкретных условий прокатки разработать алгоритмы построения x - КК индивидуальных наблюдений [7] и расчёта соответствующих индексов воспроизводимости [10] (при этом для интегрального управления процессом, см. ниже, сохраняются ВР всех контролируемых параметров);

- для различных типоразмеров обрабатываемой ленты разработать таблицу критических значений индексов C_p и C_{pk} , определяющих границы перехода от состояния гарантированно высокой точности к состоянию недостаточно высокой точности, когда брак возможен, и дальше к состоянию низкой точности, когда брак неизбежен; разработать алгоритм идентификации прокатанного металла по трём вышеуказан-

ным уровням точности с учётом расположения средних на КК, их тренда и таблицы критических индексов;

- по окончании обработки следует производить распечатку паспорта рулона, включающего основные параметры обработки и интегрально характеризующие качество всей партии КК любого вида вместе со статистическими показателями возможностей процесса, и прилагать его к операционной карте.

Такое управление инструментами «текущего» или «непрерывного» менеджмента может осуществляться вручную, но разумеется, целесообразно использование автоматического управления, для чего необходимо наличие исполнительного механизма обратной связи. Впрочем, в прокатном производстве исполнительные механизмы такого рода разрабатываются достаточно давно и успешно в рамках автоматической системы регулирования толщины (АСРТ) [21, 22]. Как правило, при формировании корректирующего сигнала, поступающего в систему управления достаточно эффективным гидравлическим нажимным устройством, для регулирования «по возмущению» или «по отклонению» в качестве базового используется среднее значение [22]. Но имеются примеры использования в АСРТ (преимущественно зарубежного исполнения) результатов статистического контроля [21], например, использовался спектральный анализ функций толщины или усилия прокатки [21]. По нашему мнению, более эффективно было бы применение в этом качестве в АСРТ параметра, основанного на результатах вышеприведённого автоматизированного анализа, в частности, S_{PK} [10].

2. Интегральное управление.

Это направление связано с анализом результатов проведённой прокатки в промежутках времени между «операциями-событиями» с целью обоснования следующих управляющих действий:

- принятия решений о приёмке обработанной партии на основании объективного анализа информации о её качестве;
- совершенствования технологии обработки.

По нашему мнению, анализ качества готового проката должен основываться на КК выборочных среднего (см. рисунок 6), но взамен КК размахов целесообразно использовать КК [11] выборочного стандартного отклонения. Необходимо также формализовать способ выборочного контроля:

- дифференцировать количество выборок в диапазоне $k = 10-25$ с установлением алгоритма точного определения k в зависимости от параметров прокатываемого рулона и свойственного конкретному стану расстояния между измерениями (длины проката L , приходящейся на одно цифровое значение его толщины и получаемой в результате дискретизации зависимости толщины по длине проката);

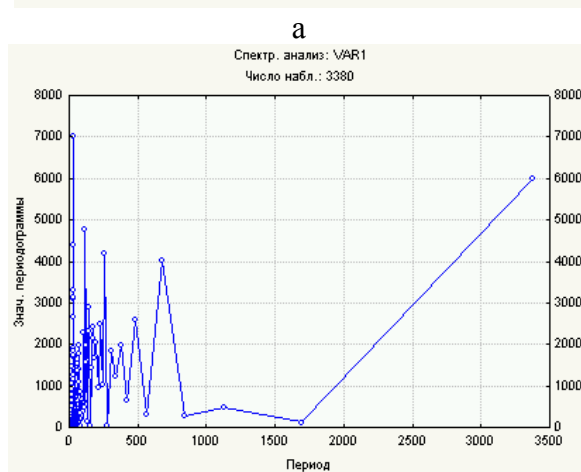
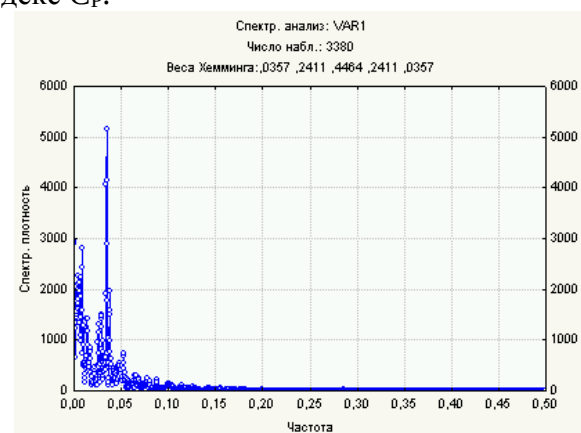
- разработать более обоснованный алгоритм определения числа исключаемых из рассмотрения начальных (m_N) и конечных (m_K) результатов контроля;

- разработать алгоритм назначения количества измерений в выборке (q) и осуществления наиболее репрезентативной (случайной) выборки.

Совершенствование производства следует разделять на повышение качества обработки последующих партий металла, сводящееся к технологическому регулированию, замене инструмента (прокатных валков) и кардинальное изменение технологической схемы производства. В последнем случае большое значение может иметь использование модернизированного инструмента «окно совмещённых графиков», позволяющего сравнивать графики различных параметров, полученных при прокатке на разных станах.

Как известно, ВР толщины проката представляет собой наложение гармонических составляющих различной частоты [23], обусловленных особенностями производства проката на разных его стадиях. Спектральный анализ ВР предназначен для разложения случайной функции на эти гармонические составляющие [14, 15], что должно выявить вклад тех технологических операций, которые дают максимальный вклад в суммарную дисперсию толщины. На рисунке 7 в качестве примера представлены некоторые результаты такого анализа, выполненные для ряда значений (3380

наблюдений) толщины латунной ленты, прокатанной на 4-валковом стане. Видно, что обнаруживаются колебания различной частоты и наибольшую спектральную плотность имеет частота $\sim 0,04$. Разделив расстояние между измерениями L на $0,04$, получим длину волны искомой доминантной гармоники. Обнаружение таких доминантных гармоник, установление и устранение причин их вызывающих (например, «бие-ния» прокатных и/или опорных валков, длина окружности которых равна периоду доминантной гармоники) уменьшает систематическую составляющую погрешности обработки и таким образом увеличивает индекс C_p .



б

Рисунок 7. Графики спектральной плотности (а) и периодограммы (б), построенные для одного из рядов замеров толщины ленты латуни Л68, выполненных при прокатке на стане 4/250

В рамках интегрального управления бывает важно установление взаимосвязи циклических составляющих двух ВР, например, характеристики технологии и

конечной толщины. Действительно, изменения контролируемых технологических характеристик прокатки оказывают влияние на «характеристику результатов производства» (толщину) не мгновенно и не одновременно [18]. Ниже в качестве примера представлены панели результатов выполненного в рамках программы STATISTICA [12] совместных двумерных анализов рядов:

- «кросс-спектрального» для прокатки бронзы БРОФ 6,5-0,15 (рисунок 8а);
- анализа распределённых лагов для оценки смещения во времени, ВР показаний рентгеновских измерителей толщины проката латуни Л68 на входе и выходе из прокатного стана (рисунок 8б).

Сложные нелинейные связи неопределённого вида между входными (характеристики процесса) и выходными значениями (толщина ленты) дают основание предполагать эффективность использования нейронных сетей как при выполнении чисто технологических исследований, так и управляющих действий [24]. Действительно:

- многослойная архитектура НС обеспечивает высокий параллелизм при обработке информации в слоях НС и быструю самонастройку на различные классы решаемых задач;
- НС не жестко программируются на решение определенного класса задач, а обучаются; автоматическая настройка НС осуществляется с заранее выбранной или самоорганизующейся архитектурой;
- выходные сигналы НС могут не только выдавать решение, но и оценивать степень его достоверности;
- большое количество наблюдений при значительном числе переменных (см. табл. 1) позволяет построить сеть любой сложности [24];
- использование НС отвечает тенденции повышения оперативности способов межоперационного регулирования и, в ряде случаев, перевода их в разряд непрерывных [25].

Пакет ST Neural Networks программы Statistica 6.0 [12], с использованием которого в качестве примера рассматривалось

влияние ряда факторов на толщину прокатываемой ленты бронзы БРОФ 6,5-0,15 (рисунок 9), имеет дополнительные возможности:

- реализуется прямая передача сигнала с полной системой связей;
- опытным путем отбираются значимые переменные, что позволяет первоначально включать все факторы или выбирать произвольно те, которые априори могут влиять на результат, рассчитывая на дальнейшее сокращение их количества;
- числовые значения автоматически приводятся в подходящий для сети масштаб;
- выдаётся удобная мера ошибки - среднеквадратичная ошибка (RMS), нормируемая на число наблюдений и переменных;
- используется много алгоритмов обучения, и задаётся автоматическая остановка обучения при появлении «эффекта переобучения» [24].

При проведении экспериментов с различными конфигурациями с использованием «автоматического конструктора сети» предпочтение отдавалось моделям более простым и обеспечивающим минимальную «функцию ошибок» (RMS). Так в результате самообучения нейронной сети при прокатке на стане 4/250 ленты латуни Л63 с 1,3 мм до 0,96 мм без применения АСРТ наиболее эффективные модели были получены на основе многослойного персептрона (MLP) с одним промежуточным слоем и радиальной базисной функции (RBF). Окончательный правильный выбор конфигурации НС должен зависеть от конкретной поставленной задачи. Известно, что сети RBF имеют ряд преимуществ перед сетями MLP, например, обучаются на порядок быстрее MLP. Но модель, основанная на RBF, как правило, работает медленнее и требует больше памяти, чем соответствующий MLP [24]. Заметим, что мы не в полной мере исследовали двухслойную сеть, самоорганизующиеся НС Кохонена Т. [26], также создаваемые в рамках программы STATISTICA. Между тем, с точки зрения повышения оперативности, двухслойная сеть, в которой каждый нейрон первого (распределительного) слоя соединён со

всеми нейронами второго (выходного) слоя, представляется наиболее эффективной при online - управлении.

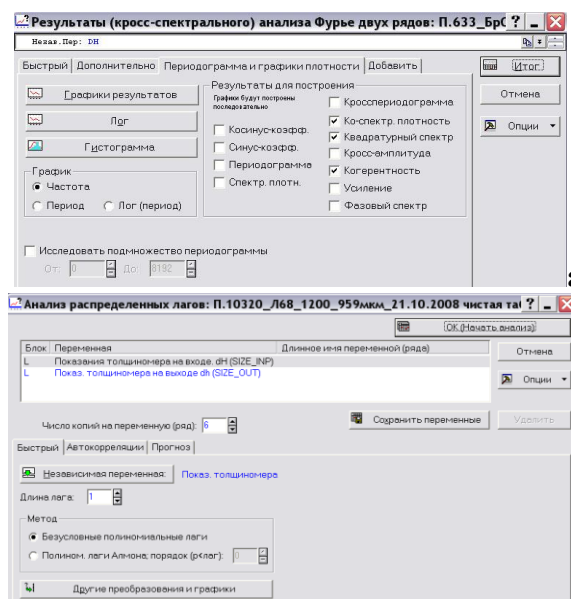


Рисунок 8. Панели результатов двумерного спектрального анализа: «кросс-спектрального» для прокатки бронзы БРОФ 6,5-0,15, рисунок 8а, и анализа распределённых лагов (оценки смещения во времени, ВР показаний рентгеновских измерителей толщины проката латуни Л68 на входе и выходе из прокатного стана, рисунок 8б)

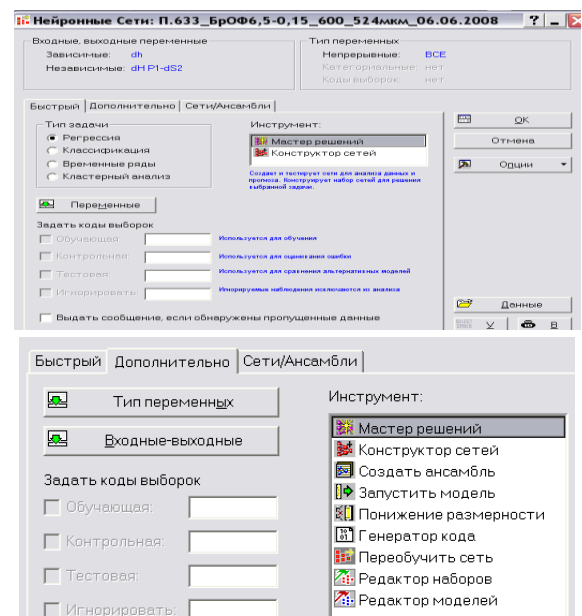


Рисунок 9. Панели нейронных сетей, полученные в программе STATISTICA для ленты из бронзы БРОФ 6,5-0,15, прокатываемой на четырёхвалковом стане, вкладки «быстрый» (а) и «дополнительно» (б)

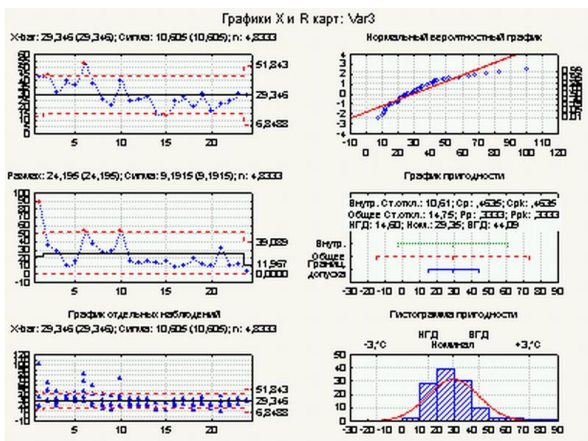


Рисунок 10. Контрольные карты и сопутствующие графики, характеризующие степень пригодности процесса, получаемые в рамках программы STATISTICA

На примерах работы отдельных участков прокатного производства конкретного предприятия, различающихся местом в технологической цепи и объёмом производства, оценивалась эффективность использования в «непрерывном» и «межоперационном менеджменте» трёх методов (направлений) SPC [27]:

1. Создание специализированной программы для конкретного процесса по типу рассмотренной выше [3-5].
2. Использование универсальных статистических систем (на примере программы STATISTICA) [16].
3. Разработка усовершенствованных относительно [2] общедоступных «шаблонов» контроля и управления на базе офисной программы Microsoft Excel.

Специализированная программа показала высокую эффективность при её установке в «ключевой», «заготовительной» точке производственного процесса, через которую проходит весь обрабатываемый материал. В данном случае затраты на разработку элементов SQC оказались вполне оправданными. Но, в процессе дальнейшей обработки, когда технологические потоки многократно разделяются, установка и использование на каждом оборудовании аналогичной специализированной программы признаны экономически нецелесообразными.

Опробование наиболее признанной и доступной к распространению на территории РФ русскоязычной программы

STATISTICA 6 для оперативного SQC показало возможность построения основных видов КК толщины проката, даже без каких-либо навыков программирования. Для этого достаточно в меню «Анализ» открыть вкладки «Промышленная статистика и Шесть Сигма» или «Добыча данных в управлении качеством» [12] и выбрать нужный тип КК, например, КК единичных наблюдений (см. рисунок 10). Но получаемые таким образом «готовые» КК не имеют той «пластичности», которая позволила бы регулировать и устанавливать их в виде, необходимом для наиболее эффективного контроля в режиме online в конкретной точке производственного процесса. По этой причине, а также вследствие достаточно значительной стоимости STATISTICA 6 не нашла применения в непосредственном контроле и управлении. Вместе с тем благодаря наличию опции «Временные ряды и прогнозирование», а также пакета нейросетевого анализа [12] программа эффективно применялась на стадии «интегрального» управления качеством, например, для обнаружения и устранения причин выхода процесса из управляемого состояния за счёт недопустимо высокой дисперсии толщины проката [5, 19]. Заметим, что такого рода интегральное управление качеством, например, обнаружение спектральным анализом ВР источника такой дисперсии, обусловленного, как правило, биением валков конкретного прокатного стана требует достаточно глубокой подготовки на уровне высшей школы.

Шаблон $\bar{X}$ -R КК, созданный в рамках программы MS Excel, позволяет получать её, как только ВР контролируемой характеристики устанавливается в заданный столбец таблицы MS Excel [2, 27]. КК образуется из таблицы механических (в MS Excel «периодических») выборок, которая в свою очередь создаётся функцией «СМЕЩ», отбирающей в заданном порядке значения контролируемой величины. При этом каждый достаточно грамотный пользователь, изменяя аргументы функции «СМЕЩ», определяющей особенность извлечения из ВР результатов контроля толщины, и варьируя количество производимых выборок и их расположение, имеет

возможность оптимизировать статистический контроль качества применительно к конкретному прокатному оборудованию. Созданы также аналогичные шаблоны $\bar{X}$ -S КК и КК индивидуальных значений.

Заключение

1. Выбор методов контроля и управления металлургического производства должен определяться индивидуально на основе технико-экономического анализа целого комплекса условий и характеристик технологии, оборудования и производимого полужабриката на конкретной стадии его обработки.

2. Описанная локальная сеть, показавшая свою эффективность в условиях массового производства, позволяет достаточно удобно осуществлять представление и обработку результатов прокатного производства, хотя нуждается в совершенствовании online контроля и управления, а также в расширении используемых методов межоперационного анализа результатов контроля.

3. В условиях работы оборудования, характеризующемся относительно малым объемом производимой продукции, наиболее эффективными оказываются непрерывные статистические контроль и управление прокаткой, основанные на шаблонах, предварительно созданных в рамках программы Excel и усовершенствованных в соответствии с разработанными рекомендациями.

4. Независимо от объема и других условий производства интегральную (межоперационную) оценку и анализ всей партии обработанного металла целесообразно производить с использованием инструментов международно-признанных современных статистических программных средств.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 7 т.: Под ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2004.
2. Monitoring of band thickness / B.G. Vedernikov, A.M. Martynov, M.Z. Pevzner e.a. // Tsvetnye Metally. – 2005. - № 12. - P. 95-98. Document Type: Article Source: Scopus.
3. О непрерывном статистическом контроле качества плоского проката / М.З.

Бикметов, М.З. Певзнер, А.А. Созонтов, С.Н. Счастливцев // Производство проката. – 2007. - № 8. - С. 27-33.

4. Итоги внедрения и вопросы совершенствования статистического мониторинга в лентопрокатном производстве / М.З. Бикметов, А.М. Мартынов, М.З. Певзнер и др. // Цветные металлы. – 2009. - № 4. - С. 84-88.
5. Певзнер, М.З. Возможности статистического мониторинга в непрерывном производстве / М.З. Певзнер // Методы менеджмента качества. – 2009. - №11. - С. 44-48.
6. ГОСТ Р 50779.41-96 (ИСО 7873-93). Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. - Дата введения 1997-07-01. - М.: Госстандарт России, 1996. - 23 с.
7. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). Контрольные карты Шухарта. - Дата введения 2000-01-01. - М.: Госстандарт России, 1999. - 32 с.
8. Миттаг, Х.-Й. Статистические методы обеспечения качества: Пер. с нем. / Х.-Й. Миттаг, Х. Ринне. - М.: Машиностроение, 1995. – 616 с.
9. Статистические методы повышения качества / Под ред. Хитоси Кумэ. - М.: Финансы и статистика, 1990. – 301 с.
10. ГОСТ Р ИСО 22514-2-2015 Статистические методы. Управление процессами. Ч. 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе его изменения во времени. - Дата введения 2016-01-07. - М.: Госстандарт России, 2016. - 28 с.
11. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. - 816 с.
12. Боровиков, В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов: 2-ое изд. / В.П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
13. Елетина, Е.Ю. Применение стратегии комплексного подхода к стабилизации технологического процесса / Е.Ю. Елетина // Производство проката. - 2007. - № 2. - С. 41-44.

14. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М. : Мир, 1976. – 755 с.
15. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды : Пер. с англ. / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1976. – 736 с.
16. Качалов, В.А. Что такое «мониторинг» и «измерение процесса»? / В.А. Качалов // Методы менеджмента качества. - 2008. - № 1. - С. 40-45.
17. Гладков, В. Менеджмент качества: процессный подход / В. Гладков // Проблемы теории и практики управления. - 2008. - № 10. - С. 100-106.
18. Ситников, С.Г. Базовая модель систем оперативного менеджмента / С.Г. Ситников // Менеджмент в России и за рубежом. - 2009. - № 5. - С. 29-35.
19. Певзнер, М.З. Управление непрерывным производством: статистический процессный подход / М.З. Певзнер // Проблемы теории и практики управления. - 2010. - № 3. - С. 121-126.
20. Орлов, А.И. Всегда ли нужен контроль качества продукции? / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1999. – Т. 65. - № 11. – С. 51-55.
21. Тимошенко, Э.В. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке / Э.В. Тимошенко, А.А. Семецкий. – Киев : НВК «КИА», 1999. – 264 с.
22. Кареев, С.М. Автоматические системы регулирования толщины полосы для реверсивных станов холодной прокатки / С.М. Кареев // 60 лет научно-конструкторской и производственной деятельности ВНИИМЕТМАШ / сост. В.Г. Дрозд, А.И. Майоров, Б.А. Сивак. - М., 2005. - С. 473-477.
23. Железнов, Ю.Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю.Д. Железнов, С.Л. Коцарь, А.Т. Абиев. – М. : Металлургия, 1974. - 240 с.
24. Хайкин, С. Нейронные сети: Полный курс : 2 изд. / Пер. с англ. / С. Хайкин. - М.-СПб.-Киев : Вильямс, 2008. - 1104 с.
25. Светличный, Д.С. Применение искусственных нейронных сетей к определению поперечной разнотолщинности листа / Д.С. Светличный // Производство проката. - 2006. - № 1. - С. 10-15.
26. Kohonen, T. Self-Organizing Maps: Third Extended Edition / T. Kohonen. - New York, 2001. - 501 p.
27. Куимов, Е.А. О совершенствовании контроля параметров качества и управления процессом прокатки / Е.А. Куимов, М.З. Певзнер, С.А. Смертин // Производство проката. – 2016. - № 7. - С. 38-43.

Information about the paper in English

**M.Z. Pevzner, V.A. Zhuikov, K.V. Ivanov-Polsky,
E.A. Kuimov, V.D. Perevoshchikov**

Vyatka State University,
Kirov, Russia

E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru

Received 18.03.2018

THE CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE SYSTEM OF COLLECTION, STORAGE, STATISTICAL TREATMENT AND REPRESENTATION OF INFORMATION, WHEN OPERATING ROLLING EQUIPMENT AT A NONFERROUS METALLURGY PLANT

Abstract

The paper presents results of an introduced rolling division control and operation system and potential ways of further improvement of statistical quality management. To ensure an efficient online operation, we suggested modernization of used control cards and development of an integrated automatic thickness control system based on statistical quality control. A time series analysis tools and neural networks offered by modern statistical programs are evaluated to be used for inter-operation quality management.

Keywords: rolling division, quality management, continuous process monitoring, control card, statistical control



УДК 669.1.: 669.97

С.Г. Шахрай¹, А.А. Дектерев^{1,2}, А.В. Минаков^{1,2},

П.А. Необъявляющий^{1,2}, Н.А. Шарыпов¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

²Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: shahrai56@mail.ru

Дата поступления 09.02.2018

МОДЕРНИЗАЦИЯ АНОДНОГО КОЖУХА АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА СОДЕРБЕРГА

Аннотация

Проанализированы причины высокого расхода электроэнергии на преодоление сопротивления газового прианодного слоя электролизера с самообжигающимся анодом. Предложено техническое решение, обеспечивающее уменьшение объема газоелектролитного слоя за счет секционирования анода на отдельные ячейки в существующем, модернизируемом анодном кожухе. Выполнено моделирование поведения пузырей анодного газа под моноблочным и секционированным анодом. Проведена оценка влияния газового прианодного слоя на технико-экономические показатели электролизера с самообжигающимся анодом.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, самообжигающийся анод, газовый слой, сопротивление, электроэнергия, анодный кожух, модернизация, ячейки.

Введение

Одна из проблем современных электролизеров Содерберга – значительные габариты установленного в нем самообжигающегося анода, длиной 8,0...8,5 м и шириной 2,6...2,8 м. Такие габариты являются причиной образования под анодом газового слоя, на котором падение напряжения составляет 400 мВ и выше, а на преодоление его сопротивления электролизер расходует до 1200...1400 кВт·ч/т Al электроэнергии.

На электролизере с обожженным анодом, вследствие существенно меньших габаритов последнего (длина 1,0...1,5 м, ширина 0,6...0,9 м), потери напряжения на газовом слое составляют 150...300 мВ, а затраты электроэнергии на преодоление его сопротивления 600...800 кВт·ч/т Al электроэнергии [1].

В настоящей работе предлагается уменьшить объем газового слоя за счет секционирования самообжигающегося анода на отдельные ячейки. Ячейки размещаются в существующем модернизированном анодном кожухе. Снижение объема газового слоя происходит за счет уменьшения габаритов анода, который определяется зависимостью [1]:

$$V = Abl + 2(A + B)(h - l)l, \quad (1)$$

где A и B – длина и ширина анода, м;
 l – междуполосное расстояние (МПП), м;
 h – уровень электролита, м

Кроме этого, разделение анода на ячейки, согласно представленному техническому решению, позволяет исключить из системы газоудаления электролизера газосборный колокол, т.к. в этом случае пузыри анодного газа, под действием сил Архимеда, будут всплывать в зазоры между ячейками, откуда возможно организовать их отвод в горелки для дожигания и далее – в газоходную сеть корпуса электролиза.

Модернизация анодного кожуха электролизера Содерберга

Суть предлагаемой модернизации анодного кожуха заключается в следующем. В анодный кожух на уровне границы между коксо-пековой композицией и зоной полукокса устанавливается горизонтальная перфорированная перегородка с ячейками (рисунок 1) [2].

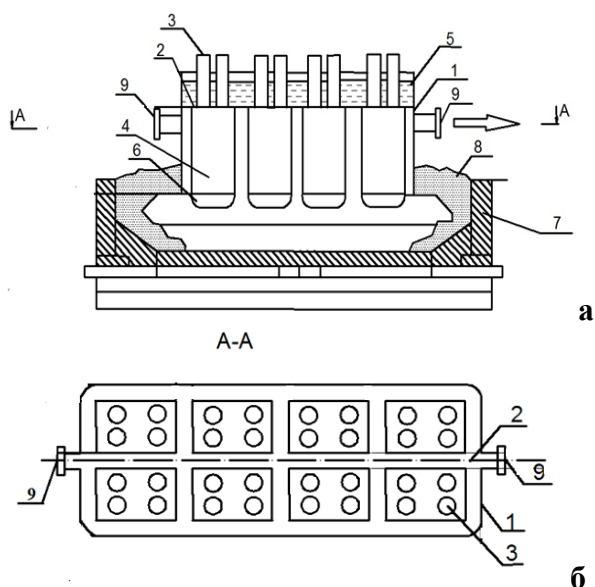


Рисунок 1. Электролизер с секционированным анодом:

а и б – продольный разрез электролизера и его анодного узла; 1 – анодный кожух;

2 – горизонтальная перегородка;

3 – токоподводящие анодные штыри;

4 – ячейки для формирования анода;

5 – слой коксопечковой композиции;

6 – спекшиеся анодные блоки;

7 – катодный узел электролизера;

8 – криолитоглиноземная корка;

9 – газоотводящий патрубок

Между ячейками, а также между ними и внутренней стороной стенки анодного кожуха остаются зазоры шириной от 150 до 200 мм. Такая ширина зазора сопоставима с шириной подколольного пространства, в котором собираются анодные газы на «традиционном» электролизере Содерберга с моноблочным анодом.

Нижняя кромка ячейки по уровню совпадает с нижней кромкой анодного кожуха, что обеспечивает условия подобия схода анодных газов из-под моноблочного и секционированного анодов – равенство статического давления расплава, оказываемого на всплывающий пузырек газа. Размер окон в перфорированной горизонтальной перегородке соответствует внутренним габаритам ячейки, что обеспечивает свободное затекание коксо-печковой композиции в зону полукокса. В целях исключения коксования загружаемой в электролизер анодной массы на поверхности перегородки, по-

верхность последней, обращенная к расплаву, оборудуется тепловой изоляцией.

Минимальное количество ячеек, на которое делится моноблочный анод – две, максимальное – двенадцать. При делении моноблочного анода на 12 ячеек размер каждой из них приближается к габаритам обожженного анода и составляет примерно 1,2х1,2 м. При этом удержание каждого блока в ячейке и токоподвод к нему осуществляется 4...8 анодными штырями. Сбор анодных газов в зазорах между ячейками обеспечивает возможность их отвода в систему газоудаления через газоотводящие патрубки, размещенные в анодном кожухе ниже уровня расположения перфорированной перегородки.

Влияние газового прианодного слоя на технико-экономические показатели работы электролизера

В настоящем разделе статьи представлены результаты математического моделирования поведения газовых пузырей под моноблочным и секционированным анодами. Полная математическая модель движения анодного газа под анодом состоит в совместном решении уравнений гидродинамики и уравнения свободной границы жидкого электролита. Течение электролита описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса [2], включающими в себя уравнения сохранения массы (неразрывности) и сохранения импульса (движения).

Основные транспортные уравнения данной модели имеют вид:

$$\frac{d\rho k}{dt} + \nabla(\rho k) = \nabla \Gamma_k \nabla k + G_k; \quad (2)$$

$$\frac{d\rho \omega}{dt} + \nabla(\rho \omega v) = \nabla \Gamma_\omega \nabla \omega + G_\omega, \quad (3)$$

где ω – удельная скорость диссипации, Γ_k и Γ_ω – обобщенные коэффициенты диффузии, G_k и G_ω – источниковые слагаемые.

Для решения задачи со свободной поверхностью использовался метод жидкости в ячейках [3, 4] – жидкость и газ рассматриваются как единая двухкомпонентная среда, пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется при помощи специальной функции маркера $F(x, y, z, t)$.

Величина функции F в начальный

момент задается следующим образом:

$$F(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{если ячейка пустая;} \\ 1, & \text{если ячейка полная;} \\ & \text{объемная доля жидкости,} \\ & \text{если через ячейку проходит свободная граница.} \end{cases}$$

Расчет выполнялся для области занятой электролитом. Вычислительный эксперимент по оценке поведения газового слоя проводили при следующих граничных условиях: габариты моноблочного анода 8,4 x 2,8 м, габариты ячеек секционированного анода около 1,35x1,60 м, криолитовое

отношение электролита 2,20...2,25, глубина погружения анода в электролит 15 см, расход анода 550 кг/т Al, сила тока процесса электролиза 175 кА. На нижней поверхности анода задавался удельный расход образующихся анодных газов 42...45 нм³/ч [5]. Результаты моделирования представлены на рис. 2 – 7.

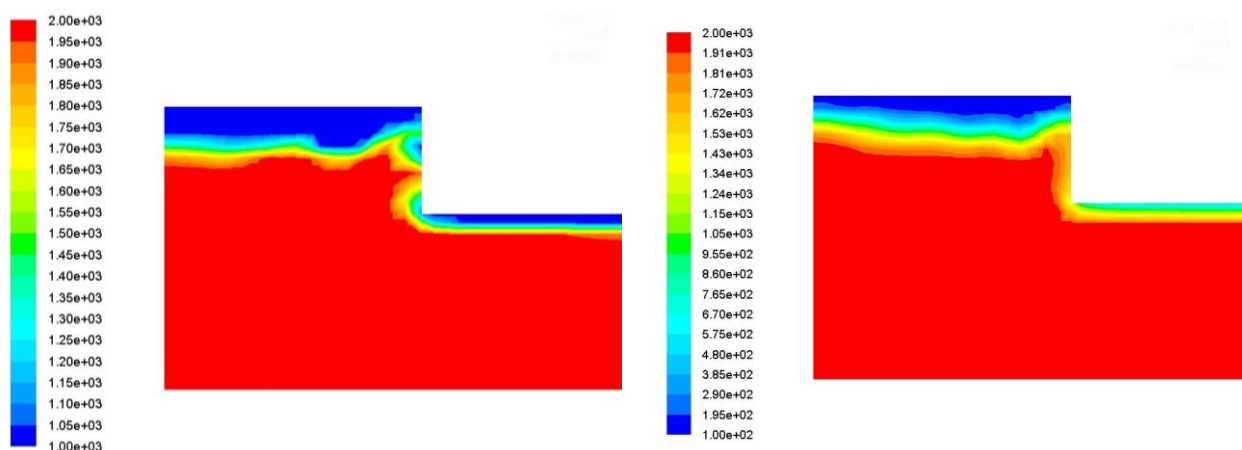


Рисунок 2. Толщина газового слоя: а) - под моноблочным анодом; б) – под секционированным

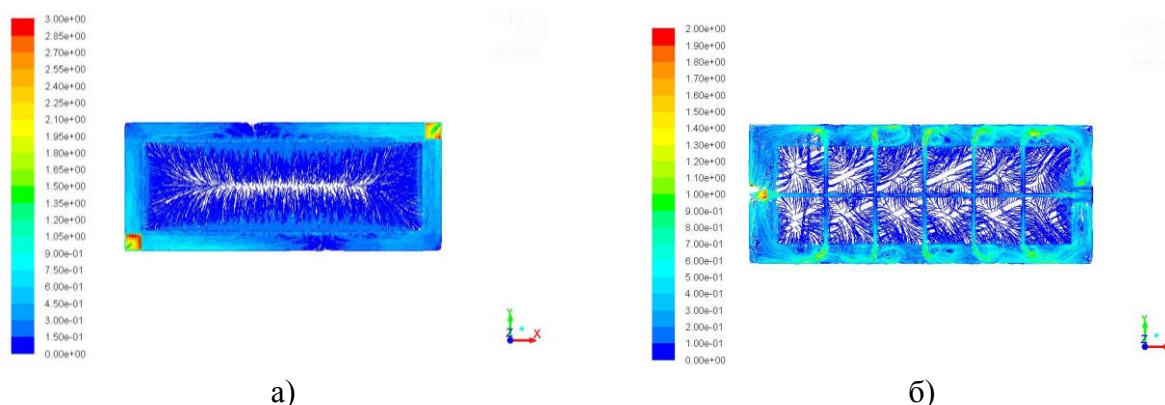


Рисунок 3. Линии тока газовых пузырей: а) - под моноблочным анодом; б) – под секционированным (цвет соответствует скорости, м/с)

Из рисунка 2 видно, что под секционированным анодом толщина газового слоя (3 мм) в 2,5 раза ниже, чем под моноблочным анодом (7,5 мм), а из рисунка 3 – что более 80 % площади подошвы моноблочного анода затянута газовыми пузырями, в то время как под секционированным анодом – не более 60 %.

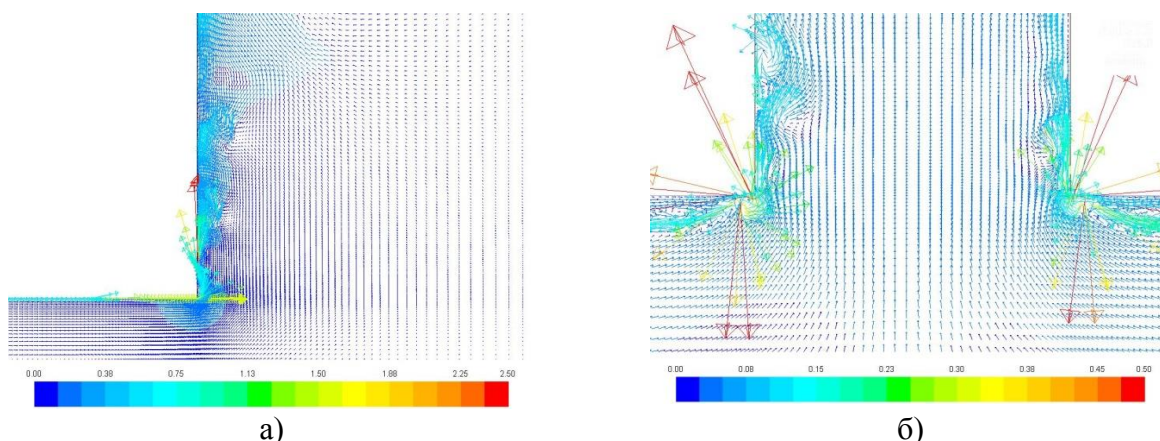


Рисунок 4. Векторное поле скоростей газовых пузырей:
а) под моноблочным анодом; б) под секционированным

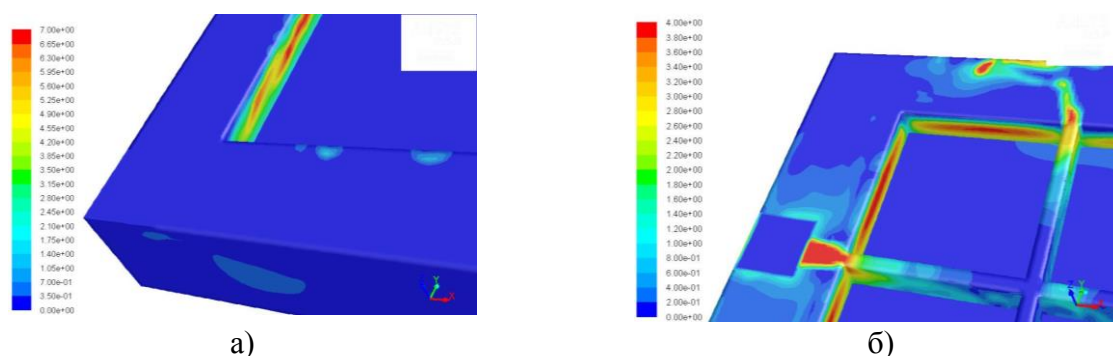


Рисунок 5. Трение газовых пузырей, Па: а) на стенке моноблочного анода;
б) секционированного

Векторные поля скоростей, представленные на рисунке 4 показывают, что средняя скорость газовых пузырей при их сходе из-под моноблочного анода находится в диапазоне 0,70...0,75 м/с, и близка к данным, полученным в работе [6] экспериментальным путем для электролизера силой тока 156 кА. Однако, в локальных зонах скорость схода газовых пузырей из-под анода достигает 2,5 м/с, а при сходе из-под

ячейки секционированного анода не превышает 0,5 м/с (см. рисунок 4 б). Соответственно, трение на стенке моноблочного анода достигает 7 Па (см. рисунок 5 а), на стенке секционированного почти в 2 раза ниже, порядка 4 Па (см. рисунок 5 б). Таким образом, можно предположить, что при секционировании анода снижается его эрозионный износ и выход пены, обусловленный сходом газовых пузырей.

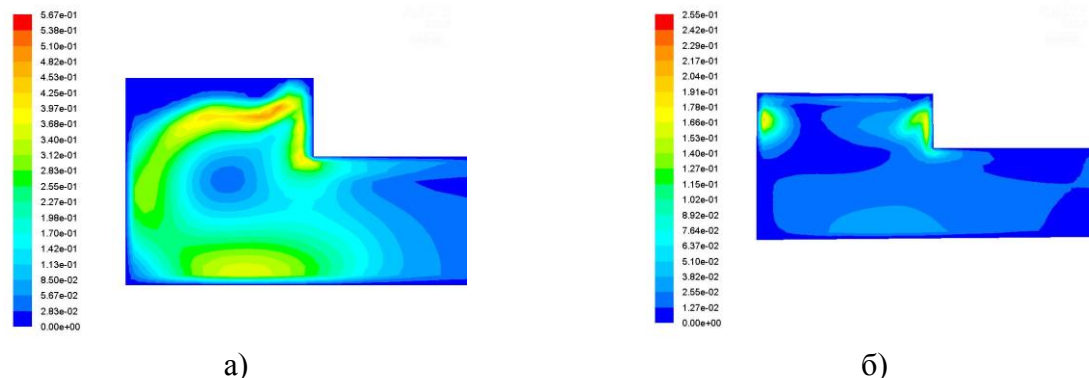


Рисунок 6. Скорость циркуляции электролита от воздействия газовых пузырей:
а) сходящих из-под моноблочного анода; б) из-под секционированного

При секционировании анода скорость циркуляции электролита от воздействия газовых пузырей снижается с 0,3...0,5 м/с (см. рисунок 6,а) до 0,1...0,2 м/с (см. рисунок 6,б). За счет снижения скорости и зоны циркуляции в пространстве «борт анод» сокращается вынос теплоты из центральной зоны электролизера и ее потери через стенки катодного кожуха, а также уменьшается риск плавления настывшей от воздействия циркулирующего электролита. В то же время, появление зоны циркуляции в центральной части электролизера улучшает условия переноса и растворения глинозема во всем объеме электролита и снижает риск образования осадков на подине электролизера.

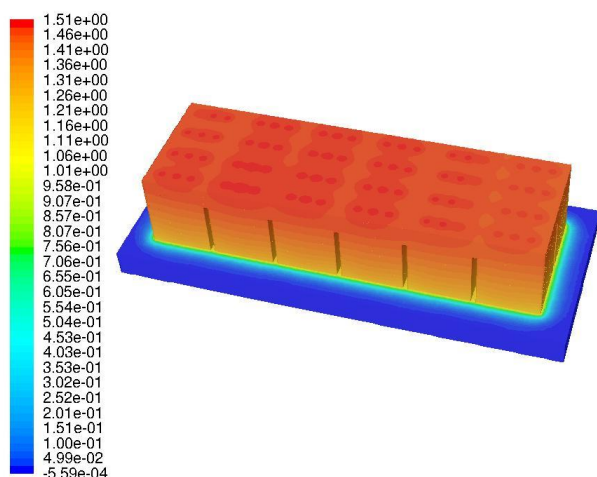


Рисунок 7. Падение напряжения на газосодержащем слое секционированного анода

Согласно данным рис. 7, за счет уменьшения толщины газового слоя, падение напряжения на газосодержащем прианодном слое секционированного анода снижается до 300...400, против 600...800 мВ на моноблочном аноде [1]. Соответственно, удельный расход электроэнергии на преодоление сопротивления газового слоя в электролизерах силой тока 175 кА уменьшается на 520...870 кВт·ч/тAl.

При секционировании самообжигающегося анода, помимо сокращения расхода электроэнергии отпадет потребность в газосборном колоколе, так как образующиеся анодные газы, под воздействием сил Архимеда, всплывают из-под анода и собираются непосредственно в зазорах между

ячейками, откуда они через газоотводящие патрубки направляются в горелки для сжигания. При удалении газосборного колокола возможно увеличение площади анодного кожуха на 6...7 м², а площади собственно самообжигающегося анода – на 3...4 м². Таким образом, возможно получить дополнительное снижение потери напряжения за счет уменьшения плотности тока в аноде, или, при сохранении ее существующего уровня, повысить силу тока процесса электролиза до 190...200кА, а производительность электролизера на 10...15 %. Кроме этого, увеличение площади анодного кожуха уменьшает площадь открытой корки ~ на 50 % и на такую же величину снижает объем выбросов анодных газов, фильтрующихся через криолито-глиноземную корку электролизера.

Заключение

Модернизация анодного кожуха по предлагаемому техническому решению позволяет снизить расход электроэнергии электролизером с самообжигающимся анодом на 3...5 %, а также исключить из системы газоудаления газосборный колокол, срок службы которого, как правило, не превышает 8...12 месяцев. Реализация предлагаемого технического решения потребует новых конструкционных материалов и изменения технологии изготовления анодного кожуха, оборудованного перфорированной перегородкой с ячейками. Эти материалы не должны деформироваться при воздействии высоких (до 940...960 °С) температур. Наиболее полно этому требованию отвечают чугуны, сварка которых более трудоемкий и дорогостоящий процесс, по сравнению со сваркой конструкционной стали, из которой в настоящее время изготавливают анодные кожухи. Однако, ожидаемые преимущества делают предлагаемую модернизацию анодного кожуха экономически привлекательной.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-

Библиографический список

1. Yiwen Zhou, Jiemin Zhou, Jianhong Yang and [etc.]. Simulation of anode bubble: volume of fluid method. - Light Metals, 2014, p. 783-788.
2. Ветюков, М.М., Цыплаков, А.М., Школьников, С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
3. Шахрай, С.Г., Дектерев, А.А., Скуратов, А.П. Электролизер для получения алюминия. Заявка на патент РФ на изобретение №2017123473 от 03.07.2017.
4. J. O. Hinze. Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York. 1975. 790 с.
5. Hirt C.W. Volume of fluid (VOF). Method for the dynamics of free boundaries. / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of computational physics. 1981. № 39. P.-201-226.
6. A.V. Minakov. Numerical algorithm for moving-boundary fluid dynamics problems and its testing. Computational Mathematics and Mathematical Physics.

Volume 54, Issue 10, 2014, P.- 1560- 1570.

7. Шахрай, С.Г. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга: монография / С.Г. Шахрай, В.В. Коростовенко, И.И. Ребрик. – Красноярск.: ИПК СФУ. – 2010. – 146 с.
8. Крюковский, В.А. Исследование циркуляции электролита и анодных газов в междуполусном зазоре мощных алюминиевых электролизеров: Автореферат дисс...канд. техн. наук / Ленинград: Всесоюзный институт алюминиевой и магниевой промышленности (ВАМИ), 1974. – 20 с.

Information about the paper in English

S.G. Shakhrai¹, A.A. Dekterev^{1,2}, A.V. Minakov^{1,2},
P.A. Neobyavlyayushchy^{1,2}, N.A. Sharypov¹

¹Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

²The Thermophysics Institute of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

E-mail: fdv_viktor@mail.ru

Received 09.02.2018

MODERNIZATION OF AN ANODE SHELL OF A SODERBERG ALUMINUM ELECTROLYZER

Abstract

We have analyzed reasons for a high power consumption to overcome resistance of a gas anode layer of the electrolyzer with a self-baking anode. A suggested technical solution provides for a decreased gas electrolyte layer by sectioning the anode into cells in an existing, modernized anode shell. We have simulated behavior of anode gas bubbles under single-block and sectioned anodes. Influence of the gas anode layer on technical and economic performance of the electrolyzer with the self-baking anode was evaluated.

Keywords: aluminum electrolyzer, self-baking anode, gas layer, resistance, electric power, anode shell, modernization, cells



УДК 621.838.222

М.П. Шишкарёв
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (ДГТУ)
г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Дата поступления 16.02.2018

ВЫБОР АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ДЛЯ ПРИВОДОВ МАШИН МЕТАЛЛОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Разработаны схемы действия перегрузок в незащищаемой и защищаемой частях привода металлопрокатной машины, которые показывают локальные нагрузки, действующие в узлах привода. Установлено, что максимальное значение перегрузки на выходном валу адаптивной фрикционной муфты зависит от скорости нарастания перегрузки на рабочем органе машины, а также от физико-механических характеристик незащищаемой части привода. Сформулированы общие принципы выбора типа АФМ, включающие технические характеристики привода машины, указание о наиболее слабом звене привода и месте его расположения в кинематической цепи, особенности АФМ при изменении точности срабатывания и места ее установки.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, коэффициент трения, привод машины, наиболее слабое звено.

Введение

В настоящее время не существует единой методики проектирования, расчета и выбора предохранительных фрикционных муфт для их рационального применения в приводах машин и механизмов, имеющих значительную протяженность кинематической цепи, что характерно, в частности, для приводов металлопрокатного оборудования. Рациональным будем считать такое применение муфт, когда они позволяют эффективно защищать от перегрузок узлы и детали приводов машин при расчетных запасах прочности [1].

Аналогично изложенному, методика выбора адаптивных фрикционных муфт (АФМ) для рационального применения в приводах машин в настоящее время в полном объеме отсутствует. Имеются лишь частные методики расчета и проектирования АФМ различных типов (поколений), слабо связанные с выбором их типа в зависимости от конкретных условий эксплуатации машин и механизмов [2, 3].

В единственной работе рассматриваются вопросы компоновочных решений приводов машин с АФМ в их составе, од-

нако в данном случае решается так называемая «прямая» задача, относящаяся только к определению влияния эксплуатационных характеристик АФМ на технические показатели приводов [4].

В сложившейся практике расчета и проектирования машин и механизмов и, в частности, их приводов чаще всего в качестве исходных задаются технические характеристики приводов. К ним, в том числе, относятся масса и габаритные размеры привода.

Такие технические характеристики приводов должны быть жестко связаны с эксплуатационными показателями АФМ, в том числе с нагрузочной способностью и точностью срабатывания.

Задачей исследования в данной работе является разработка методических основ выбора типа АФМ и их эксплуатационных показателей в зависимости от технических характеристик приводов машин и механизмов.

Основная часть

Привод машины и механизма, при установке в нем предохранительной муфты, условно разделяется на две части: защищаемую и незащищаемую. Границей

раздела в кинематической цепи привода является место установки АФМ [5].

Часть привода, расположенная между приводным двигателем и АФМ, относится к защищаемой части. Остальная часть привода, расположенная между рабочим (исполнительным) органом машины и АФМ, относится к незащищаемой части привода.

Указанное разделение привода на защищаемую и незащищаемую части обусловлено тем, что скорость распространения ударной волны в приводе машины от источника возникновения перегрузок – рабочего органа – к приводному двигателю конечная, поэтому требуется определенный период времени для того чтобы ударная волна прошла расстояние до АФМ. При этом происходит увеличение нагрузки, действующей на узлы и детали незащищаемой части привода. Это увеличение тем больше, чем значительнее время, в течение которого оно происходит.

Как показали исследования, конечное значение перегрузки на выходном валу АФМ зависит от четырех факторов:

- скорости нарастания перегрузки на рабочем органе машины;
- скорости передачи ударной волны по незащищаемой части привода;
- протяженности кинематической цепи незащищаемой части привода;
- величины потерь ударного импульса в незащищаемой части привода.

В конечном счете, полное значение перегрузки на рабочем органе машины есть функция времени действия перегрузки на привод.

Учитывая, что скорость распространения ударной волны конечная, при достаточно протяженной кинематической цепи незащищаемой части привода будет иметь место неодинаковое распределение нагрузки в деталях и узлах указанной части привода. При этом наименьшая нагрузка будет на ведомом валу АФМ, а наибольшая нагрузка – на рабочем органе и ближайшем к нему узле привода.

Схема действия нагрузок в незащищаемой части привода машины показана на рисунке 1. В координатных осях $T - L$ (где T – вращающий момент, L – протяженность кинематической цепи незащищаемой

части привода) показано, что при наличии в составе незащищаемой части привода понижающих механических передач распределение нагрузки между узлами 1–4 (отмечены на оси абсцисс) соответствует прямой 1. В данном случае принят линейный закон изменения номинальных вращающих моментов $T_1 \dots T_{H4}$.

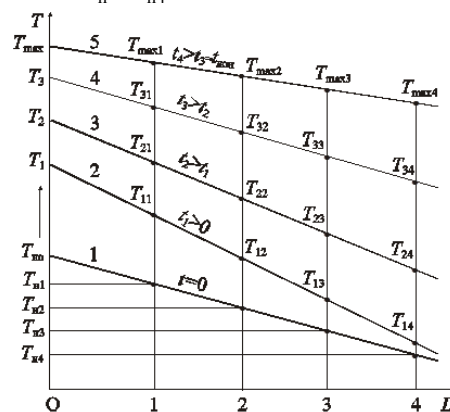


Рисунок 1. Схема действия нагрузок в незащищаемой части привода машины

При перегрузке вращающий момент увеличивается последовательно до значений $T_1 \dots T_{max}$, что отражено на схеме стрелкой, направленной вверх вдоль оси ординат. Учитывая неодинаковое распределение нагрузки, действующей в узлах 1–4 привода машины, это распределение показано на схеме прямой 1, наклонной по отношению к оси абсцисс (для номинальной нагрузки в приводе).

Точки пересечения прямой 1 и вертикальных линий, проходящих через точки 1–4 на оси абсцисс, показывают значения номинальных вращающих моментов, действующих в соответствующих узлах, расположенных в незащищаемой части привода.

Прямые 2–4, наклонные по отношению как к оси абсцисс, так и к прямой 1, показывают распределение повышенной (по отношению к номинальной) нагрузки по узлам 1–4. Непараллельность их по отношению к прямой 1 обусловлена смещением по времени прихода ударной волны в соответствующие узлы.

Прямая 5, соответствующая максимальному вращающему моменту T_{max} , действующему на рабочий орган машины О,

отражает состояние процесса по истечении времени нарастания перегрузки $t_{\text{кон}}$.

Максимальные нагрузки, действующие на узлы 1–4, обозначены на схеме как $T_{\text{max}1} \dots T_{\text{max}4}$.

Узлы и детали, расположенные в защищаемой части привода, при перегрузках воспринимают нагрузки, величина которых зависит от точности срабатывания АФМ. Это же относится и к приводному двигателю, коэффициент перегрузки которого зависит от точности срабатывания АФМ [6, 7].

На рисунке 2 приведена схема распределения нагрузки, действующей на узлы и детали защищаемой части привода машины. Данная схема аналогична схеме, показанной на рисунке 1. Узел 4 на этой схеме обозначает АФМ, узел 8 – приводной двигатель. Узлы 5–7 – промежуточные узлы защищаемой части привода машины.

Схема, приведенная на рисунке 2, показывает, что принцип действия ударной волны распространяется и на защищаемую часть привода, т. е. выполняются следующие условия:

$$\frac{T_{n4}}{T_{n8}} \neq \frac{T_{14}}{T_{18}} \neq \frac{T_{24}}{T_{28}} \neq \frac{T_{34}}{T_{38}} \neq \frac{T_{\text{max}4}}{T_{\text{max}8}},$$

что является следствием существования ненулевой фазы (по времени) ударной волны в результате конечной скорости ее распространения в кинематической цепи привода.

Данный вывод справедлив и для незащищаемой части привода.

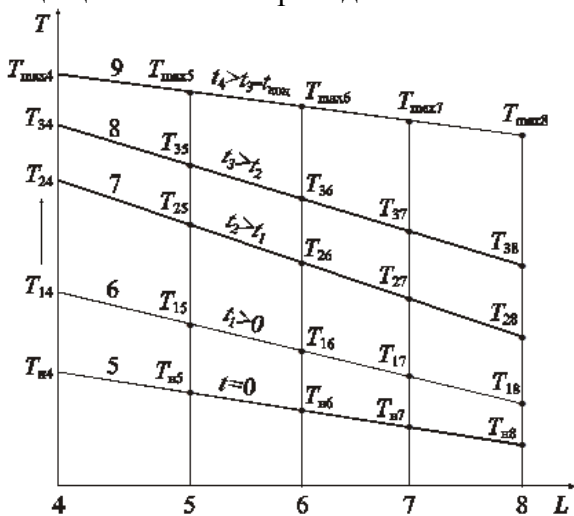


Рисунок 2. Схема действия нагрузок в защищаемой части привода машины

В коротких кинематических цепях приводов машин и механизмов, состоящих из 1–2-х механических передач, при установке АФМ непосредственно на валу рабочего органа машины муфта будет защищать от перегрузок всю кинематическую цепь привода, включая рабочий орган, который, как правило, обладает большой крутильной жесткостью.

Выполняя функцию устройства, предохраняющего узлы, детали и приводной двигатель от перегрузок, АФМ служит также регулятором общей массы и габаритных размеров привода, причем последние зависят от точности срабатывания муфты [8].

При разработке методики выбора типа АФМ для привода машины или механизма будем исходить из следующих принципов:

- габаритные размеры и общая масса привода, за исключением массы рабочего органа машины или механизма, включены в техническое задание на проектирование;
- место установки АФМ в кинематической цепи привода техническим заданием не оговаривается;
- повышение точности срабатывания АФМ приводит к увеличению ее габаритных размеров и массы [9];
- изменение места установки АФМ в кинематической цепи привода, включающего понижающие или повышающие механические передачи, приводит к изменению ее габаритных размеров и массы [9];
- в габаритные размеры и общую массу привода включены габаритные размеры и масса АФМ;
- известны наиболее слабое звено привода и место его расположения в кинематической цепи.

Поскольку каждый тип АФМ обладает определенной достигаемой точностью срабатывания, тип АФМ, необходимый для выполнения первого и пятого принципов проектирования, будем определять по достигаемому коэффициенту точности.

Таблица основных типов АФМ и некоторые их характеристики, необходимые для выбора конкретного типа муфты при решении задачи компоновки привода, приведены ниже.

Таблица 1

Технические характеристики АФМ

№ п/п	Тип АФМ	Исходная масса, M_o , кг	Достижимая точность срабатывания АФМ (K_T)	Коэффициент увеличения габаритных размеров и массы АФМ, K_y
1.	АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера)	8...12	3,6...2,4	$\frac{3,6}{K_T}$
2.	АФМ второго поколения (базовый вариант)	16...24	3,0...1,8	$\frac{3,0}{K_T}$
3.	АФМ второго поколения (модифицированная)	24...60	1,16...1,08	$\frac{1,16K}{K_T}$, $K=1,0...2,4$
4.	АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием	16...40	2,5...1,14	$\frac{1,25}{K_T}$

В таблице 1, в частности, отражены:

– коэффициент точности K_T каждой АФМ в виде интервалов значений, границы которых соответствуют граничным значениям интервалов исходной массы муфты каждого типа. Данные таблицы показывают, что с увеличением K_T наблюдается рост массы АФМ [10];

– коэффициент увеличения габаритных размеров и массы для каждого типа АФМ. Данный показатель отражает кратность увеличения габаритных размеров и массы АФМ в результате повышения точности срабатывания, т. е. уменьшения K_T . В данном случае принято пропорциональное значению $1/K_T$ увеличение габаритных размеров и массы АФМ.

Для АФМ второго поколения (модифицированной) при вычислении коэффициента K_y введен поправочный коэффициент K , поскольку вследствие высокой точности срабатывания эта муфта имеет тенденцию к резкому увеличению габаритных размеров и массы при уменьшении K_T в относительно небольших пределах.

Первая задача при компоновке привода машины заключается в выборе необходимого типа АФМ для привода с жест-

кими ограничениями по массе и габаритным размерам. Включение в первоначальный состав привода АФМ с одновременным указанием предельных габаритных размеров и массы привода предъявляет менее жесткие требования к техническим характеристикам и эксплуатационным показателям муфты: в этом случае для АФМ отведены соответствующие резервы по их габаритным размерам и массе (см. таблицу 1). Указанные резервы зависят от результатов расчетов и проектирования остальных узлов и деталей привода.

При наличии указанных резервов выбор типа АФМ связан с оценкой массы муфты на основе значения номинального вращающего момента, действующего в месте установки ее в кинематической цепи привода.

Выбор места установки АФМ в кинематической цепи привода связан с расположением наиболее слабого звена привода, которое должно находиться в защищаемой части привода.

Оценка массы АФМ производится по данным таблицы 1. Типы АФМ, указанные в пп. 2–4, имеют общую часть интервала значений M_o , поэтому индивидуальный выбор типа муфты должен быть связан с номинальным вращающим моментом, который должна передавать АФМ.

Это связано с тем, что, несмотря на одинаковую массу, АФМ различных типов при приблизительно одинаковых габаритных размерах обладают неодинаковой номинальной нагрузочной способностью. Так, из приведенных в таблице 1 типов АФМ наибольшей номинальной нагрузочной способностью обладают муфты с раздельным силовым замыканием, на втором месте по данному показателю находятся АФМ второго поколения (базовый вариант). Замыкают линейку типов АФМ модифицированные АФМ второго поколения, обладающие наибольшей точностью срабатывания.

В тех случаях, когда в результате выбора необходимого типа АФМ для рассматриваемых условий эксплуатации будет установлено, что совокупная масса привода и АФМ превышает заданное значение, необходимо за счет увеличения точности срабатывания АФМ привести совокупную массу привода и АФМ в соответствие с заданным показателем.

Повышение точности срабатывания (в пределах технических возможностей выбранного типа АФМ) осуществляется на стадии расчета и проектирования за счет увеличения коэффициента усиления (КУ). При этом происходит неизбежное увеличение собственной массы АФМ, и возможно уменьшение массы защищаемой части привода [10].

В работе [4] для упрощения расчетов, связанных с определением изменений совокупной массы защищаемой и незащищаемой частей привода в результате варьирования точности срабатывания АФМ, предложен способ, согласно которому каждая часть привода аппроксимирована непрерывным стержнем, общая эквивалентная масса каждого из которых равна совокупной массе узлов и деталей соответствующих частей привода. Таким образом, совокупная масса каждой части привода поставлена в зависимость от протяженности кинематической цепи привода.

В работе [11] показано, что масса деталей привода машины при изменении точности срабатывания АФМ изменяется приблизительно пропорционально значению $1/K_T^{2/3}$.

Имея в виду данное основание, а также закономерности изменения массы АФМ, согласно данным таблицы, запишем:

$$\frac{M_o(n-1)}{K_T} = M_{\text{общ}} \left(1 - 1/K_T^{2/3}\right), \quad (1)$$

где n – коэффициент кратности при КУ выбранного типа АФМ (см. таблицу); $M_{\text{общ}}$ – совокупная масса узлов и деталей, входящих в защищаемую часть привода машины, включая приводной двигатель:

$$M_{\text{общ}} = pL_{3,ч}, \quad (2)$$

где p – коэффициент пропорциональности, кг/м, определяемый расчетным или экспериментальным способом в зависимости от конкретного состава защищаемой части привода; $L_{3,ч}$ – протяженность защищаемой части привода, м.

Равенство (1) представляет собой уравнение баланса масс АФМ и защищаемой части привода и отражает постоянство их совокупной массы.

Используя соотношение (2) в равенстве (1), которое в данном случае становится уравнением, решим его относительно неизвестного K_T . Имеем:

$$K_T - \sqrt[3]{K_T} = \frac{M_o(n-1)}{M_{\text{общ}}}. \quad (3)$$

Произведем замену в уравнении (3):

$$x = \sqrt[3]{K_T}, \quad (4)$$

после чего уравнение запишем в следующем виде:

$$x^3 - x = \frac{M_o(n-1)}{M_{\text{общ}}}. \quad (5)$$

Неполное кубическое уравнение (5) имеет 3 корня, и при действительных коэффициентах из них один действительный корень, а два других корня – комплексно сопряженные.

Действительный корень запишем в следующем виде:

$$x = \sqrt[3]{\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}} + \sqrt[3]{-\left(\frac{1}{3}\right)^3 + \left[-\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}\right]^2} + \sqrt[3]{\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}} - \sqrt[3]{-\left(\frac{1}{3}\right)^3 + \left[-\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}\right]^2}}. \quad (6)$$

Возвращаясь к исходному неизвестному, согласно соотношению (4) находим:

$$K_T = \frac{M_o(n-1)}{M_{\text{общ}}} + \sqrt[3]{\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}} + \sqrt{-\left(\frac{1}{3}\right)^3 + \left[-\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}\right]^2} + \sqrt[3]{\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}} - \sqrt{-\left(\frac{1}{3}\right)^3 + \left[-\frac{M_o(n-1)}{2M_{\text{общ}}}\right]^2}. \quad (7)$$

Зная исходные данные параметров M_o , n и $M_{\text{общ}}$, можно определить по соотношению (7) требуемое значение коэффициента точности выбранного типа АФМ. Если найденное значение K_T не принадлежит интервалу его значений, указанному в таблице 1, следует выбрать другой тип АФМ с меньшими значениями коэффициента точности и повторить изложенные расчеты.

Второй способ выбора типа АФМ заключается в том, чтобы, сохраняя первоначально принятый тип муфты, изменить место ее установки в кинематической цепи привода, переместив муфту в направлении рабочего органа машины. Тем самым увеличивается протяженность защищаемой части привода и, соответственно, уменьшается его незащищаемая часть.

При этом необходимо учитывать, что указанное перемещение АФМ в кинематической цепи привода, как правило, является ступенчатым, т. е. на расстояние, кратное количеству узлов защищаемой части. С этим связано неизбежное увеличение вращающего момента, действующего в новом месте установки АФМ, если смежный с муфтой узел, расположенный в защищаемой части привода, является понижающей передачей.

С учетом этого увеличиваются M_o и $M_{\text{общ}}$. Если при этом резервы позволяют сохранить первоначально выбранный тип АФМ, то коэффициент n также остается неизменным.

Следуя принципу сохранения постоянной совокупной массы привода машины, можно заключить, что переход одного или нескольких узлов из незащищаемой части в защищаемую часть и возможность уменьшения их массы потребует эквивалентного увеличения массы АФМ.

Положим, что увеличение совокупной массы защищаемой части привода из-за включения в нее узла (нескольких узлов) из незащищаемой части, с учетом снижения

массы включаемого узла (нескольких узлов) за счет действия на них меньших нагрузок, составляет $\Delta M_{\text{общ}}$. Увеличение массы АФМ вследствие повышения вращающего момента, который она передает в новом месте установки, составляет ΔM_o . Поскольку масса АФМ при неизменной точности срабатывания возрастает приблизительно пропорционально передаваемой ею нагрузке, запишем:

$$\Delta M_o = T_n(i_{\text{общ}}\eta_i - 1)K_n, \quad (8)$$

где T_n – вращающий момент, который АФМ передавала на прежнем месте ее установки в приводе машины; $i_{\text{общ}}$ – передаточное отношение механической передачи (передач), переходящей из незащищаемой части привода в защищаемую часть; η_i – общий к.п.д. упомянутой передачи (передач); K_n – коэффициент пропорциональности, кг/(Нм).

Значение коэффициента K_n зависит от типа АФМ, ее конструктивной сложности, точности срабатывания и коэффициента оценки [12].

Увеличение совокупной массы защищаемой части привода машины составляет:

$$\Delta M_{\text{общ}} = \frac{M_i}{K_T^{2/3}}, \quad (9)$$

где M_i – масса механической передачи (передач), переходящей из незащищаемой части привода в защищаемую часть.

Экономия массы M_i с учетом соотношения (9) составляет:

$$\Delta M_i = M_i \left(1 - \frac{1}{K_T^{2/3}}\right). \quad (10)$$

Абстрагируясь на данном этапе исследования от точности срабатывания АФМ и считая совокупную массу привода машины, включая АФМ, неизменной, запишем следующее равенство:

$$\Delta M_o = \Delta M_i,$$

или, с учетом соотношений (8) и (10)

$$T_n K_n [i_{\text{общ}}\eta_i - 1] = M_i \left(1 - \frac{1}{K_T^{2/3}}\right). \quad (11)$$

Учитывая, что масса механической передачи и нагрузка на ее выходном валу

при определенных значениях $i_{\text{общ}}$ и η_i суть величины взаимосвязанные, произведем замену в соотношении (11)

$$T_{\text{п}} i_{\text{общ}} \eta_i = M_i K_1, \quad (12)$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности между массой механической передачи и нагрузкой на ее выходном валу, кг/(Нм).

Существует также связь между массой механической передачи и нагрузкой на ее входном валу. Эта связь проявляется также при определенных значениях $i_{\text{общ}}$ и η_i . Поскольку в соотношении (11) параметр $T_{\text{п}}$ представляет собой именно нагрузку на входном валу механической передачи, будем считать, что связь между параметрами $T_{\text{п}}$ и M_i выражается следующей зависимостью:

$$T_{\text{п}} = M_i K_2, \quad (13)$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности между массой механической передачи и нагрузкой на ее входном валу, кг/(Нм).

С учетом выражений (12) и (13) запишем соотношение (11) в следующем виде:

$$K_1 K_{\text{п}} - K_2 = 1 - \frac{1}{K_{\text{т}}^{2/3}}. \quad (14)$$

Из равенства (14) можно найти значение коэффициента точности АФМ, удовлетворяющее условию сохранения совокупной массы привода машины:

$$K_{\text{т}} = \sqrt{\frac{1}{(1 + K_2 - K_1 K_{\text{п}})^3}}. \quad (15)$$

Результат вычисления значения $K_{\text{т}}$ по соотношению (15) может быть следующим:

- вычисленное значение $K_{\text{т}}$ больше, чем ранее принятое значение для выбранного типа АФМ;
- вычисленное значение $K_{\text{т}}$ меньше, чем принятое значение для выбранного типа АФМ;
- вычисленное значение $K_{\text{т}}$ и ранее принятое значение одинаковы.

В первом и третьем случаях результаты показывают, что выбранный тип АФМ

способен обеспечить сохранение совокупной массы и габаритных размеров привода машины, включая АФМ.

Во втором случае для сохранения совокупной массы и габаритных размеров привода машины, включая АФМ, требуется более высокая точность срабатывания муфты.

В том случае, если конструктивные особенности выбранного типа АФМ позволяют повысить точность ее срабатывания (за счет увеличения КУ обратной связи), целесообразно сохранить данный тип муфты и скорректировать величину $K_{\text{т}}$ в соответствии с соотношением (15).

Однако повышение точности срабатывания АФМ приводит к увеличению ее массы и габаритных размеров, согласно данным таблицы 1. Это сказывается на общей массе привода машины, увеличивает ее свыше установленного предела, что противоречит условию задачи.

Если на данном этапе не ставится задача замены типа АФМ, следует оценить возможность повышения точности срабатывания муфты. При этом появляется возможность уменьшения совокупной массы узлов и деталей защищаемой части привода при одновременном и неизбежном увеличении массы и габаритных размеров АФМ.

Решение задачи приведено выше и осуществляется по соотношению (7).

При невозможности получить вычисленное значение $K_{\text{т}}$, следует заменить выбранный тип АФМ на другой, обладающий более высокой точностью срабатывания. При этом необходимо изучить возможность установки АФМ на первоначальное место в кинематической цепи привода машины.

Последующие действия по выбору точности срабатывания АФМ, с учетом ее массогабаритных характеристик, аналогичны изложенным выше.

Вторая задача при компоновке привода машины заключается в выборе необходимого типа АФМ для привода с отсутствием жестких ограничений по массе и габаритным размерам. Это, однако, не означает, что масса и габаритные размеры привода могут быть произвольными – они ограничиваются требованиями предельных

нагрузок, действующих в узлах и деталях. Для определенности будем считать, что первоначальный вариант компоновочной схемы привода предусматривает установку в нее предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, т.е. муфты неадаптивного типа [1].

При достаточном запасе мощности приводного двигателя коэффициент точности такой муфты вычисляется по формуле:

$$K_{\tau} = f_{\max} / f_{\min}, \quad (16)$$

где $f_{\max}$, $f_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный коэффициенты трения.

Согласно формуле (16), при использовании предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания коэффициент точности может принимать большие значения, причем, гораздо более высокие, чем у АФМ. Соответственно этому, масса и габаритные размеры узлов и деталей привода должны быть увеличены по условию назначения необходимого запаса прочности.

Для рассматриваемого случая использование в приводе машины АФМ взамен предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания может привести к уменьшению габаритных размеров и массы привода.

Если конкретизируется первоначальная задача в плане защиты наиболее слабого звена привода, речь может идти как о выполнении основной функции АФМ (защита от разрушений при перегрузках), так и о возможности уменьшения габаритных размеров и массы привода. Таким образом, решение первоначальной задачи может привести к дополнительному технико-экономическому эффекту.

Установка в приводе АФМ взамен предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания позволяет также уменьшить собственную массу муфты. Действительно, сложившееся в настоящее время мнение о том, что вследствие повышенной конструктивной сложности АФМ обладают большей массой по сравнению с предохранительными фрикционными муфтами обычной точности срабатывания, представляется недостаточно

обоснованным и не имеющим для этого объясняющих фактов.

Предохранительные муфты, как и другие узлы приводов машин, подвержены действиям перегрузок, в связи с чем расчет и проектирование деталей, входящих в конструкции муфт, должен осуществляться с учетом максимальных нагрузок.

Наличие в конструкции АФМ управляющего устройства, более высокая сила натяжения замыкающей пружины и увеличенное число пар трения фрикционной группы, действительно, приводят к увеличению массы муфты. Однако в данном случае необходимо рассматривать АФМ, настроенную на передачу номинального вращающего момента, который вычисляется при минимальном значении коэффициента трения [13].

Положим, что обладающая наименьшей из всех типов АФМ точностью срабатывания муфта Н.Д. Вернера [14] имеет массу, которая связана с массой предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания следующей зависимостью:

$$M_2 = K_{\pi 1} M_1, \quad (17)$$

где M_1 , M_2 – соответственно масса предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания и масса муфты Н.Д. Вернера; $K_{\pi 1}$ – коэффициент пропорциональности (по условию задачи $K_{\pi 1} > 1$).

Соотношение (17) записано при условии равенства друг другу номинальных вращающих моментов упомянутых муфт.

В муфте Н.Д. Вернера при передаче номинального вращающего момента на пары трения фрикционной группы действует распорная сила, стремящаяся отжать пары трения друг от друга, вследствие чего требуется, как правило, увеличение силы натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин). В результате этого необходимо применение более мощной, по сравнению с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания, замыкающей пружины, что влечет за собой увеличение совокупной массы муфты.

Элементы предохранительных муфт, в том числе фрикционных муфт всех типов, при эксплуатации подвергаются воздействию перегрузок, как и другие узлы и детали привода. В связи с этим, расчет их должен производиться с учетом действующих нагрузок.

Предохранительная фрикционная муфта обычной точности срабатывания испытывает в процессе эксплуатации максимальные нагрузки, равные:

$$T_{\max 1} = K_{t1} T_n, \quad (18)$$

где K_{t1} – коэффициент точности муфты; T_n – номинальный вращающий момент муфты.

Максимальные нагрузки, действующие в АФМ, равны:

$$T_{\max 2} = K_{t2} T_n, \quad (19)$$

где K_{t2} – коэффициент точности АФМ.

По условию задачи в выражениях (18) и (19) номинальный вращающий момент T_n принят одинаковым.

Поскольку априори $K_{t2} < K_{t1}$, то $T_{\max 2} < T_{\max 1}$.

При одинаковой номинальной нагрузочной способности сравниваемых муфт значение коэффициента K_{n1} составляет при минимальной точности срабатывания АФМ приблизительно 1,2.

Для сопоставления масс АФМ и предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, с учетом расчета их по действующим нагрузкам, необходимо знать зависимость массы муфты от значения передаваемого ею вращающего момента. С этой целью на основе анализа данных справочной литературы [12] запишем следующее соотношение:

$$M = K_{n2} \sqrt{T_i}, \quad (20)$$

где K_{n2} – коэффициент пропорциональности между массой муфты и вращающим моментом; T_i – текущее значение вращающего момента; M – масса муфты.

По данным литературного источника [12] значение коэффициента K_{n2} выбирается из интервала 1,28...2,22.

Соотношение (20) справедливо и для тех случаев, когда в результате действия перегрузок муфта передает повышенный вращающий момент (в пределах собственной точности срабатывания). В соответствии с этим произведем замену в соотношении (20), используя выражения (18) и (19), и запишем следующие соотношения:

$$M'_1 = K_{n2} \sqrt{K_{t1} T_n}, \quad (21)$$

$$M'_2 = K_{n2} \sqrt{K_{t2} T_n}, \quad (22)$$

где M'_1 , M'_2 – соответственно масса предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания и муфты Н.Д. Вернера с учетом их точности срабатывания.

При $K_{t2} < K_{t1}$ и одинаковом номинальном вращающем моменте T_n справедливо неравенство $M'_1 > M'_2$. Однако при этом следует учитывать соотношение (17), что приводит к следующему равенству:

$$M''_2 = K_{n1} K_{n2} \sqrt{K_{t2} T_n}, \quad (23)$$

где M''_2 – масса муфты Н.Д. Вернера с учетом повышенной, по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания, исходной массы муфты.

Для того чтобы выполнялось условие $M'_1 > M''_2$, из соотношений (21) и (23) находим:

$$K_{t2} < (K_{t1} / K_{n2}^2). \quad (24)$$

Для предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания значение коэффициента точности вычисляется по формуле (16). Для муфты Н.Д. Вернера значение коэффициента точности вычисляется по следующему соотношению:

$$K_t = \frac{f_{\max} [1 + (z-1) C f_{\min}]}{f_{\min} [1 + (z-1) C f_{\max}]}, \quad (25)$$

где z – число пар трения фрикционной группы; C – КУ муфты; $f_{\min}$, $f_{\max}$ – по выражению (16).

Подставляя правые части соотношений (16) и (25) в выражение (24) и решая составленное неравенство относительно неизвестного C , находим:

$$C > \frac{K_{п}^2 - 1}{(z - 1)(f_{\max} - K_{п2}^2 f_{\min})}. \quad (26)$$

Для муфты Н.Д. Вернера, фрикционная группа которой выполнена по схеме «ведущая пара – ведомые пары» [15], ограничение максимального значения КУ имеет следующий вид:

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}. \quad (27)$$

Подставляя ограничение (27) (в форме равенства) в неравенство (26), получаем:

$$z > \frac{K_{п2}^2 (m - 1)}{m - K_{п2}^2}, \quad (28)$$

где m – относительная ширина интервала изменения коэффициента трения:

$$m = f_{\max} / f_{\min}. \quad (29)$$

Учитывая, что, согласно соотношению (29) и формуле (16), $K_{т} = m$, запишем неравенство (28) в следующем виде:

$$z > \frac{K_{п2}^2 (m - 1)}{K_{т1} - K_{п2}^2}. \quad (30)$$

Из соотношения (30) следует, что минимальное число пар трения фрикционной группы муфты Н.Д. Вернера зависит от точности срабатывания предохранительной фрикционной муфты обычной точности.

При $m = K_{т1} = 8$ и $K_{п2} = 1,2$ (см. выше) согласно неравенству (30) имеем $z > 1,56$. Следовательно, при одинаковой номинальной нагрузочной способности масса муфты Н.Д. Вернера меньше, чем масса предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, если $z \geq 2$, что осуществимо в практике применения данной муфты.

Разность между массами сравниваемых муфт можно определить, используя соотношения (21) и (23). Имеем:

$$M_1' - M_2''' = K_{п2} \sqrt{T_n} (\sqrt{K_{т1}} - K_{п1} \sqrt{K_{т2}}). \quad (31)$$

График зависимости $\Delta M(T_n)$ (где $\Delta M = M_1' - M_2'''$), построенный по соотношению (31), приведен на рисунке 3. Кривая 1 построена при $K_{п1} = 1,2$, значение коэффициента $K_{п2}$ варьировалось, в зависимости от значения вращающего момента T_n , в

пределах 1,28...2,22. Значение коэффициента $K_{т1}$ равнялось 8, значение коэффициента $K_{т2}$ вычислялось по соотношению (25) и при $f_{\min} = 0,1$, $f_{\max} = 0,8$, $z = 6$ и $C = 1,25$ составило 2,17.

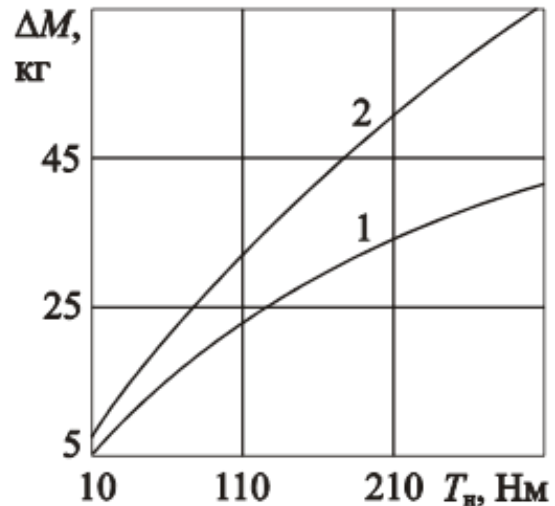


Рисунок 3. Графики экономии общей массы привода при применении муфты Н.Д. Вернера и модифицированной АФМ

График показывает, что с увеличением номинального вращающего момента T_n экономия массы муфты Н.Д. Вернера возрастает примерно в 8 раз (в пределах значений T_n , отложенных на оси абсцисс).

Таким образом, данные графика подтверждают, что, обладая большей массой при исходном номинальном вращающем моменте, муфта Н.Д. Вернера имеет меньшую массу с учетом действующих в ней меньших нагрузок вследствие более высокой точности ее срабатывания (почти в 4 раза по коэффициенту точности). Данное обстоятельство должно учитываться при выборе АФМ и места ее установки в приводе машины.

Анализ соотношения (31) показывает, что разность ΔM зависит от точности срабатывания выбранного типа АФМ. Кроме того, значение ΔM зависит от коэффициентов $K_{п1}$ и $K_{п2}$, значения которых в практике расчетов и проектирования могут отличаться от тех значений, которые были приняты при построении графика на рисунке 3.

Оценим эффективность использования более высокой точности срабатывания

с точки зрения уменьшения собственной массы АФМ и увеличения разности ΔM . В качестве объекта сравнения по-прежнему будем рассматривать предохранительную фрикционную муфту обычной точности срабатывания.

В качестве второго объекта сравнения выберем АФМ второго поколения (модифицированную). Данная муфта обладает особо высокой точностью срабатывания ($K_T=1,08...1,16$). Особо высокая точность срабатывания муфт данного типа объясняется большими (порядка 5...7) значениями КУ, что приводит к существенному снижению нагрузочной способности муфт. Это обуславливает повышенные габаритные размеры и массу АФМ, в связи с чем принято $K_{n1}=1,35$.

Соответственно изменяется и значение коэффициента K_{n2} . Для данной муфты оно составляет 1,72...2,68.

Используя новые значения коэффициентов K_{n1} и K_{n2} в соотношении (31), построим график зависимости $\Delta M(T_n)$ на поле рисунка 3. В качестве одного из исходных данных принимаем $K_{T2}=1,1$. График зависимости показан на рисунке 3 кривой 2.

Кривая 2 показывает, что модифицированный вариант АФМ второго поколения за счет особо высокой точности срабатывания позволяет экономить на собственной массе больше, чем муфта Н.Д. Вернера.

Заключение

Результаты исследования показали, что методически правильный выбор эксплуатационных характеристик АФМ в составе проектируемого привода машины позволяет оптимизировать его компоновочную схему и существенно уменьшить габаритные размеры и совокупную массу привода. На степень уменьшения габаритных размеров и совокупной массы привода значительно влияет точность срабатывания АФМ.

Исследование также показало, что при определенных параметрах АФМ, обладающей самой низкой точностью срабатывания, можно добиться уменьшения ее собственной массы по сравнению с массой предохранительной фрикционной муфты

обычной точности срабатывания при одинаковой номинальной нагрузочной способности.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании приводов металлопрокатного производства в части выбора типа АФМ, которая в наибольшей степени обеспечивает оптимальное соотношение эффективности защиты привода от перегрузок и приемлемых массогабаритных характеристик привода.

Выводы

1. В настоящее время отсутствует в полном объеме методика выбора типа АФМ, которая обеспечивала бы, применительно к конкретному приводу машины, наилучшее сочетание эффективной защиты от перегрузок узлов и деталей привода и оптимальные массогабаритные характеристики привода.

2. Максимальное значение перегрузки на выходном валу АФМ зависит от скорости нарастания перегрузки на рабочем органе машины, а также от физико-механических характеристик незащищаемой части привода.

3. Разработаны схемы действия перегрузок в незащищаемой и защищаемой частях привода машины, которые показывают локальные нагрузки, действующие в узлах привода.

4. При установке АФМ непосредственно на входном валу рабочего органа машины муфта защищает всю кинематическую цепь привода, включая приводной двигатель и рабочий орган, если последний имеет высокую крутильную жесткость.

5. Сформулированы общие принципы выбора типа АФМ, включающие технические характеристики привода машины, указание о наиболее слабом звене привода и месте его расположения в кинематической цепи, особенности АФМ при изменении точности срабатывания и места ее установки.

6. Обобщены и систематизированы характеристики различных типов АФМ, необходимые для рационального выбора муфты, включая новый показатель – коэффициент увеличения габаритных размеров

и массы АФМ, связывающий характеристики муфт и точность их срабатывания.

7. Первичным показателем, на основании которого осуществляется исходный выбор типа АФМ, является номинальный вращающий момент, значение которого зависит от предполагаемого места установки муфты в кинематической цепи привода.

8. Вторичным показателем при выборе типа АФМ служит установленная, согласно техническому заданию, совокупная масса и габаритные размеры привода машины. При выполнении данного условия должна учитываться точность срабатывания АФМ.

9. Найдена зависимость для вычисления необходимой точности срабатывания АФМ на основе известных показателей – исходной массы муфты и заданной совокупной массы привода машины.

10. Найдена зависимость для вычисления коэффициента точности АФМ, удовлетворяющего условию сохранения исходной совокупной массы привода машины при изменении места установки муфты в кинематической цепи привода.

11. Уточнение типа АФМ необходимо в том случае, когда в результате определения ее коэффициента точности согласно п. 10 необходима муфта, обладающая более высокой точностью срабатывания, чем исходный тип АФМ, возможности повышения точности срабатывания которой исчерпаны.

12. Повышенная точность срабатывания АФМ позволяет уменьшить их собственную массу при одинаковой с предохранительной фрикционной муфтой обычной точности срабатывания номинальной нагрузочной способности.

13. Найдено минимальное значение КУ муфты Н.Д. Вернера, при котором ее собственная масса меньше, чем масса предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания, при одинаковой номинальной нагрузочной способности. В частности, указанное ограничение КУ становится менее жестким при увеличении числа пар трения муфты.

14. Найдено ограничение минимального числа пар трения муфты Н.Д. Вернера, при котором ее собственная масса меньше,

чем масса предохранительной фрикционной муфты обычной точности срабатывания.

15. Экономия собственной массы муфты Н.Д. Вернера по отношению к предохранительной фрикционной муфте обычной точности срабатывания возрастает с увеличением номинального вращающего момента.

16. В абсолютном выражении экономия собственной массы АФМ увеличивается при повышении точности срабатывания.

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт // ГОУ Рост. гос. акад. с-х. машиностроения, Ростов на Дону, 2008. 148 с.
2. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения / Шишкарёв М.П. // Математические методы в технике и технологиях: материалы XVIII междунар. науч. конференции. Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. Т. 5. С. 72–76.
3. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел / Шишкарёв М.П. // Математические методы в технике и технологиях: материалы XVIII междунар. науч. конференции. Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. Т. 5. С. 68–72.
4. Шишкарёв М.П. Компонентные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // Вестник машиностроения. 2003. № 7. С. 7–12.
5. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Исследование эксплуатационных характеристик адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 21–26.
6. Шишкарёв М.П. Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. 2005. № 7. С. 16–19.

7. Шишкарёв М.П. Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2004. № 4. С. 3–7.
8. Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт / Шишкарёв М.П. // Математические методы в технике и технологиях: материалы XVI междунар. науч. конференции. Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ, 2003. Т.5. С. 231–234.
9. Математическая модель устойчивости движения привода с адаптивной фрикционной муфтой / Шишкарёв М.П. // Математические методы в технике и технологиях: материалы XV междунар. науч. конференции. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. Т. 8. Секция 8 «Компьютерная поддержка технологических процессов и производственных систем». С. 70–75.
10. Шишкарёв М.П. Условие высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 7. С. 46–48.
11. Шишкарёв М.П. Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 5. С. 18–24.
12. Шишкарёв М.П. Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 6–9.
13. Шишкарёв М.П. Уточнение характеристики обратной связи адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2005. № 11. С. 12–13.
14. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 3. С. 36–42.
15. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 13–15.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Received 16.02.2018

ADAPTIVE FRICTION COUPLINGS FOR DRIVES OF STEEL ROLLING FACILITIES

Abstract

There are developed diagrams of overloads acting in non-protected and protected parts of the drive of a rolling mill, which show local loads in drive units. It is found that maximum overload on an output shaft of the adaptive friction coupling depends on a rate of increase of overload on an actuating element of the mill, and on physical and mechanical parameters of a non-protected part of the drive. The paper contains general principles followed, when selecting a type of AFC, including technical parameters of the mill drive, the weakest element of the drive and its location in a kinematic chain, features of AFC in case of changes in its operation accuracy and its place of installation.

Keywords: adaptive friction coupling, operation accuracy, friction coefficient, machine drive, the weakest element



УДК 67.02

И.В. Горлов, Е.В. Полетаева
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»
г. Тверь, Российская Федерация
E-mail: gorloviv@yandex.ru

М.Г. Рахутин
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
г. Москва, Российская Федерация
Дата поступления 28.04.2018

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОРФЯНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Машиностроительное производство в настоящее время развивается в нестабильной внешней среде, когда объём производства сокращается, а для загрузки производственных мощностей приходится искать дополнительные заказы зачастую в непрофильных для данного предприятия направлениях. Особенно это актуально для торфяного машиностроения. Из-за падения добычи торфа заказы на производство торфяных машин сократились почти до нуля, что не позволяет использовать традиционные серийные технологии. При переходе к единичным технологиям растут затраты на производство и как правило снижается качество продукции, что приводит к снижению конкурентоспособности. В такой ситуации необходимо внедрение многономенклатурного производства на основе групповых технологий, что требует применения гибких производственных систем (ГПС), обладающих широкими технологическими возможностями и обеспечивающих быструю переналадку при переходе к изготовлению новой детали.

Ключевые слова: торфяные машины; многономенклатурное производство; групповые технологии; гибкие производственные системы.

Введение

В настоящее время машиностроительное производство нашей страны функционирует в условиях нестабильности, когда объёмы изготовления традиционных изделий сокращаются, что приводит к значительному изменению производственной программы. Особенно это характерно для торфяного машиностроения, где производство торфяного оборудования почти полностью остановилось, и профильные предприятия были вынуждены перейти к изготовлению строительных, дорожных, сельскохозяйственных и других машин. В таких условиях соотношение между различными видами машиностроительной продукции кардинально изменяется во времени, и как следствие это требует применения многономенклатурного производства на основе групповых технологий [5-7]. Для перехода к такому способу производства требуется

глобальное техническое перевооружение, основанное на применении станков с числовым программным управлением (ЧПУ) [8]. Такой подход позволяет решать проблемы нестабильности производственного цикла. Многономенклатурное мелкосерийное производство имеет ряд особенностей, без учета которых невозможно добиться требуемой эффективности. Высокая вариативность большинства производственных задач, их сложность и значительная степень концентрации операций, выполняемых вручную, а также высокая трудоемкость технологической подготовки производства приводит к снижению эффективности изготовления машин. Такие особенности ранее не учитывались при реализации производственных процессов на соответствующем технологическом уровне, что не позволяло применять средства автоматизации на всех этапах производства.

Оборудование в многономенклатурном производстве

Всё большее применение оборудования с ЧПУ расширяет круг выполняемых производственных задач, связанных с изготовлением, хранением, загрузкой, контролем и транспортированием изделий, но, к сожалению, типовых решений бывает не всегда достаточно для необходимой эффективности многономенклатурного производства. Для формирования требований к станкам, применяемым в многономенклатурном производстве необходимо провести анализ основных этапов технологического процесса изготовления деталей с точки зрения максимально возможного использования программных систем управления.

При невысокой серийности штучные заготовки чаще всего изготавливают из сортового проката. Так как большинство заготовительных операций достаточно трудоемки и сложны с точки зрения автоматизации, их часто выносятся за пределы ГПС.

При подготовке технологических баз для деталей типа «вал» в серийном производстве используются фрезерно-центровальные станки с механическими системами управления, и при переходе к выпуску новой детали требуется трудоемкая переналадка. Поэтому данное оборудование не используется в мелкосерийном производстве.

В последнее время стали появляться фрезерно-центровальные станки с числовым программным управлением, которые обладают унифицированными механизированными одно- и многоместными установочными приспособлениями [9]. Эти приспособления позволяют без существенных дополнительных затрат проводить обработку однотипных заготовок установленного типоразмера. Например, фрезерно-центровальный обточной станок с ЧПУ NPF120N. Данный станок используется для двухсторонней обработки торцов, сверления центровых отверстий и обтачивания цилиндрических крайних поверхностей (длиной до 50 мм) деталей типа «вал» различной конструкции с автоматической или ручной загрузкой заготовок (рисунок 1).



Рисунок 1. Общий вид фрезерно-центровального обточного станка с ЧПУ NPF120N

Управление перемещениями основных рабочих органов станка происходит с помощью системы ЧПУ, следовательно, время для переналадки при переходе к следующей партии деталей уменьшается в несколько раз. Данный станок может подключаться к локальным промышленным сетям, что обеспечивает возможность встраивания в ГПС.

На следующем этапе производства выполняется токарная обработка. При относительно невысоком объеме производства выгодно использовать подход, основанный на концентрации обработки на одной операции. Такой подход может быть реализован с помощью многоцелевых станков с ЧПУ, обладающих широкими технологическими возможностями. Например, при изготовлении деталей типа тел вращения лучше использовать обрабатывающие центры на основе станков токарной группы, таких как TC1720Ф4 (рисунок 2) [10, 11].



Рисунок 2. Обрабатывающий центр TC1720Ф4

Данный токарный обрабатывающий центр является многофункциональным устройством, позволяющим выполнять не только различную токарную обработку, но и сверление, фрезерование поверхностей,

расположенных в разных плоскостях деталей – тел вращения. Важнейшим преимуществом таких обрабатывающих центров является повышенная производительность, которая связана со значительным сокращением времени на выполнение вспомогательных переходов. При этом, в общем времени обработки деталей, доля приходящаяся на переустановку и закрепление заготовок существенно сокращается. Основой многоцелевых возможностей таких обрабатывающих центров является многофункциональная револьверная головка, в которую устанавливаются различные инструменты, в том числе и приводные [12]. Это позволяет выполнять точение, сверление, нарезание резьбы, обработку расположенных в разных плоскостях отверстий, а также фрезерование. Использование такого оборудования позволяет существенно сократить, или полностью отказаться от фрезерных операций.

Однако, если используется групповая технология и загрузка оборудования возрастает, то для выполнения требуемой программы выпуска необходимо приобретать дополнительные станки. Это может быть такой же обрабатывающий центр, но стоимость его достаточно велика, а обеспечить все технологические возможности фрезерного станка он не может. Поэтому для большего по объёму производства используется другой подход, основанный на декомпозиции обработки. За каждым станком закрепляется определённый набор операций, при этом не требуется высоких технологических возможностей, характерных для другого типа оборудования, но расширяются возможности связанные с конкретной операцией. Например, использование вертикально-фрезерного обрабатывающего центра ФС85МФЗ позволяет выполнять многоинструментальную фрезерную обработку сложных криволинейных поверхностей (рисунок 3).



Рисунок 3. Обрабатывающий центр ФС85МФЗ

Данный обрабатывающий центр позволяет вести сразу несколько видов обработки в одном рабочем цикле: фрезерование, сверление, растачивание, резбонарезание и многое другое. Станок ФС85МФЗ обеспечивает высокую скорость обработки, точность позиционирования и надежность, что делает его отличным инструментом для серийного производства.

Если в группе деталей имеются валы-шестерни, то для обработки зубчатого контура эффективней использовать зубообрабатывающие станки с ЧПУ. Например, такие как, зубофрезерный станок с ЧПУ 53С11ВФ5 (рисунок 4).



Рисунок 4. Зубофрезерный станок с ЧПУ 53С11ВФ5

Универсальный зубофрезерный станок с ЧПУ модели 53С11ВФ5 предназначен для обработки цилиндрических и червячных зубчатых колес в условиях единичного или серийного производства. Фрезерование цилиндрических зубчатых колес осуществляется червячной модульной фрезой мето-

дом обката или дисковой модульной фрезой с использованием метода копирования с единичным делением. При нарезании червячных колес обработка происходит с помощью червячной фрезы радиальным врезанием или с использованием тангенциальной подачи.

В том случае если объем зубофрезерных операций небольшой, то зубчатые

венцы можно обрабатывать методом копирования на фрезерном станке с использованием цифровой делительной головки.

Для выполнения отделочных операций в условиях многономенклатурного производства необходимо использовать круглошлифовальные станки с ЧПУ, такие как RSM 500 CNC (рисунок 5).



Рисунок 5. Круглошлифовальный станок с ЧПУ RSM 500 CNC

Назначение данных станков – обработка методом шлифования как наружных цилиндрических или конических, так и профильных поверхностей деталей. Данные станки могут быть использованы в мелкосерийном производстве. Также на станках можно устанавливать специальные устройства для внутреннего шлифования. Обработка может проводиться как с врезным, так и продольным шлифованием последовательно нескольких поверхностей.

При реализации групповой обработки деталей необходимо учитывать общую загрузку станков и по возможности организовывать производство с закреплением отдельных станков за черновой и чистовой обработкой. Это позволит обеспечивать стабильно высокое качество изготовления

на протяжении длительного интервала эксплуатации.

Оснастка в многономенклатурном производстве

Для обеспечения требуемой гибкости лучше применять унифицированные групповые приспособления, которые позволяют устанавливать детали группы на технологическое оборудование без значительной переналадки. При обработке деталей типа «вал» в качестве основных приспособлений в большинстве случаев используют самоцентрирующие механизированные патроны, центровые приспособления, призмы различных конструкций, делительные головки с компьютерным управлением. В групповых приспособлениях необходимо предусматривать устройства для автомати-

ческой переналадки в зависимости от конкретной детали, что позволяет без участия оператора изменять настраиваемые параметры технологической оснастки. Такой подход может быть реализован при идентификации деталей. В промышленности все чаще встречаются технологии идентификации объектов на основе RFID-меток, что обеспечивает сокращение количества ручных операций при переналадке технологического оборудования и снимает вопросы о размерах партий деталей, а также порядке их запуска. Такие технологии обеспечивают автономную (вне технологического оборудования) настройку режущего инструмента, установку, а также выверку заготовок и отладку станочной оснастки. Использование таких технологий позволяет по-новому подходить к автоматизации многономенклатурного производства.

Однако применение такого подхода для подготовки технологической оснастки не всегда может быть возможно и обосновано, следовательно, проблема переналадки остается значимой. Отчасти эта проблема может быть решена с помощью фрезерно-центровальных обточных станков с ЧПУ, так как в этом случае при подготовке технологических баз ведется также обработка цилиндрических концов деталей, что в большинстве случаев позволяет использовать их в качестве базовых поверхностей на последующих операциях. Кроме того, закрепление детали на обработанные с одной установки цилиндрические поверхности, имеющие несущественные отклонения расположения относительно центровых отверстий снижают погрешности установки на последующих операциях. Таким образом, появляется возможность проведения последующей черновой обработки оставшихся поверхностей без переустановки, что позволяет сократить количество необходимых операций и, следовательно, повышает эффективность производства.

Для деталей типа «вал» в условиях группового производства в качестве основных станочных приспособлений на различных операциях предпочтительно использовать самоцентрирующие механизированные патроны и центры, которые можно устанавливать не только на токарные и

круглошлифовальные станки, но и на цифровые делительные головки, установленные на столах фрезерных станков с ЧПУ.

Цифровые делительные головки позволяют существенно расширить возможности фрезерных станков с ЧПУ. При установке на цифровые делительные головки появляется возможность обработки различных поверхностей деталей без дополнительной переустановки с высокой точностью взаимного расположения. Кроме того, достигается единство использования технологических баз, что позволяет уменьшить межоперационные припуски и повысить точность обработки. В качестве такой технологической оснастки можно использовать цифровую делительную головку RSM 100 (рисунок 6).



Рисунок 6. Цифровая делительная головка RSM 100

Использование такого подхода позволяет сократить номенклатуру станочных приспособлений и сократить затраты на переналадку при переходе к производству следующей партии деталей. Так как ход кулачков большинства патронов превышает 20 мм, то в них можно устанавливать заготовки с большим диапазоном диаметров, что позволит проводить обработку значительной номенклатуры деталей типа «вал» без смены установочных приспособлений.

Заключение

Машиностроение в настоящее время развивается в условиях сокращения объемов и расширения номенклатуры изделий, что вызывает дополнительные затруднения в организации производства. Для повыше-

ния производительности изготовления изделий и улучшения их качества необходимо применение групповых технологий на основе ГПС, что обеспечит необходимое качество многономенклатурного производства и потребует перехода его на новый более высокий уровень. При этом необходимо учитывать особенности многономенклатурных технологий, а именно: возрастание значения ГПС вследствие большой вариативности производственных задач; применение станков с ЧПУ, обладающих значительной гибкостью; использования быстро-переналаживаемой групповой технологической оснастки, отвечающей современным требованиям многономенклатурного производства, что обеспечит снижение объема ручных операций в процессе переналадки при переходе к производству новой партии деталей; отказ от применения в автоматизированных системах планирования производства подхода «оптимальной» серийности для уменьшения количества и трудоёмкости переналадок оборудования, что обеспечит решение проблемы повышения эффективности производства. Еще одним необходимым фактором повышения эффективности многономенклатурного производства является широкое применение систем автоматизированного проектирования, которые позволяют значительно снизить затраты на производство и сократить время на внедрение новых технологий [13-15]. Использование групповых технологий в многономенклатурном производстве и применение станков с ЧПУ позволит освоить выпуск широкой гаммы торфяных, строительного-дорожных, сельскохозяйственных и других машин на высоком технологическом уровне с требуемым качеством и конкурентными ценами.

Библиографический список

1. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Рахутин М.Г. Использование групповых технологий при производстве и ремонте торфяных машин // Механическое оборудование металлургических заводов. 2017. №2 (9). С.22-26.
2. С. Синго. Быстрая переналадка. Революционная технология оптимизации производства. Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций». Перевод с английского под ред. Ю.Адлера. Москва, ЦентрОргПром. 2006. 343 с.
3. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2011. С. 87-90/
4. Куприянова Т.М., Растимешин В.Е. Реализация технологии быстрой переналадки: российский опыт info@tpmcenter.ru
5. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Осипов В.С. Разработка группового технологического процесса для деталей типа «вал» // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь. 2016. № 1 (29). С. 35–40.
6. Новоселецкий Б.В., Редько Р.Г., Редько О.И. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях // Луцкий национальный технический университет. Луцк. 2014. № 47. С. 125-130.
7. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах // Вестник современных технологий. Севастополь. 2016. №1 (1). Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет. С. 4 – 9.
8. Мещерякова В. Б, Стародубов В. С. Металлорежущие станки с ЧПУ Сер. Бакалавриат: учебное пособие. Москва. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. 336 с.
9. Сивцев Н.С. Приспособления для многооперационных станков с ЧПУ: учебное пособие для студентов вузов: в 2-х частях Редактор: И. В. Ганеева. -

Том. Часть 1. Системы переналаживаемых приспособлений. Ижевск. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2014. 96 с.

10. Пушинин В. Н., Ерохин И. А., Корнев Д. Ю., Скиба В. Ю. Станочное оборудование, основанное на компенсировании нескольких технологических операций // Актуальные проблемы в машиностроении. Новосибирск. 2014. № 1. С. 245 – 255.
11. Звягина Е.А., Миронов А. Оптимизация процесса механической обработки детали на основе применения быстропереналаживаемого технологического оборудования // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. ответственный редаткор Горохов А.А.. Издательство: Закрытое акционерное общество "Университетская книга" (Курск), 2014. С. 224 – 229.
12. Бережной С.Б., Чумак П.В., Чумак И.А. Типы инструментальных магазинов многоцелевых станочных комплексов // В сборнике научных

статей VI международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 55-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. КВВАУЛ им. А.К. Серова. Издательство: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг" (Краснодар), 2016. С. 323 – 327.

13. Бухалков М. И., Кузьмин М. А., Павлов В.В. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении // Организатор производства. Воронежский государственный технический университет. Воронеж . 2010. Том: 47 № 4 С. 27-32.
14. Литовка, Ю.В. Автоматизация технологической подготовки производства // Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2003. 33 с.
15. Чижов М.И., Бредихин А.В. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж. 2011. Т. 7, № 12–1. С. 24–26.

Information about the paper in English

I.V. Gorlov, E.V. Poletaeva

Tver State Technical University, Tver, Russia

M.G. Rakhutin

The National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

E-mail: shishkarevm@mail.ru

Received 28.04.2018

PROCESS EQUIPMENT, WHEN MANUFACTURING PEAT MACHINES AT A MULTIPRODUCT PLANT

Abstract

Currently, the machine industry is under development in non-steady external environment, when the production volume decreases, and to ensure utilization of facilities, you have to search for additional orders in areas, which are non-core for the plant. It is especially relevant for peat machinery. As a result of a decreased peat output, orders for peat machines went down almost to zero; thus, conventional mass production techniques cannot be used. When transferring to single-piece production, production costs increase and, as a rule, its quality decreases, entailing decreased competitiveness. In such a case, it is required to introduce manufacturing of a wide range of products by applying batch techniques [1], using flexible manufacturing systems (FMS) with wide processing capabilities ensuring a quick changeover, when transferring to production of a new part [2-4].

Keywords: peat machines, multiproduct plant, batch techniques, flexible manufacturing systems



УДК 67.02

Е.А. Максимов¹, Е.П. Устиновский²

¹ЗАО «Интрай»

²ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: maksimov50@mail.ru

Дата поступления 04.04.2018

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРАВКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ С УЧЕТОМ ПРОГИБА И ИЗНОСА БОЧЕК РОЛИКОВ

Аннотация

Разработана методика расчета параметров правки, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов правильной машины (РПМ).

Математическое моделирование показало, что при изгибе и износе бочек роликов по их длине изгибающие моменты снижаются от середины к краям листа. Изменение изгибающих моментов необходимо учитывать при расчетах технологических параметров правки: усилия правки и крутящих моментов.

Проведены исследования износа по длине бочки роликов на семироликовой РПМ. Представлено уравнение регрессии износа по длине бочки ролика.

Ключевые слова: правка толстых листов, роликовая правильная машина, прогиб и износ бочек роликов, методика расчета параметров правки.

Введение

Одним из путей совершенствования технологии производства металлических строительных конструкций, способствующих повышению их надежности, является разработка оптимальных технологических параметров правки листового проката, обеспечивающих нормативную величину его отклонения от плоскостности. Так, в соответствии с ГОСТ 23119 -2007 допуски на прогиб листовой стали толщиной от 2 до 10 мм после правки на РПМ должны составлять не более 3-10 мм.

В трудах отечественных и зарубежных ученых Е.Н. Мошнина, А.З. Слонима, Л.А. Сони́на, А.Х. Винокурского, И.В. Недорезова [1-7], разработана методика расчета параметров правки листового проката, в соответствии с которой толщина листа и диаметр ролика - роликовой правильной машины (РПМ) принимаются постоянными по длине бочки.

На практике бочки роликов подвергаются упругому прогибу под действием усилия правки, а также радиальному износу

под действием нагрузки со стороны обрабатываемого листового проката, что необходимо учитывать при настройке РПМ [8-9].

Целью работы является уточнение методики расчета параметров правки листового проката на РПМ с учетом прогиба и износа бочек роликов по их длине.

Основная часть

Рассмотрим более подробно методику расчета параметров правки с учетом прогиба и износа бочки ролика РПМ.

Задаемся законом изменения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа от второго ролика к последнему при последовательном движении листа от первого к седьмому ролику

$$k_{si} = k_2 \left(1 - \frac{i-2}{n-3}\right), \quad (1)$$

где k_2 - максимальная величина коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа для второго ролика,

i - порядковый номер ролика в РПМ,

n - число роликов в РПМ.

Из предположения упруго - пластического изгибающего момента для всех роликов РПМ определяем величину упруго-пластического изгибающего момента при изгибе листа для i -того ролика:

$$M_{Syi} = M_y (1 + k_{Si}), \quad (2)$$

где $M_y = \sigma_s \frac{B h^2}{6}$ - упругий момент внутренних сил,

σ_s - предел текучести материала листа,

B, h - ширина и толщина листа.

Усилие правки определим по формуле [2]:

$$P_i = \frac{2}{t} M_{Syi}, \quad (3)$$

где t - величина шага роликов в РПМ.

В общем случае рабочий ролик представляет собой балку постоянного сечения, находящуюся под нагрузкой, приложенной по середине бочки и реакций, приложенных в опорах ролика. В результате действия нагрузки ролик подвергается упругому прогибу, максимальному в середине бочки. В этом случае профиль бочки ролика будет отличаться от цилиндрического, что приводит к изменению параметров правки по ширине листа.

Максимальную величину упругого прогиба по середине бочки ролика от действия усилия правки определим по формуле:

$$f = \frac{P B^3}{384 E J_c} \left[8 \left(\frac{a}{B} \right)^3 - \left(\frac{a}{B} \right) + 1 \right] \quad (4)$$

где P - усилие правки,

a - расстояние между точками приложения реакций в подшипниках,

B - ширина листа,

E - модуль упругости материала роликов,

J_c - момент инерции сечения бочки ролика.

На рисунке 1 приведена схема семироликовой РМП СКМЗ для правки листа толщиной 20 мм – 50 мм из стали СтЗ, 09Г2С, 09Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, 16Г2АФ.

Техническая характеристика семироликовой правильной машины РПМ представлена в таблице 1.

Расчет коэффициента проникновения пластической деформации по толщине листа, усилия правки и прогиба по середине бочки ролика для семироликовой РПМ при

правке листа толщиной $h = 20$ мм, шириной $B = 2500$ мм из стали 10ХСНД представлен в таблице 2.

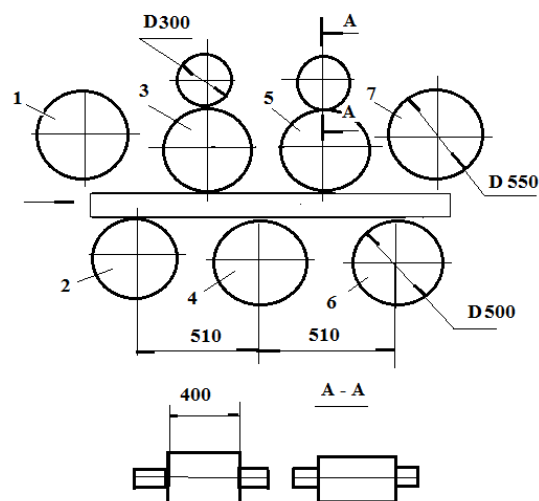


Рисунок 1. Схема семироликовой РПМ:
1-7 – номер ролика

Таблица 1

Техническая характеристика
семироликовой правильной машины РПМ

Максимальная ширина листа, мм	3450
Максимальная толщина листа, мм	45
Расчетный предел текучести проката, МПа	330
Скорость правки, м/мин	9,6
Количество рабочий роликов, шт	5
Количество направляющих роликов, шт	2
Диаметр правильных роликов, мм	500
Диаметр направляющих роликов, мм	550
Длина роликов, мм	3600
Шаг между осями роликов, мм	510
Ход верхних правильных роликов, мм	30-130

Таблица 2

Результаты расчета прогиба по середине бочки ролика для семироликовой РПМ при правке листа из стали 10ХСНД
($B = 2500$ мм, $h = 20$ мм)

№ ролика	k_{Sy}	P	f
-	-	кН	мм
1*	-	-	-
2	0,97	1202,7	3,07
3	0,925	601,2	2,39
4	0,859	558,4	2,85
5	0,773	502,3	2,57
6	0,667	217,9	1,76
7*	-	-	-

*на 1-м и 7-мом роликах деформации листа не происходит.

Анализ данных, приведенных в таблице 2 для семироликовой РПМ показал, что при правке листа $h = 20$ мм, $B = 2500$ мм из стали 10ХСНД усилие правки изменяется от 217,9 кН до 1202,7 кН, что приводит к значительному прогибу бочек роликов (до 3,07 мм).

Эффективность правки и качество листового проката зависит также от состояния поверхности рабочих роликов и степени их износа. При правке листов на РПМ в результате износа рабочих роликов по длине бочки происходит изменение диаметров роликов и, как следствие, изменение толщины листа, которая входит в уравнения для расчета изгибающих моментов. Исследование износа по длине бочки роликов проводилось на семироликовой РПМ. В качестве объекта был выбран второй ролик, так как на нем наблюдается наибольшая нагрузка. Профиль роликов после эксплуатации измеряли прибором контроля формы модели 08500 (класс точности А) по 30 равноудаленным точкам по длине бочки.

В результате экспериментов были построены профилограммы износа бочки по длине ролика.

На рисунке 2 приведены профилограммы износа бочки по длине для второго ролика семироликовой РПМ в зависимости от длины обрабатываемого листового проката.

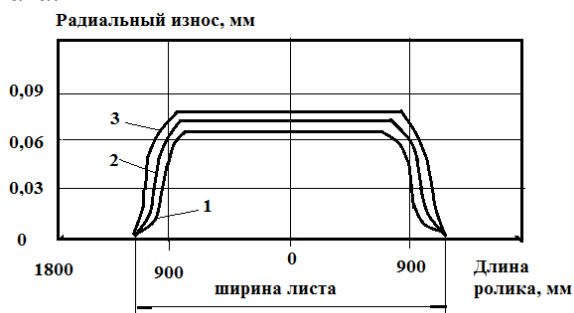


Рисунок 2. Профилограмма износа бочки по длине ролика для семироликовой РПМ в зависимости от длины обрабатываемого листового проката: 1- $L = 22000$ м, 2- $L = 23000$ м, 3- $L = 25000$ м

Анализ регрессионных уравнений для расчета износа бочек валков при прокатке полос [8,9] позволил выделить основные

факторы и разработать структуру уравнения регрессии для расчета износа бочек роликов РПМ.

Из рисунка 2 следует, что износ бочки ролика на участке равной ширине листа практически равномерен, что указывает на равномерность износа ролика по длине бочки на участке, контактирующем с обрабатываемым металлом.

После замеров износа и расчета параметров правки было составлено уравнение регрессии для вычисления износа роликов на правильной машине

$$\Delta Z_{\text{изн}} = -0,1347 + 9,013 \times 10^{-5} + 2,52 \times 10^{-6} L + 0,00010 \sigma_s, \quad (5)$$

где P - усилие правки, кН;

L - суммарная длина листов, обрабатываемых на РПМ, м;

σ_s - предел текучести металла листов, МПа;

Кроме проверки достоверности коэффициентов уравнения (5) были определены показатели значимости входящих в них факторов с использованием t - критерия Стьюдента, а также коэффициент множественной корреляции $R=0,95$ и критерий Фишера $F=22,7785$. Анализ показал, что все факторы, входящие в уравнения регрессии (5), являются значимыми.

Для расчета параметров правки необходимо знать истинный предел текучести материала листов. Истинный предел текучести материала листов определяли из диаграммы растяжения, полученной при испытаниях образцов на машине ИМ-4М в соответствии с ГОСТ 1497-84 (рисунок 3).

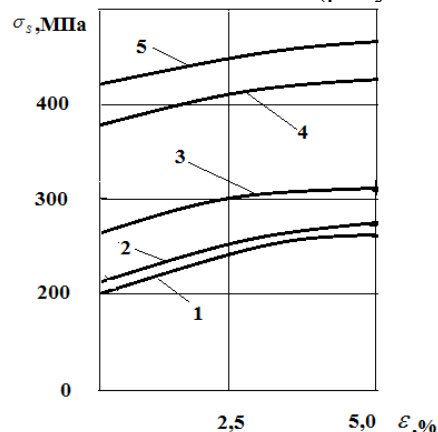


Рисунок 3. Диаграмма растяжения образцов из стали: 1, 2- СтЗсп; 3- 09Г2С; 4- 10ХСНД, 5- 16Г2АФ

Суммарную величину прогиба и износа бочки ролика по его длине определяли по формуле

$$\Delta = f + \Delta Z_{из}, \quad (6)$$

где f - упругий прогиб по середине бочки ролика от действия усилия правки, $\Delta Z_{из}$ - максимальный износ бочки ролика.

Для « j » - того сечения по ширине листа толщину листа записывали в виде:

$$h_i = h_c - \Delta \left(\frac{j \Delta y}{B/2} \right)^2, \quad (7)$$

где h_c - толщина листа по его середине,

B - ширина листа.

Пластический, упругий и упругопластический изгибающие моменты для цилиндрической бочки ролика определяли по формулам [1,2].

$$M_s = \sigma_s \frac{B h^2}{4}$$

$$M_y = \sigma_s \frac{B h^2}{6} \quad (8)$$

$$M_{sy} = M_y (1 + k_j)$$

где k_j - коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листа. Подставляя величину толщины листа из зависимости (7) в формулы (8), получим

$$M_{si}^* = \sigma_s \frac{B h_i^2}{4}$$

$$M_{yi}^* = \sigma_s \frac{B h_i^2}{6} \quad (9)$$

$$M_{s yi}^* = M_{yi} (1 + k_j)$$

В уравнениях (9) величина пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов определяется с учетом прогиба и износа бочки ролика. Изменение изгибающих моментов по ширине листа с учетом прогиба и износа бочки ролика, рассчитанных по зависимостям (9), приведено на рисунке 4.

Из рисунка 4 следует, что при прогибе и износе бочек роликов по их длине изгибающие моменты снижаются от середины к краям листа. Изменение изгибающих моментов необходимо учитывать при расчетах технологических параметров правки: усилия правки, крутящих моментов.

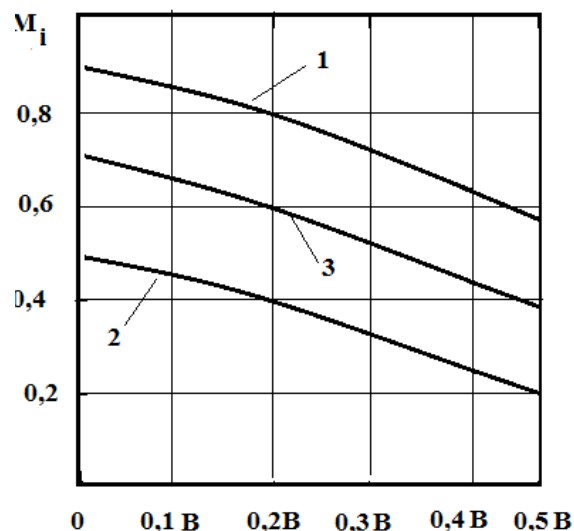


Рисунок 4. Изменение изгибающих моментов по ширине листа:

1- пластический момент, 2- упругий момент, 3- упруго-пластический момент

С учетом зависимостей (8), (9) относительную разность пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа с учетом изгиба и износа запишем в виде

$$\frac{\Delta M_s}{M_s} = -2 \frac{\Delta}{h_c} + \left(\frac{\Delta}{h_c} \right)^2,$$

$$\frac{\Delta M_y}{M_y} = -2 \frac{\Delta}{h_c} + \left(\frac{\Delta}{h_c} \right)^2, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta M_{ys}}{M_{ys}} = \frac{\Delta M_y}{M_y} (1 + k_j) .$$

Результаты расчета относительной разности пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа из стали 10ХСНД с учетом прогиба и износа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Относительная разность пластического, упругого и упруго-пластического изгибающих моментов между серединой и краем листа с учетом прогиба и износа бочек роликов (сталь 10ХСНД)

№	Типоразмер	$\frac{\Delta M_s}{M_s}$	$\frac{\Delta M_y}{M_y}$	$\frac{\Delta M_{sy}}{M_{sy}}$
-	мм	%	%	%
1	10x2000	-15	-15	-15
2	20x2500	-20	-20	-20
3	30x2500	-23	-23	-23
4	40x2500	-31	-31	-31

Из таблицы 3 следует, что с увеличением толщины и ширины листа, выправляемого на РПМ, относительная разность пластического, упругого и упругопластического изгибающих моментов между серединой и краем листа снижается. Так, для $B \times h = 20 \times 2500 \text{ мм}$ величина $\Delta M_s / M_s$, $\Delta M_y / M_y$, $\Delta M_{sy} / M_{sy}$ снижается на 20 %, для $B \times h = 30 \times 2500 \text{ мм}$ величина $\Delta M_s / M_s$, $\Delta M_y / M_y$, $\Delta M_{sy} / M_{sy}$ снижается на 23 %.

Следовательно, для повышения точности расчетов величину изгибающих моментов, полученную из предположения постоянства толщины листа по его ширине рассчитанную по зависимости 8, необходимо увеличивать, применяя поправочный коэффициент « k_p »

$$\begin{aligned} M_s &= k_p M_s^*, \\ M_y &= k_p M_y^*, \\ M_{sy} &= k_p M_{sy}^* \end{aligned} \quad (11)$$

где M_s^* , M_y^* , M_{sy}^* - величина изгибающих моментов, полученная с учетом действия прогиба и износа бочки ролика.

M_s , M_y , M_{sy} - величина изгибающих моментов, полученная из предположения постоянства толщины листа по его ширине (при цилиндрической бочке ролика),

k_p - поправочный коэффициент.

Величина поправочного коэффициента для расчетов изгибающих моментов с учетом прогиба и износа роликов РПМ представлена на рисунке 5.

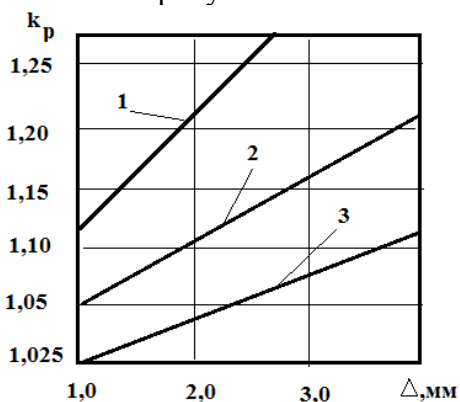


Рисунок 5. Величина поправочного коэффициента для расчетов изгибающих моментов с учетом прогиба и износа роликов РПМ (1- $h = 10 \text{ мм}$, 2- $h = 20 \text{ мм}$, 3- $h = 40 \text{ мм}$)

Из рисунка 5 следует, что для толщины листа, изменяющейся от 20 мм до 40 мм, величина поправочного коэффициента изменяется от 1,025 до 1,25. Аналогичную методику для расчета поправочных коэффициентов необходимо использовать для повышения точности расчетов параметров правки (усилия правки, изгибающих моментов) при настройке правильной машины.

Заключение

1. Уточнена методика расчета параметров правки толстых листов, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов правильной машины (РПМ).

Установлено, что наличие прогиба и износа по длине бочек роликов приводит к снижению изгибающих моментов, создаваемых РПМ. Для корректного расчета изгибающих моментов, разработана методика расчета поправочного коэффициента, учитывающая прогиб и износ по длине бочек роликов.

2. Разработана структура регрессионной модели износа бочек роликов на РПМ при правке листового проката. Модель учитывает усилие правки, суммарную длину листов, пропорциональную контактной пути, а также истинный предел текучести металла листов. Определены коэффициенты уравнения регрессии для ролика, испытывающего наибольшую нагрузку при правке листового проката. Регрессионная модель износа бочек роликов используется для расчета параметров правки, а также выработки технических и технологических решений по компенсации прогиба и износа по длине бочек роликов правильной машины.

Библиографический список

1. Мошнин Е.Н. Правка и гибка полос / Е.Н.Мошнин. – М.: Машиностроение, 1987. –132 с.
2. Слоним А.З. Машины для правки листового и сортового проката / А.З. Слоним, Л.А. Сонин. – М : Металлургия, 1987. –132 с.
3. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на

- роликовых машинах Часть 1 . Методика расчета // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката – 2007. – №10. – С.34–37.
4. Винокурский А.Х. Область выправляемого сортамента листов и полос на роликовых машинах Часть 2 . Примеры использования методики // А.Х. Винокурский, И.В. Недорезов, Т.А. Мезрина. – Производство проката – 2007. – №10. – С.36–38.
 5. Хольцмюллер Г. Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы. –2007. –№ 6. – С.58-62.
 6. Бодини Л. Улучшение плоскостности толстых листов благодаря прогнозированию и оптимизации производства/ Л. Бодини, О.Эрих., М. Краухазен // Черные металлы. –2008. –№ 11. – С.35-38.
 7. Кнапп С. Правка растяжением и изгибом и ее влияние на свойства холоднокатаных полос из качественных сталей / С.Кнапп, П.Функе, К. Киргоф, К. Вупперман // Черные металлы. 1995. – №2. – С. 49–53.
 8. Григорян Г.Г. Разработка статистической модели износа рабочих валков чистовой группы стана 2000 горячей прокатки / Г.Г.Григорян, В.А. Аленов, Р.Л. Шаталов, В.Е.Никитин, В.И. Скорупский, Н.П. Пличко // Изв. Вуз. Черная металлургия –1979. –№1. – С.88-91.
 9. Шаталов Р.Л. Регрессионная модель износа валков при горячей прокатке полос из сложнолегированных медных сплавов / Р.Л. Шаталов, Н.В.Характеров, С.А.Карпов – Производство проката – 2006. –№2. – С.42–45.

Information about the paper in English

E.A. Maksimov, E.P. Ustinovsky
 Federal State Autonomous Educational Institution of
 Higher Education “South Ural State University
 (national research university)”
 FSAEIHE SUSU (NRU)
 Chelyabinsk, Russia
 Received 04.04.2018

CALCULATING PLATE LEVELING PARAMETERS FOR A ROLLER LEVELER SUBJECT TO BENDING
 AND WEAR OF ROLLER BODIES

Abstract

The paper presents a technique developed to calculate leveling parameters subject to bending and wear of bodies of rollers of the roller leveler.

A mathematical simulation showed that in case of bending and wearing of roller bodies along their length, bending moments decreased from the center to edges of plates. Such change in bending moments should be taken into account, when calculating leveling parameters: leveling force and torques.

Wear along bodies of rollers on a seven-roller leveler was under study.

The paper contains a regression equation with regard to wear along the roller body.

Keywords: plate leveling, roller leveler, bending and wear of roller bodies, technique to calculate leveling parameters



УДК 67.02

В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.А. Плащинский
Санкт-Петербургский горный университет
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: SlavaPlash@yandex.ru
Дата поступления 26.04.2018

СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАЛИПАНИЯ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Аннотация

Предотвращение налипания жидкого алюминия к поверхности проточки медного кристаллизатора предлагается достигать получением на поверхности расплава оксидной пленки необходимой толщины. В качестве окислителя может быть использован марганцовокислый калий KMnO_4 в виде водного раствора, положительный эффект от применения которого подтвержден экспериментально. Расчетно-экспериментальным путем определена необходимая толщина слоя KMnO_4 на медной поверхности ($\sim 0,3$ мкм), взаимодействие с жидким алюминием которого приводит к образованию на поверхности расплава оксидной пленки толщиной, достаточной для предотвращения налипания алюминия к меди. Необходимый расход раствора G_{KMnO_4} , подаваемого для разбрызгивания в проточке кристаллизатора для образования слоя KMnO_4 указанной толщины, определяется выбранной концентрацией раствора, периметром Π проточки и линейной скоростью перемещения ее поверхности V при вращении литейного колеса. (При концентрации KMnO_4 равной, например, 0,3% и параметрах кристаллизатора $\Pi \sim 0,5$ м, $V \sim 0,38$ м/с $G_{\text{KMnO}_4} = 23$ л/ч.)

Ключевые слова: медный кристаллизатор, жидкий алюминий, наросты, оксидная пленка, раствор марганцовокислого калия

Введение

Одним из факторов, существенно снижающих ресурс медного кристаллизатора литейной машины агрегата непрерывного литья и прокатки алюминиевой катанки, является налипание алюминиевого расплава к поверхности проточки кристаллизатора с формированием после затвердевания наростов алюминия, ухудшающих качество поверхности заготовки [1]. Удаление наростов при производстве осуществляется, как правило, механической зачисткой проточки абразивным материалом, при которой, наряду с налипшим алюминием, удаляется и поверхностный слой кристаллизатора, что приводит к утонению его стенок. При уменьшении их до определенной толщины кристаллизатор выбраковывают.

Для предотвращения указанного налипания поверхность проточки на отечественных производствах смазывают, как правило, животным жиром. Также для этой цели используют твердые смазки, масла,

эмульсии, охлаждающие жидкости, в том числе и хлорсодержащие [2,3,4], применение которых или недостаточно эффективно или ограничено из-за неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

В этой связи разработка эффективного и сравнительно недорогого способа защиты кристаллизатора от налипания жидкого алюминия является актуальной задачей. В настоящей работе предлагается один из вариантов ее решения.

Обоснование технического решения

В соответствии с технологической схемой агрегата получения катанки, представленной на рисунке 1, расплавленный алюминий с температурой 700-730 °С поступает из миксера в литейную ванночку (1), через носик которой подается в проточку банджа (2) водоохлаждаемого литейного колеса кристаллизатора (4) с температурой стенки $\sim 120-150$ °С, и охватывается сверху стальной лентой (5). Совершая 3/4 оборота с кристаллизатором, расплав

внутри проточки затвердевает и в виде непрерывного слитка (6) подается на прокатный стан. Поверхность освободившейся от алюминия проточки с помощью башмака

(7) смазывается животным жиром и до места подачи расплава контактирует с воздухом, подвергаясь окислению [5, 6, 7].

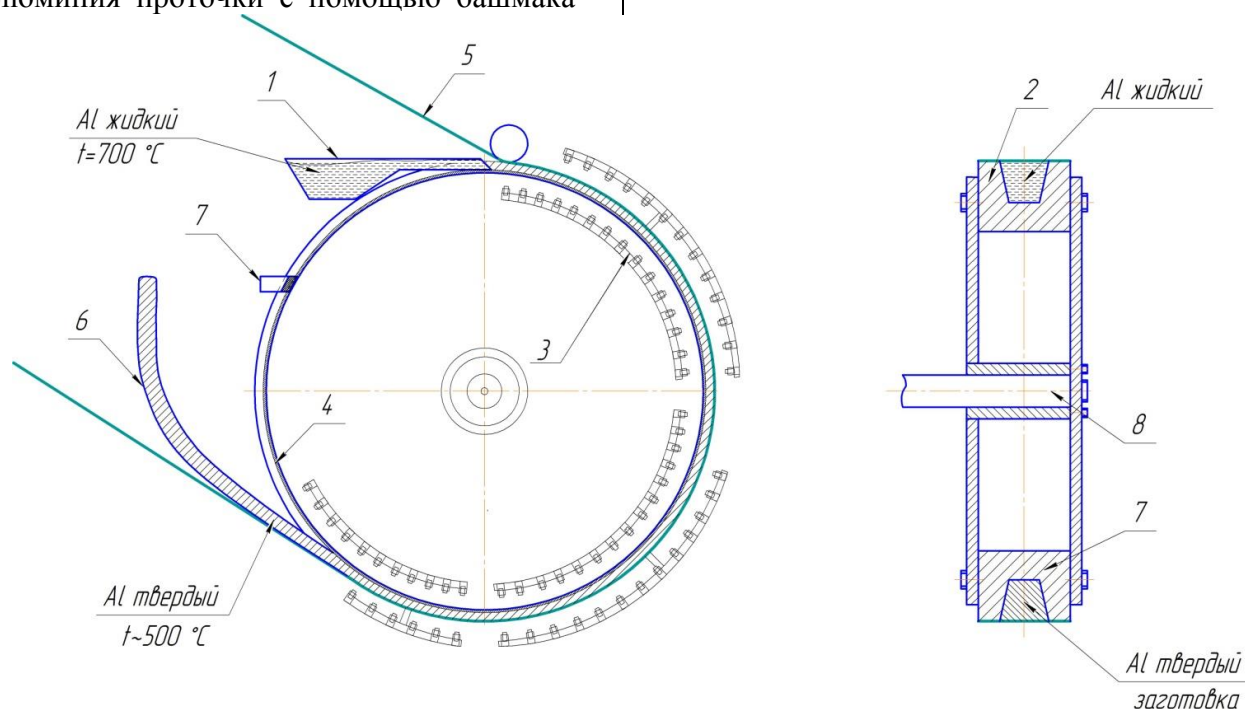


Рисунок 1. Схема кристаллизатора литейной роторной машины:

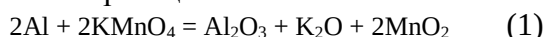
1- литейная ванночка, 2 – бандаж кристаллизатора, 3 – форсунки для разбрызгивания воды, 4 - литейное колесо, 5- стальная лента, 6 – алюминиевый слиток, 6- башмак с промасленной ветошью

При обосновании технического решения исходили из данных [8, 9], что при совершенном контакте чистых (т. е. не содержащих оксидов на поверхности) твердых металлов с жидкими их взаимодействие приводит к установлению между ними адгезионной связи (в силу металлических свойств), даже несмотря на возможное отсутствие растворимости между данными металлами. Наличие оксидной пленки на твердой металлической поверхности для одних жидких металлов резко ослабляет межметаллическое взаимодействие, для других – сохраняет на высоком уровне [10,11]. Как правило, последнее имеет место в случае жидкого металла, имеющего сильное сродство к кислороду [8], каким в нашем случае и является алюминий. При этом его адгезия к оксиду твердого металла растет с уменьшением термодинамической стабильности оксида, т. е. с уменьшением сродства к кислороду металла, образующего этот оксид. Поскольку образующиеся на поверхности кристаллизатора оксиды

меди (CuO , Cu_2O) обладают низкой термодинамической стабильностью [12], следует ожидать высокой адгезии жидкого алюминия, как к чистой, так и к окисленной медной поверхности, что и наблюдается в процессе эксплуатации кристаллизатора, где расплав прилипает к окисленной медной поверхности.

В то же время известно, что при контакте жидкого алюминия с кислородом и кислородсодержащими окислителями на поверхности расплава мгновенно образуется оксидная пленка Al_2O_3 [13], которая обладает высокими прочностными и защитными свойствами [14]. В этой связи можно было предположить, что, для предотвращения налипания жидкого алюминия к поверхности кристаллизатора, на расплаве до его контакта с медной поверхностью необходимо нарастить оксидную пленку толщины, достаточной для предотвращения установления адгезионной связи между расплавом и медной подложкой. Использование для такой цели в качестве окисляю-

щего агента кислорода воздуха, подаваемого в зазор между носиком литейной ванночки и поверхностью проточки, представлялось технически неосуществимым из-за возможности забивки указанного зазора продуктами окисления. После анализа химических реагентов, способных мгновенно вступать в реакцию с жидким алюминием, не оказывая негативного влияния на процесс кристаллизации расплава, в качестве такого окислителя был выбран марганцовокислый калий KMnO_4 , в виде водного раствора, взаимодействующий с жидким алюминием по реакции:



с образованием на его поверхности пленки, состоящей из оксидов алюминия, калия и марганца.

**Экспериментальная проверка
технического решения и оценка
необходимого количества окислителя**

Образцы, вырезанные из медной проволоки ($d = 1$ мм) с заострениями на конце,

выдерживали в термостате при температуре $\sim 150^\circ\text{C}$, как температуре поверхности проточки кристаллизатора в момент контакта с расплавом, в течение времени (~ 1 мин), необходимого для полного их прогрева и окисления поверхности. В другой термостат, нагретый до 700°C (температуры расплава в литейной ванночке), помещали навеску (~ 10 г) из проката технического алюминия и выдерживали ее в графитовом тигле до полного расплавления и нагрева до температуры термостата. Заостренные оконечности образцов окунали в расплав с последующим осмотром на наличие следов налипшего алюминия к их поверхности. Другую часть нагретых образцов погружали в воду или раствор KMnO_4 различной концентрации, опять нагревали до 150°C , окунали в расплав и подвергали осмотру. Вид оконечности образцов после испытаний представлен на рисунке 2.



а



б



в



г

Рисунок 2. Вид поверхности образцов после контакта с расплавом алюминия: без обработки (а), с предварительным окунанием в воду (б), тоже в 2% раствор KMnO_4 (в), тоже в 3% его раствор (г)

Было обнаружено, что окунание нагретых медных образцов в расплав приводит к появлению на их поверхности пленки алюминия (см. рисунок 2, а), крепко сцепленной с медной подложкой и удаляемой только с ее поверхностным слоем. Предварительное погружение образцов в воду и раствор KMnO_4 концентрации 1-2 % картину процесса не изменяет (см. рисунок 1, а, б). В момент погружения образцов в раствор наблюдается вскипание воды в окружающем их локальном объеме жидкости, поверхность извлеченных из раствора образцов принимает слабо малиновый цвет. В то же время, начиная с концентрации 3%, последующее погружение образцов в расплав не приводит к налипанию на них жидкого металла, что может служить экспериментальным подтверждением благоприятного воздействия остающегося на образцах марганцовокислого калия на способность меди предохранять свою поверхность от налипания жидкого алюминия. Осмотр мест контакта расплава с медной подложкой, подвергнутой обработке 3% раствором, не выявил каких либо специфических особенностей в виде поверхностей затвердевшего расплава и подложки.

Толщину слоя δ_{KMnO_4} , остающегося на образце после погружения в раствор указанной концентрации, устанавливали в допущении, что вся теплота Q , выделившаяся при охлаждении образца от $T_1=150^\circ\text{C}$ до $T_2=100^\circ\text{C}$, как температуры прекращения кипения воды, расходуется на испарение воды из раствора, а все количество KMnO_4 , содержащееся в объеме испарившейся воды, остается на поверхности ($S_{\text{обр}} = 35 \text{ мм}^2$) погруженной части образца.

Тогда масса выкипевшей воды:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = C_{p_{\text{Cu}}} M_{\text{Cu}} (T_1 - T_2) / L = 1 \cdot 10^{-6} \text{ кг},$$

где $C_{p_{\text{Cu}}}$ – теплоемкость меди ($385 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$) [16];

M_{Cu} – масса погруженной части образца ($0,142 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$);

L – теплота парообразования воды ($2,260 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$).

Соответственно, масса KMnO_4 , оставшаяся на медной поверхности, после выкипания воды из 3 % раствора, составляет $0,03 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$, а толщина слоя:

$$\delta_{\text{KMnO}_4} = M_{\text{KMnO}_4} / (S_{\text{обр}} \rho_{\text{KMnO}_4}) = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ м} (0,32 \text{ мкм}),$$

где ρ_{KMnO_4} – плотность KMnO_4 ($2700 \text{ кг}/\text{м}^3$) [17].

В соответствии с (1) такой толщине слоя KMnO_4 соответствует толщина слоя оксида Al_2O_3 :

$$\delta_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \delta_{\text{KMnO}_4} \cdot \frac{M_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{2 \cdot M_{\text{KMnO}_4}} \cdot \frac{\rho_{\text{KMnO}_4}}{\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ м} (0,07 \text{ мкм}),$$

где $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, M_{KMnO_4} – молекулярная масса Al_2O_3 ($0,102 \text{ кг}/\text{кмоль}$) [17] и KMnO_4 ($0,158 \text{ кг}/\text{кмоль}$) [17];

$\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – плотность Al_2O_3 ($3990 \text{ кг}/\text{м}^3$) [17].

Можно отметить, что толщина оксидной пленки близка к максимальной ее толщине, что образуется на поверхности алюминия в процессе его нахождения на воздухе [$\sim 0,2 \text{ мкм}$] [14].

Технологическое оформление технического решения

Водный раствор KMnO_4 заданной концентрации предлагается непрерывно разбрызгивать с необходимым расходом $G_{\text{р-ра}}$ на поверхность проточки кристаллизатора перед узлом подачи жидкого металла. Попадая на нагретую (до $T \sim 150^\circ\text{C}$) поверхность массивного кристаллизатора, вода из раствора моментально выкипает и к моменту контакта с расплавом на поверхности проточки остается слой перманганата, рассчитанной выше толщины ($\delta_{\text{KMnO}_4} = 0,32 \text{ мкм}$). Величина $G_{\text{р-ра}}$ определяется выбранной концентрацией KMnO_4 (% KMnO_4), геометрическими параметрами проточки и линейной скоростью перемещения ее поверхности V при вращении литейного колеса:

$$G_{\text{р-ра}} = (\delta_{\text{KMnO}_4} \cdot \rho_{\text{KMnO}_4} \cdot \Pi \cdot V) \cdot \frac{\% \text{ KMnO}_4}{100\%};$$

где Π – периметр проточки.

При выборе концентрации KMnO_4 равной, например 0,3%, необходимый расход раствора для кристаллизатора ЛПА-АК 1,5 с параметрами $\Pi = 0,5 \text{ м}$, $V = 0,38 \text{ м}/\text{с}$, составит 23 л/ч. Подачу и разбрызгивание раствора с таким расходом могут обеспе-

чить агрегат электронасосный дозировочный мембранный фирмы «ТМЗ», модель НДГ 1,0 РЭ 40/25 ($G_{\text{номин.}} = 40$ л/час; $P_{\text{макс}} = 25$ бар; $N = 0,25$ кВт) [18] и плоскоструйная форсунка фирмы ВКТ, модель CU 7622-110 08 ($G_{\text{макс}} = 30$ л/час; угол распыла 110° ; диаметр отверстия 0,8 мм) [19].

Представленное техническое решение, обеспечивая защиту поверхности кристаллизатора от налипания алюминия, является доступным и недорогим в исполнении. Поскольку оксидная пленка будет наноситься на поверхность расплава, без какого либо динамического воздействия исключается ее попадание в объем расплава, что могло бы негативно сказаться на качестве затвердевшего металла.

Библиографический список

1. Гридин А. Ю. Влияние налипания алюминиевого сплава на профиль поверхности инструмента при бесслитковой прокатке/А. Ю. Гридин //Обработка материалов давлением. -2013. - № 4 (37). -с.160
2. Масло для смазки кристаллизатора машин для непрерывного литья: Пат. 75294С2, Украина: МПКВ22D 11/07. / Оверко Т.А., Стахурский А.Д., Гаврюшенко Р.И., Сергеев С. Л., Котляр Е.Е, Македонский О.А., Сергеева О.В., Шапошник А.В., Печенкина Е.В; заявитель и патентообладатель ОАО «Азовские смазки и масла».- N 20041210004; заявл.06.12.2004; опубл. 15.03.2006., 6 с.
3. Смазка для улучшения качества поверхности литого алюминия и метод: Пат. 2006089268 США: МПКВ22D 11/07. / Стьюарт П.А (США), Англин Д.Р. , Ритчер Р.Т, Вайзерман Л.Ф., Рейнольдс Б.С., Вайнидж Д.К., Харт Д.В; заявитель и патентообладатель «ALCOA INC».- N 11\19685711; заявл. 04.08. 2005; опубл. 27.04.2006. Бюл. No 27. -14 с.
4. Смазка для улучшения качества поверхности литого алюминия и метод: Пат. 2007019438A2 США: МПКВ22D 11/07. / Стьюарт П.А (США), Англин Д.Р. , Ритчер Р.Т, Вайзерман Л.Ф., Рейнольдс Б.С., Вайнидж Д.К., Харт Д.В; Бохайчик Д., Ферразоли Т. заявитель и патентообладатель «ALCOA INC» ».- N PCT/US2006/030714; заявл. 04.08. 2006; опубл. 15.02.2007., Бюл. No 27. - 39 с.
5. Курдюмов. А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов [и др.]; под ред. В.Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с.
6. Добаткин В.И. Слитки алюминиевых сплавов: монография/ В.И. Добаткин-Свердловск: Гос. науч.-технич. изд-во лит. по черн. и цветн. металлургии, 1960. -170 с.
7. Корушко В.С. Исследование, разработка и совершенствование оборудования и технологии литейно-прокатных агрегатов по производству алюминиевой катанки: Дис. канд техн. наук. Москва. 1999.-56 с.
8. Шауцуков А.Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам/ А.Г. Шауцуков / Прикладная физика. - 2006 - №5,- с. 16
9. Губанов А. И. Теория адгезии двух любых металлов/ФММ. 1977. Т. 43. Вып. 1. С. 15—21.
10. Найдич Ю. В., Костюк Б. Д., Колесниченко Г. А., Шайкевич С. С. Смачивание в системе металлических расплав—тонкая металлическая пленка—неметаллическая подложка/ В сб.: Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и границ их раздела. — Киев. 1975. С. 15—27.
11. Карашаев А. А., Задумкин С. Н. Межфазная поверхностная энергия на границе контакта разнородных металлов/ В сб.: Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. — Нальчик, 1965. С. 79—84.
12. Кубашевский О. Окисление металлов и сплавов: монография/О.Кубашевский, Б. Гопкинс— М.: Металлургия, 1965. — 428 с.
13. Ангал. Р. Коррозия и защита от коррозии: учебное пособие/ Р.Ангал – 2-е

- изд.- Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2014. - 344с.
14. Бенар Ж. Окисление металлов: монография в 2-х т./Ж.Бенар М: Изд-во «Металлургия», 1969.-Т.2. - 421с.
15. Смирнова О.В. Пособие по биоорганической химии: учебное пособие часть 1/ О.В. Смирнова-В: изд-во кафедры общей и биологической химии ВНМУ им. Н.И.Пирогова, 2009.-369 с.
16. Ларикиов Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник/ Л.Н. Ларикиов, Ю.Ф. Юрченко - Киев: Наукова думка, 1985. - 439 с.
17. Зефиоров А.П. Термодинамические свойства неорганических веществ : справочник / под общ. ред. д-ра техн. наук А.П. Зефиорова. - М. : Атомиздат, 1965. - 460 с., 1 л. табл. : граф. ; 22 см. - Библиогр.: с. 459-460
18. Талнахский механический завод. Агрегаты электронасосные дозировочные герметичные мембранные [Электронный ресурс]. URL: http://www.dosnasos.ru/production/nasos_ndg (дата обращения 12.04.2018).
19. ВКТ- производство форсунок [Электронный ресурс]. URL: <http://rusforsunka.ru> (дата обращения 12.04.2018).

Information about the paper in English

**V.I. Bolobov, A.P. Batalov,
V.A. Plashchinsky**
Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia
Received 04.04.2018

METHOD OF PREVENTING LIQUID ALUMINUM FROM STICKING TO THE SURFACE OF A COPPER MOLD

Abstract

Preventing liquid aluminum from sticking to the surface of a copper mold groove is achieved by applying an oxide film with the required thickness on the surface of a metal bath. A water solution of potassium permanganate KMnO_4 can be used as an oxidizer, whose positive influence was proved with tests.

By means of calculations and experiments, we determined a required thickness of a KMnO_4 layer on the copper surface ($\sim 0.3 \mu\text{m}$), whose interaction with liquid aluminum entails an oxide film, formed on a surface of the metal bath, with a thickness preventing aluminum from sticking to copper. A required flow rate of solution GKMnO_4 sprayed in the mold groove to form a KMnO_4 layer of the specified thickness is calculated by a selected solution concentration, the groove perimeter P and the linear speed of movement of its surface V , when rotating a casting wheel. For example, for the KMnO_4 solution concentration equal to 0.3% and mold parameters $P \sim 0.5 \text{ m}$, $V \sim 0.38 \text{ m/s}$, $\text{GKMnO}_4 = 23 \text{ l/h}$.

Keywords: copper mold, liquid aluminum, build-up, oxide film, potassium permanganate solution



УДК 621. 771. 261

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

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

Аннотация

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

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

Введение

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

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

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

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

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

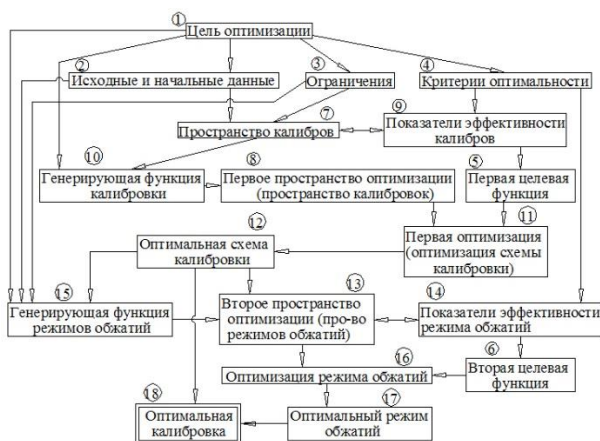


Рисунок 1. Блок-схема оптимизации

Основная часть

Выбор оптимальной схемы швеллерной калибровки представляет последовательность выполнения следующих этапов.

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

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

Рисунок 2. Фрагмент «Матрицы швеллерных калибров»

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

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

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

Таблица 1

Типы схем швеллерных калибровок

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

Таблица 2

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

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

Таблица 3 .

Классификация развернутых схем швеллерных калибровок (ТСК 2)

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

Таблица 4

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

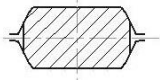
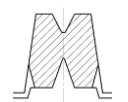
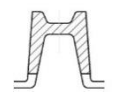
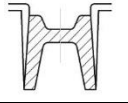
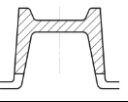
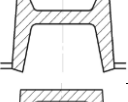
Признак классификации	Наличие контрольного калибра	
Виды	Без контроля длины полки (ТСК=31)	С контролем длины полки (ТСК=32)

Таблица 5

Классификация комбинированных схем швеллерных калибровок (ТСК4)

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

Блочная структурная схема швеллерной калибровки

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рисунок 3. Фрагмент графа связи «Формообразующие калибры» G3

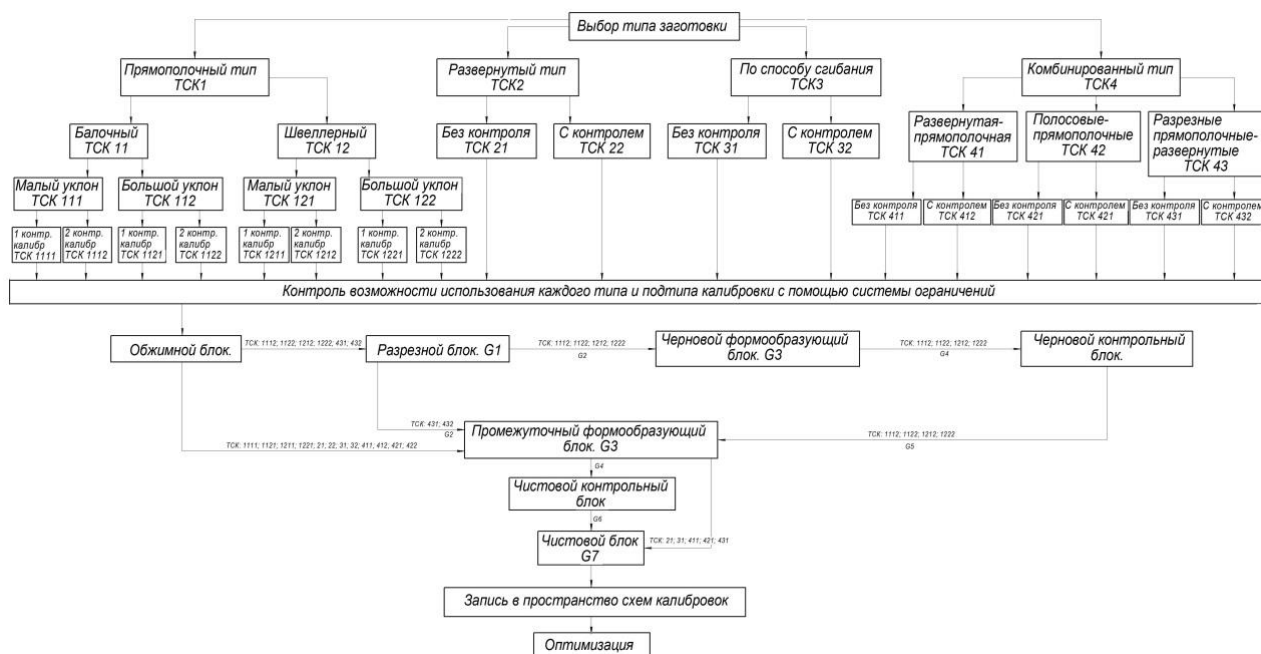


Рисунок 4. Алгоритм построения пространства схем швеллерных калибровок

Таблица 7

Фрагмент системы ограничений

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

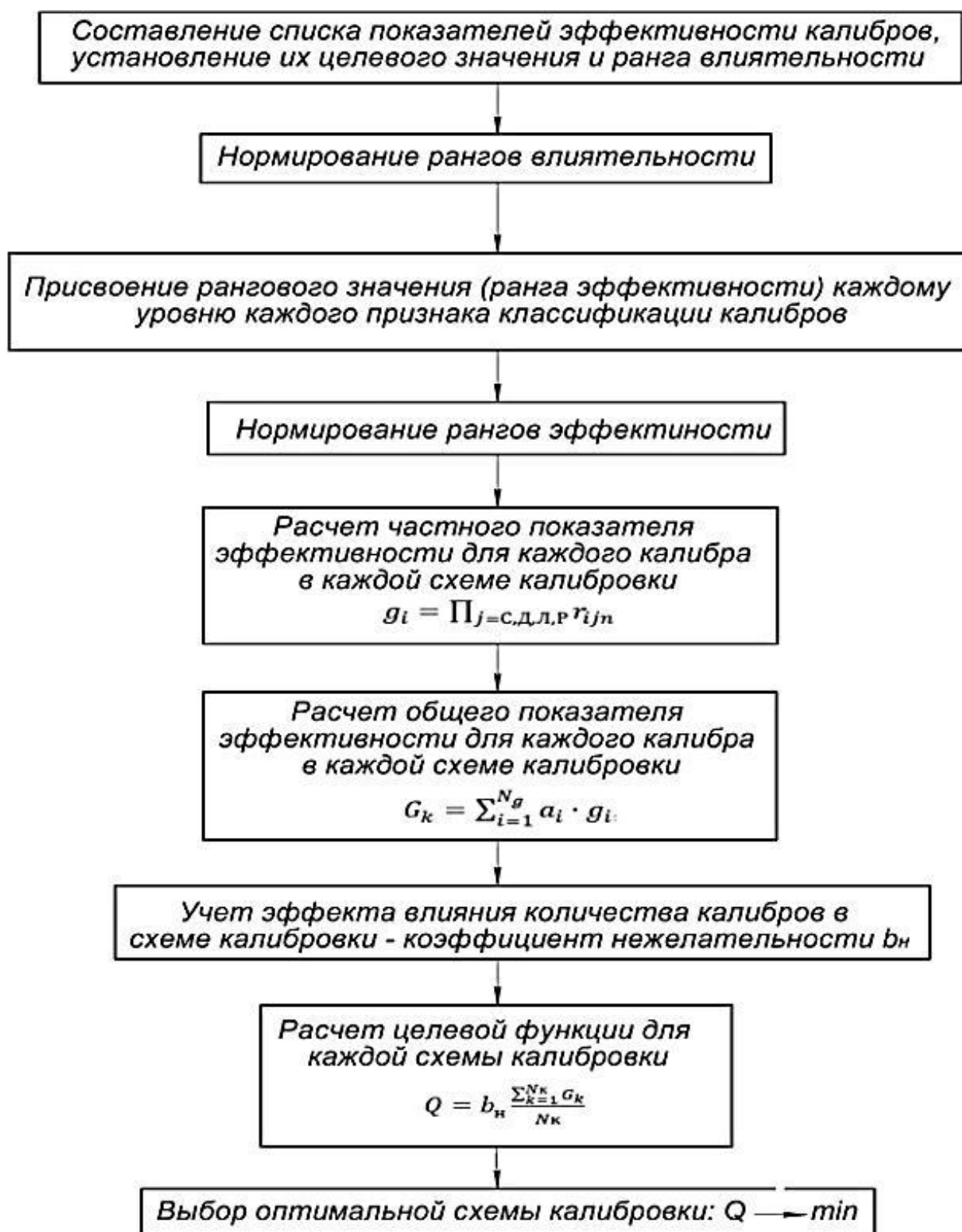


Рисунок 5. Блок-схема формирования целевой функции

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

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

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

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

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

Таблица 8

Показатели эффективности калибров g_i входящие в целевую функцию.

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

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

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

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

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

Пример нормирования рангов приведен в таблице 8.

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

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

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

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

где N_g – количество используемых показателей эффективности.

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

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

где N_k – количество калибров в схеме калибровки.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Заключение

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

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

Библиографический список

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

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

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

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

Information about the paper in English

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

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

Yekaterinburg, Russia

Received 04.04.2018

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

Abstract

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

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

ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению материалов представляемых для публикации

1. Материалы предоставляются в электронном виде, оформленные в программе MS Word 97-2003.
2. Объем представленных материалов должен быть не менее 6-ти страниц (в режиме оформления одной колонкой на листах формата А4), включая рисунки и таблицы.
3. Формат листа: А4 (210х297 мм).
4. Межстрочный интервал: одинарный.
5. Размер полей слева, справа и сверху страницы 18 мм, снизу 20 мм.
6. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру страницы.
7. Шрифт текста: Times New Roman, размер 12 пт.
8. Отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 10 мм.
9. Формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается, размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов.
10. Рисунки должны быть вставлены в текст и обязательно представлены в виде отдельного файла в формате jpeg, tiff, bmp с разрешением не менее 300 dpi. Наличие подписуточной надписи обязательно.
11. Не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу.
12. Структура текста.
 - 12.1. Индекс УДК.
 - 12.2. Имя, отчество и фамилия авторов, жирный шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт.
 - 12.3. Наименование организации.
 - 12.4. Город, страна.
 - 12.5. Контактный адрес электронной почты (E-mail).
 - 12.6. Название (должно быть набрано прописными буквами не в режиме CAPS LOCK (SHIFT)).
 - 12.7. Аннотация.
 - 12.8. Ключевые слова.
 - 12.9. Введение.
 - 12.10. Основная часть.
 - 12.11. Заключение (Выводы).
 - 12.12. Библиографический список.
13. Библиографический список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на литературный источник заключаются в квадратные скобки. Библиографическое описание регламентировано ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Материалы для публикации направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, кафедра «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования».

Контактные телефоны: (3519) 29-85-07, 29-84-51.

E-mail: momz-magtu@yandex.ru, momz-magtu@mail.ru с указанием темы электронного письма «Журнал МОМЗ».

Сайт журнала: www.momz.magtu.ru

Контактное лицо, отв. редактор к.т.н. Слободянский Михаил Геннадьевич.

ПРАЙС-ЛИСТ

на размещение рекламы в журнале
«Механическое оборудование металлургических заводов»

№ п/п	Цветная реклама на обложке издания		Черно-белые внутренние полосы	
	Объем	Цена, руб	Объем	Цена, руб
1	2-ая полоса (формат А4)	8000	1 полоса	6000
2	3-ая полоса (формат А4)	8000	½ полосы	4000
3	4-ая полоса (формат А4)	10000	¼ полосы	2000

Статья рекламного содержания		Реклама на сайте издания			
Объем	Цена, руб	Место расположения рекламного контента	Объем / размер	Срок размещения	Цена, руб
1 полоса	3000	Слайдер на главной странице (изображение)	700 x 380 pixels	1-6 месяцев	4000
				6-12 месяцев	6000

Пример оформления рекламного изображения в слайдере на главной странице сайта издания

- Главная
- О журнале
- Автору
- Архив
- Редакция
- Партнеры
- Контакты

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов"

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является бесплатным изданием открытого доступа.

700 x 380 pixels

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является информационным партнером XIV-го международного конгресса сталеплавильщиков

Научно-технический журнал МОМЗ

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в журнале «Механическое оборудование металлургических заводов». Журнал «МОМЗ» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и ему присвоен международный стандартный номер сериального издания ISSN 2311-1364. Сведения о журнале