

P A S S D E S I G N . R U



ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО

ВЫПУСК 15

Разработка и внедрение
обучающих систем для
подготовки студентов ВУЗов, ССУЗов
и повышения квалификации кадров



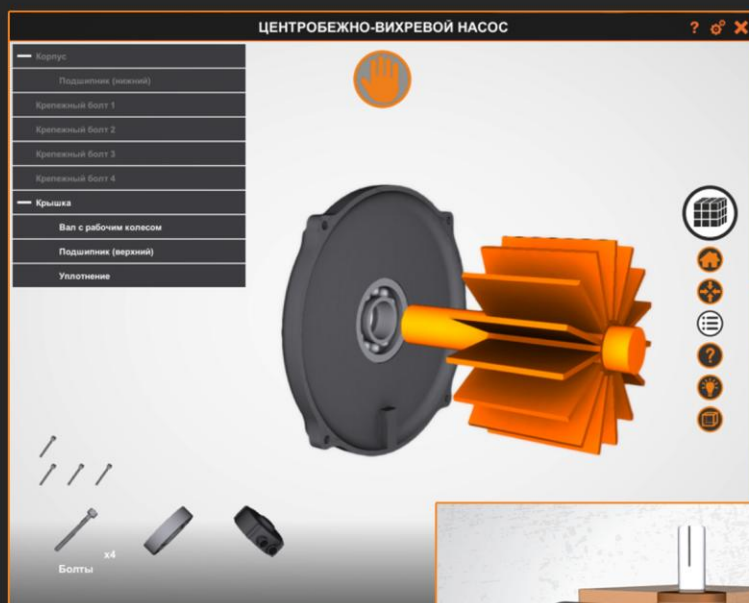
МЫ ПРЕДЛАГАЕМ ГОТОВЫЕ РЕШЕНИЯ

3D АТЛАСЫ ОБОРУДОВАНИЯ
3D СБОРКА/РАЗБОРКА
АНИМАЦИОННЫЕ ФИЛЬМЫ
ТРЕНАЖЕРЫ ИМИТАТОРЫ
ЭЛЕКТРОННЫЕ КУРСЫ
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПЛАКАТЫ

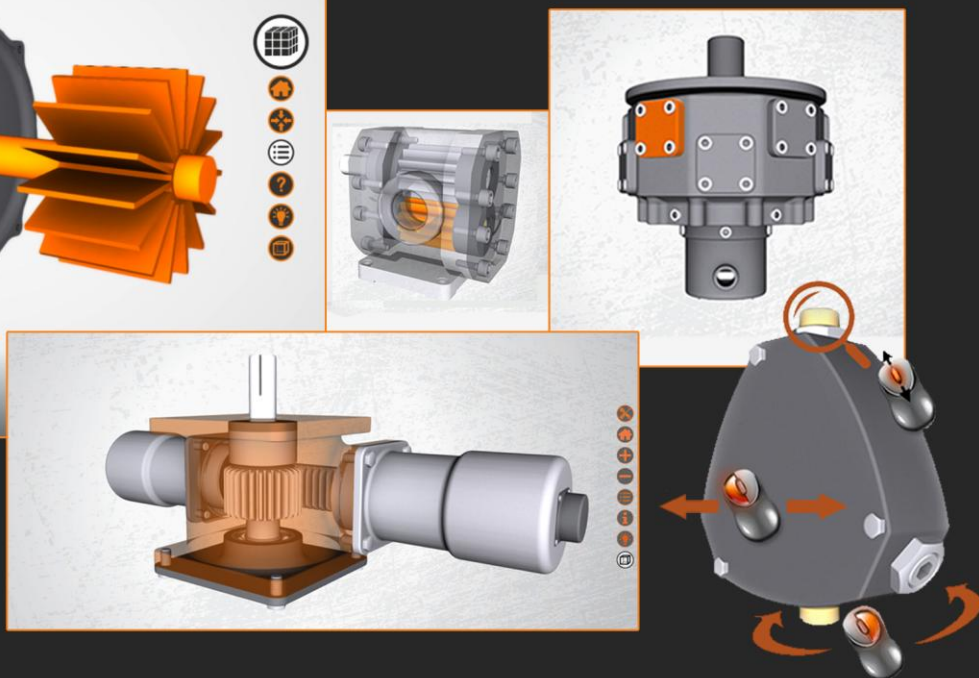
- Проблемы с текучкой кадров?
- Неоправданные затраты на обучение?
- Сотрудники долго и некачественно выполняют ремонт?

КОМПАНИЯ SIKE ПРЕДЛАГАЕТ УНИКАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА «ВИРТУАЛЬНЫЙ МЕХАНИК»



Быстрая подготовка
квалифицированного ремонтного
и обслуживающего персонала на
виртуальном оборудовании



Россия, г. Магнитогорск, 455023
Тел.: 8 (3519) 22-22-44, 22-04-05
E-mail: info@sike.ru
Сайт: sike.ru
Интернет-магазин: shop.sike.ru

«КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО» Электронный научный журнал. Выпуск 15

Дата опубликования: 30.12.2019.

Издается в авторской редакции

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ: Кинзин Дмитрий Иванович.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Д.И. Кинзин – кандидат технических наук, доцент.

Технический редактор:

С.А. Левандовский – кандидат технических наук, доцент.

Адрес редакции: 455000, г.Магнитогорск, ул. Ломоносова, 34, 8.

Адрес в Интернет: www.passdesign.ru.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций и входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77–51759 от 23.11.2012

ISSN 2308-6440

© Кинзин Дмитрий Иванович

СОДЕРЖАНИЕ

Сортопрокатное производство	5
<i>В.Ю.Рубцов, А.С.Красулин, А.А.Серебренников</i>	
ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА САМОФИКСАЦИИ КЛИНЬЕВ	5
<i>О.Б.Калугина, У.В.Михайлова, М.В.Афанасьева</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РЕ- ВЕРСИВНОЙ ПРОКАТКИ	9
Листопрокатное производство	13
<i>М.И.Румянцев, А.Н.Завалицин</i>	
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА И НЕКОТОРЫЕ АС- ПЕКТЫ МЕТОДОЛОГИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	13
Производство специальных видов проката	24
<i>В.Ю.Рубцов, О.И. Шевченко</i>	
ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ И ОСЕСИМ- МЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ	24
Сведения об авторах	37

В.Ю.Рубцов

АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»

А.С.Красулин

АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»

А.А.Серебrenников

АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА САМОФИКСАЦИИ КЛИНЬЕВ

Аннотация. Предложено устройство, обеспечивающее самофиксацию клиньев прокатных клеток открытого типа устаревшей конструкции, с использованием элемента хребтовой балки. Данная конструкция повышает параметры жесткости клетки, исключая самопроизвольное ослабление клиньев, а ее изготовление и установка на клеть не требует существенных затрат.

Ключевые слова: сортопрокатный стан, прокатная клеть открытого типа, жёсткость клетки, клин, хребтовая балка.

Под жёсткостью прокатных клеток понимают суммарную упругость всех элементов клетки, определяющую точность геометрических размеров проката. Прокатные клетки бывают открытого и закрытого типа. Наиболее критичны условия жесткости прокатных клеток при получении профилей повышенной точности [1]. В настоящее время практически все изготавливаемые прокатные клетки открытого типа оснащены гидроцилиндрами либо механическим приводом прижатия крышки, такая конструкция носит название «предварительно напряженная клеть». Предварительно напряженные клетки в сортопрокатном производстве характеризуются, прежде всего, высокой жесткостью, позволяющей их широко использовать для получения высокоточных профилей широкого размерного сортамента из рядовых и легированных сталей [2-3]. Однако большинство станов, используемых как на российских, так и на зарубежных предприятиях, эксплуатирующихся более 50 лет, в которых конструктивно прижатие крышки к станине обеспечивается расклиниванием. Замена узла клиньев на гидроцилиндры прижатия крышки, требуют существенной модернизации клеток, что по затратам может быть соизмеримо с ценой новой клетки, поэтому до сих пор на старых клетях остается ручная фиксация крышки за счет установки клина. На рис. 1 в качестве примера изображена чистовая клеть ДУО крупносортового стана 650 АО «ЕВРАЗ-НТМК», на которой устанавливаются клинья с уклоном 1/100. В процессе прокатки, под действием усилия вибрации, образуется люфт между крышкой и станиной, при этом клинья дополнительно пробиваются. Актуальной задачей является разработка узла для самофиксации клина с целью уменьшения ручного труда и исключения человеческого фактора в процессе работы.

В качестве примера самофиксации клиньев предлагается устройство, изображенное на рис. 2. Конструктивной основой для фиксации клина 1 является элемент хребтовой балки 2, производимый в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-НТМК» (горячекатаный Z-образный профиль хребтовой балки железнодорожных вагонов, в промышленности используется как элемент конструкции шкворневого узла рамы вагона) [4-6]. Винт 3 обеспечивает постоянное поджатие клина за счет пружины 4. Гайка 6 установлена на винте 3 неразъемным соединением (например, штифтом или сваркой). Гайка 5 зафиксирована неподвижно на элементе 2. В процессе перевалки элемент 2 находится в отведенном состоянии и обеспечивает свободное извлечение клина. После установки самого клина 1, элемент 2 разворачивается к клину, и винт 3 фиксирует его. При образовании люфтов в процессе прокатки винт 3 за счет пружины 4 непрерывно поджимает клин 1 и происходит саморасклинивание крышки станины.

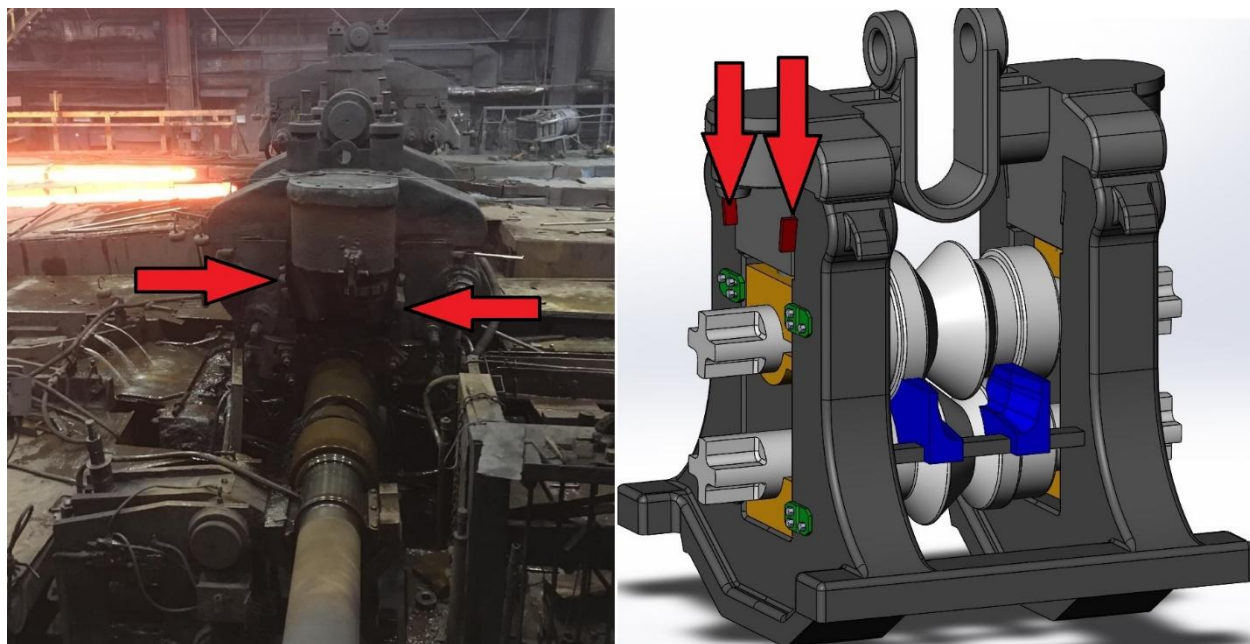


Рис. 1. Расположение клиньев в прокатных клетях

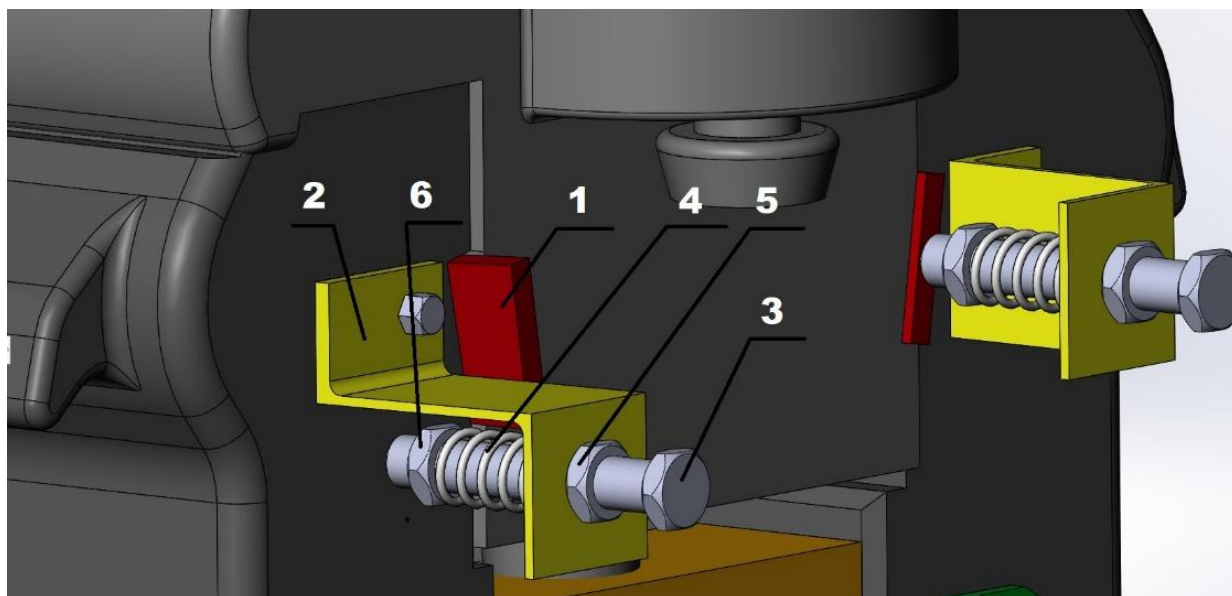


Рис. 2. Предлагаемое устройство самофиксации клиньев

Наибольшие требования в процессе эксплуатации устройства предъявляются к элементу 2, поэтому для его проверки было произведено моделирование прочностных характеристик в программе AutodeskInventorProfessional 2020 (рис 3).

Данное моделирование показало возникающие напряжения при различных нагрузках. Модель указывает на отгиб полки при достижении критических напряжений. Согласно полученным моделям и учитывая предел текучести стали 09Г2С (265 МПа), из которой изготавливается хребтовая балка, а также уклон клиньев 1/100, можно сделать вывод, что данную конструкцию допустимо использовать при усилиях прокатки, не превышающих 2800 кН, что соответствует условию работы чистовой клетки стана 650 крупносортового цеха АО «ЕВРАЗ-НТМК», а также множеству других станов с аналогичной конструкцией фиксации крышки.

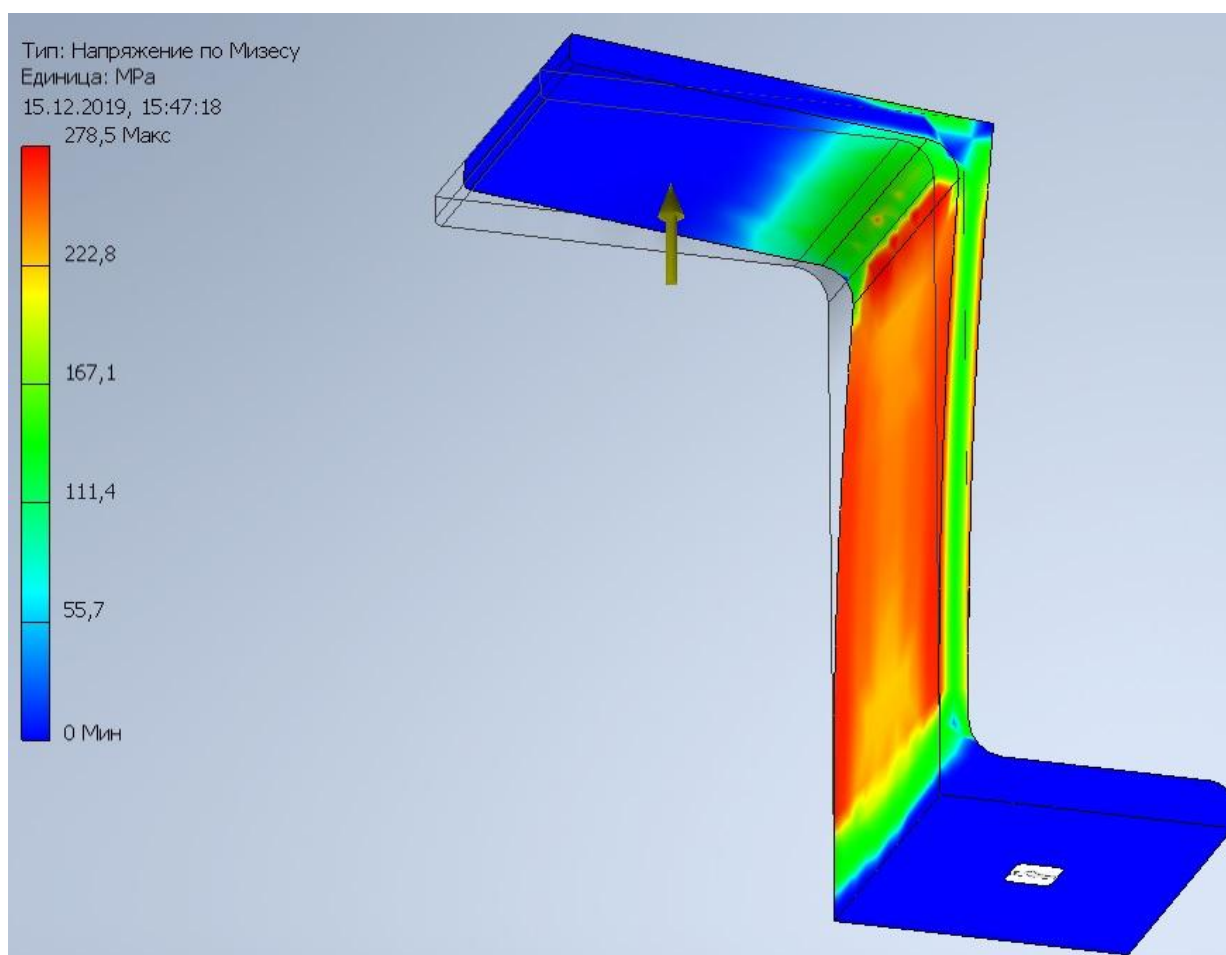


Рис. 3. Расчет на прочность элемента фиксатора из хребтовой балки

Выводы

1. Разработана конструкция для самофиксации клиньев между крышкой и станиной, прокатных клетей открытого типа, снижающая использование ручного труда.
2. Использование профиля хребтовой балки в качестве конструктивного элемента, обеспечивает жесткость и надежность конструкции в достаточно широком диапазоне усилий прокатки среднесортных и крупносортовых станов.
3. Изготовление и установка данного устройства не требует существенных вложений, при этом обеспечивает повышение жесткости прокатных клетей открытого типа с учетом исключения самопроизвольного ослабления клина и позволяет повысить точность геометрических размеров получаемых профилей на станах полувековой давности.

Библиографический список

1. Свейковски У., Нерзак Т. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool // Металлургическое производство и технология (МРТ). 2006. № 2. С. 50–56.
2. Оценка зазоров и деформаций предварительно напряженных клетей сортовых станов / А.Г. Кузьменко, М.А. Поздняков, А.П. Тремасов [и др.] // Сталь. 2016. №4. С. 22–25.
3. Новое поколение предварительно напряженных клетей сортовых станов. Конструкция и расчет / А.Г. Кузьменко, М.А. Поздняков, А.П. Тремасов [и др.] // Производство проката. 2012. №10. С. 20–25.
4. А.С. 523825 СССР, М. Кл.² В 61 F 1/08. Шкворневой узел рамы вагона / Г.Т. Кулик (СССР). №2056949/11; заявл. 23.08.1974; опубл. 5.08.1976, Бюл. № 29.

5. ГОСТ 5267.0-90 Профили горячекатаные для вагоностроения.
6. ГОСТ 5267.3-90 Профиль зетовый для хребтовой балки.

• INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH •

V.Y.Rubtsov
EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant
A.S. Krasulin
EVRAZ KGOK
A.A.Serebrennikov
EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant

**INCREASING STIFFNESS OF ROLLING MILLS STANDS
BY USING WEDGE FIXATION DEVICE**

Abstract. Device that provides self-fixation of open type rolling mills wedges of obsolete design, using element of spinal beam is proposed. This design increases rigidity parameters of rolling mills, excluding spontaneous wedges weakening. Manufacture and installation this construction on rolling mills does not require significant costs.

Keywords: section rolling mill, capless stand, stiffness, wedge, spinal beam.

О.Б.Калугина, У.В.Михайлова, М.В.Афанасьева
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТКИ

Аннотация. В статье рассмотрена система автоматической оптимизации темпа прокатки на реверсивных станах, позволяющая увеличить производительность при небольших капитальных затратах. Приведена модель этой системы и графики переходных процессов.

Ключевые слова: реверсивный стан, темп прокатки, система оптимизации, экстремальное регулирование.

От уровня рациональности технологии прокатки зависят производительность стана, качество и себестоимость проката, безаварийная работа оборудования. Проектирование технологии прокатки на реверсивных станах требует большого инженерного опыта. Ошибки приводят к высоким потерям металла, а также к преждевременному выходу из строя оборудования [1]. Все это влечет за собой потерю значительных материальных средств.

С целью повышения производительности реверсивной прокатки стремятся уменьшить до минимально допустимого значения, определяемого быстродействием электроприводов нажимных механизмов или рабочих ролягангов стана, продолжительность паузы τ_{Pi} – время от момента выброса раската из валков до момента его захвата валками в $i + 1$ проходе [2].

По данным Мугалимова Р.Г. [3] для главных приводов стана существует оптимальная относительная продолжительность приложенной нагрузки – E_{onm} , при которой стан будет работать наиболее эффективно, удовлетворяя заданным ограничениям:

$$E_{onm} = \left(\frac{\tau_{M_{onm}}}{\tau_{P_{onm}}} \right) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Поскольку продолжительность цикла одного прохода определяется суммой $\tau_{\Pi_{onm}} = \tau_{M_{onm}} + \tau_{P_{onm}}$, то продолжительность паузы для заданного режима обжаты и заданного режима скоростей должна быть вполне конкретной величиной, а не минимально допустимой.

Значит, продолжительность паузы можно определять следующим образом:

$$\tau_{\Pi} = \tau_{\Pi_{onm}} (1 - E_{onm}). \quad (2)$$

Отклонение текущей относительной продолжительности приложения нагрузки от оптимального значения равно:

$$\Delta E = (E - E_{onm}) = \left(\frac{E}{E_{onm}} - 1 \right). \quad (3)$$

Этому отклонению при заданном допустимом уровне нагрева электроприводов соответствует снижению производительности стана на величину:

$$\Delta P = \left(\frac{\tau_{\Pi}}{\tau_{\Pi_{onm}}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Изменение снижения производительности стана при изменении отклонения продолжительности приложения нагрузки от ее оптимального значения приведены на рис. 1.

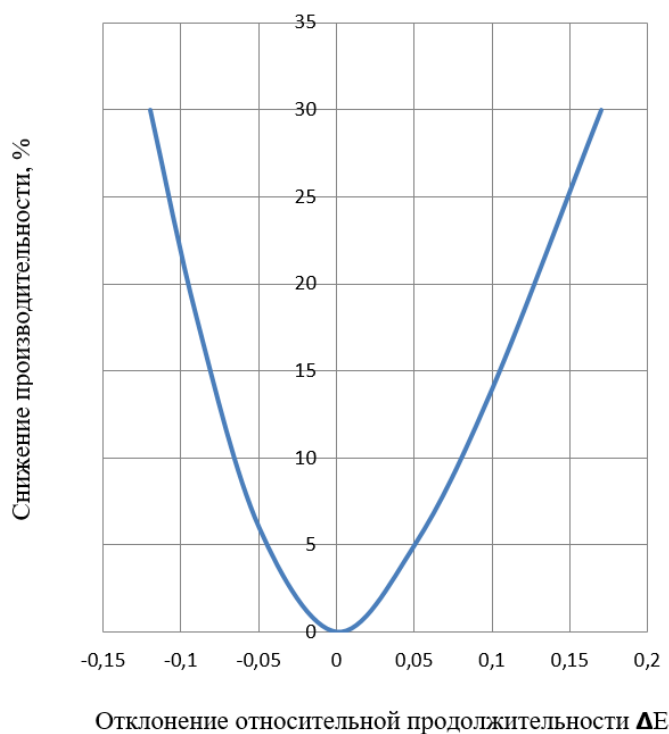


Рис. 1. Снижение производительности стана при отклонении продолжительности приложения нагрузки от ее оптимального значения

Предлагаемая в данной работе система оптимизации длительности пауз между заготовками позволяет увеличивать производительность стана с одновременным снижением риска перегрева главных приводов клетей. Преимуществом данной системы является ее самоадаптация к изменяющимся условиям прокатки.

Структурная схема предлагаемой системы автоматической оптимизации управления (САОУ) темпом прокатки представлена на рис. 2.

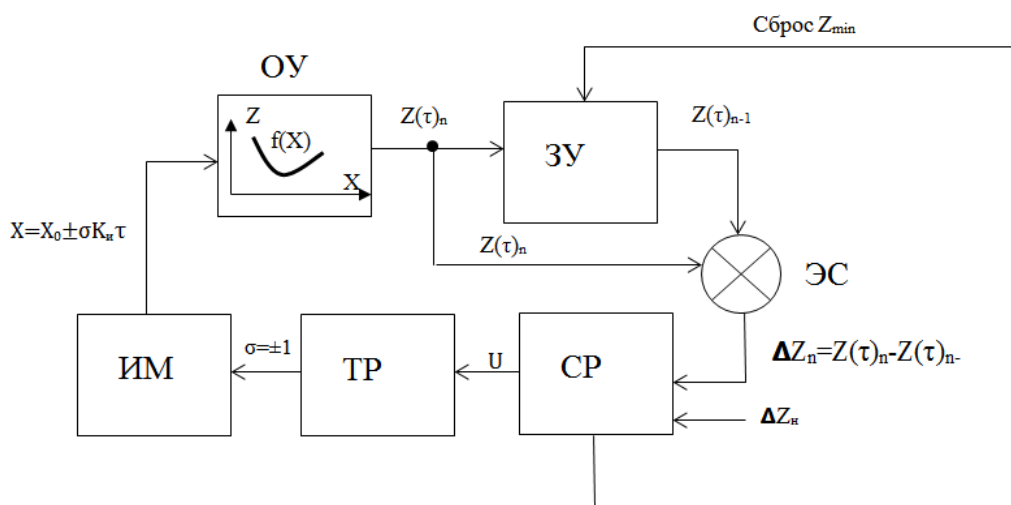


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой системы оптимизации:
 ОУ – объект управления; ЗУ – запоминающее устройство; СР – сигнум-реле;
 ТР – триггер-реле; ИМ – исполнительный механизм

Объект управления аппроксимирован статической зависимостью отклонения продолжительности приложения нагрузки от снижения производительности стана, так как переходные процессы в электродвигателе обладают малой инерционностью, которой можно пренебречь.

Для безынерционного объекта управления выходная величина $Z(\tau)_n$ в соответствии со статической характеристикой $f(x)$ подается на запоминающее устройство (ЗУ). Запоминающее устройство СЭР данного вида фиксирует только уменьшение выходного сигнала $Z(\tau)_n$. На увеличение сигнала $Z(\tau)_n$ ЗУ не реагирует. Выходной сигнал ЗУ $Z(\tau)_n$ непрерывно подается на вход элемента сравнения (ЭС), где сравнивается с предыдущим значением выходного параметра объекта управления $Z(\tau)_{n-1}$. Сигнал разности $\Delta Z_n = Z(\tau)_n - Z(\tau)_{n-1}$ подается на вход сигнум-реле (СР). Если $Z(\tau)_n < Z(\tau)_{n-1}$ (выходная величина объекта управления уменьшилась по сравнению с минимально достигнутым значением), то ΔZ_n становится отрицательной. Это значение сравнивается с величиной зоны нечувствительности сигнум-реле ΔZ_n . Как только выполнится условие $\Delta Z_n > \Delta Z_n$, сигнум-реле срабатывает. На выходе формируется управляющий импульс U , который перебрасывает триггер реверса (ТР) и одновременно сбрасывает запомненное минимальное значение в ЗУ.

В результате на выходе ЗУ устанавливается текущее значение выходного параметра. Триггер реверса формирует управляющий сигнал $\sigma = \pm 1$, который изменяет направление движения исполнительного механизма (ИМ), изменяющего величину входного управляющего параметра $X(\tau)$ в требуемом направлении. В зависимости от знака σ ИМ меняет направление движения: при $\sigma = +1$ на увеличение $X(\tau)$; при $\sigma = -1$ на уменьшение $X(\tau)$. В результате компьютерного моделирования были получены переходные процессы в САОУ во времени, представленные на рис. 3 и рис. 4.

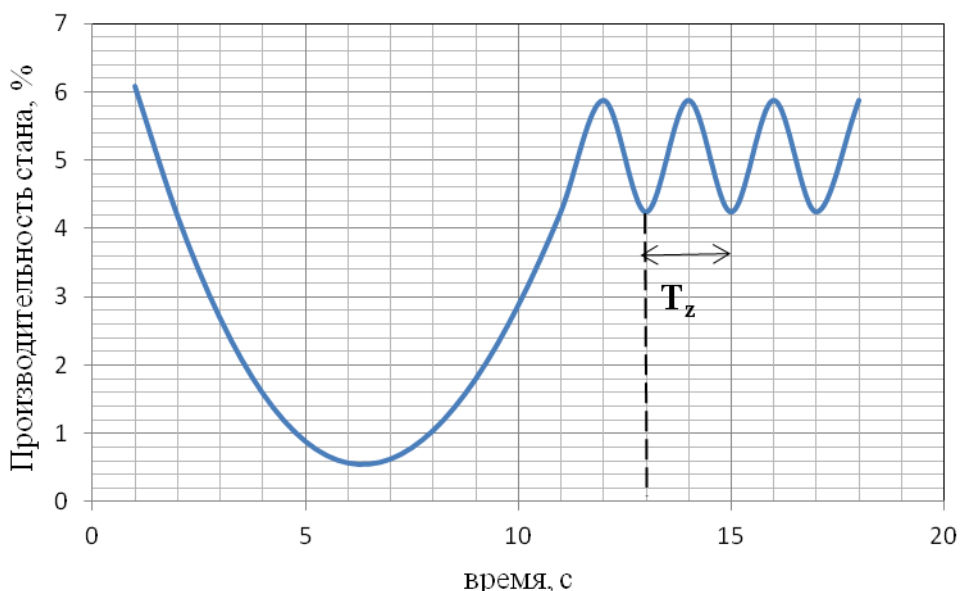


Рис. 3. Переходный процесс в САОУ реверсивной прокаткой во времени

Таким образом, предлагаемая САОУ определяет значение X_{onm} и совершает относительно этого значения непрерывные периодические колебания выходного параметра $Z(\tau)$ с периодом, равным T_Z .

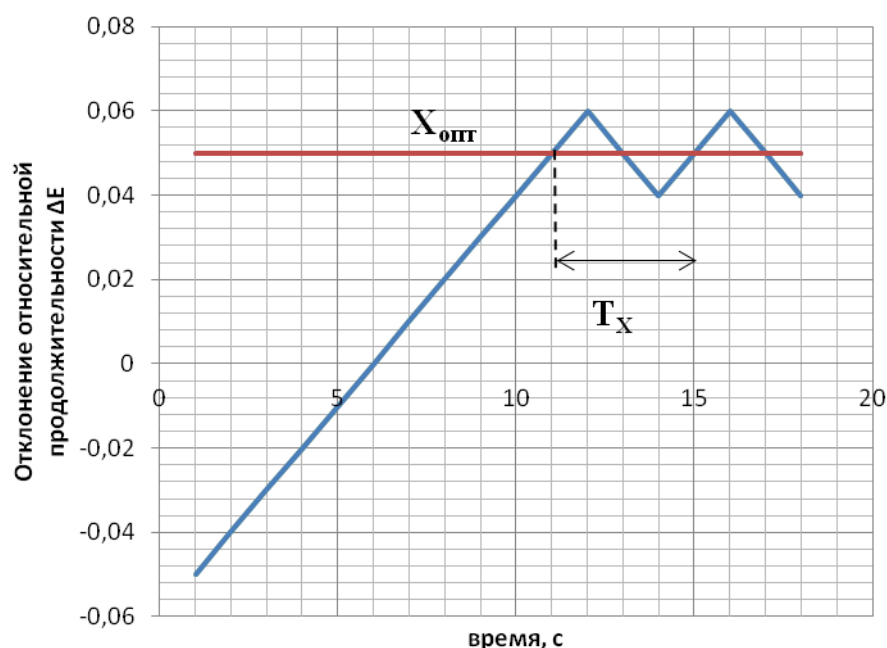


Рис. 4. Изменение входной величины во времени

Использование предлагаемой САОУ позволит заметно (на 1,5-3,5%) увеличить производительность стана при незначительных капитальных затратах, т.к САОУ ориентирована на программную реализацию с использованием современных микропроцессорных технических средств.

Библиографический список

1. Баранкова И.И., Михайлова У.В., Лукьянов Г.И. Проблемы безопасности при эксплуатации АСУ ТП // Безопасность информационного пространства. Сборник трудов XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 томах. 2018. С. 36–40.
2. Шишко В.Б., Трусов В.А., Чиченев Н.А. Основы технологии прокатки на реверсивных станах: Учеб. пособие. М.: МИСиС. 2007. 92 с.
3. Парсункин, Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: Монография. Изд.2. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2009. 198 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

O.B.Kalugina, U.V.Mikhailova, M.V.Afanaseva
Nosov Magnitogorsk State Technical University

MODELING OF AUTOMATIC OPTIMIZATION SYSTEM FOR REVERSE ROLLING

Abstract. The article presents an automatic optimization system of reversing mill pace. This system allows increasing productivity at low capital cost. A model of this system and transient processes graphs are presented.

Keywords: reversing mill, rolling pace, optimization system, extreme regulation.

М.И.Румянцев, А.Н.Завалищин
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОЛОГИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. Показано, что при ограниченности множества технологических операций может быть реализовано большое количество вариантов технологий, которые отличаются одна от другой, по крайней мере, способом выполнения некоторой технологической операции. Выявлено, что объектами проектирования технологий производства листового проката могут быть как отдельные технологические операции или их элементы (переходы), система технологических операций, а также режимы осуществления одной или нескольких операций. Обоснованы основные аспекты методологии создания и совершенствования технологий листопркатного производства, которая позволяет сократить время поиска эффективных решений при обеспечении удовлетворительно высокого уровня их достоверности и обоснованности.

Ключевые слова: горячекатаный листовой прокат, холоднокатаный листовой прокат, технология производства листового проката, проектирование, объект проектирования, методология проектирования.

Введение

Для современного состояния мировой черной металлургии характерны технологические изменения, нацеленные прежде всего на сокращение производственных затрат, ослабление нагрузки на окружающую среду, улучшение качества и освоение новых видов продукции. На передовых металлургических предприятиях, практически на всех переделах, широко внедряются инновационные энерго-, ресурсо- и трудосберегающие технологии, призванные обеспечить повышение конкурентоспособности производства и продукции, а также решение задачи импортозамещения [1-2].

Еще более 40 лет назад было признано, что одним из наиболее эффективных видов продукции черной металлургии является листовой прокат [3]. Поэтому уже в восьмидесятые годы прошлого века доля листового проката в общем выпуске прокатной продукции ведущими экономиками мира превышала 50%, тогда как в СССР к 1979 г. она достигла всего 42% [4]. В дальнейшем перед отечественной металлургией постоянно ставилась задача повысить долю листового проката при одновременном наращивании общего объема его производства и улучшения качества [5]. Аналогичная задача стоит перед черной металлургией Российской Федерации и сегодня [1]. В период 2011-2014 г.г. ежегодно выпускалось от 57,4 до 58,8 млн. т. проката, а в перспективе до 2030 г. объем производства должен увеличиться до 71,7-77,7 млн. т. При этом прогнозируется рост доли листового проката от 43,7% в 2014 г. до 46,9-53,4% в 2030 г.

Чтобы решить указанные задачи необходимо развивать (совершенствовать) действующие и, возможно, создавать новые технологических системы (ТС), множество которых во взаимодействии между собой и образует металлургический комплекс страны. Технология производства листового проката (ТПЛП) является составной частью листопркатной технологической системы (ЛПТС) и именно результативность ТПЛП в значительной мере определяет эффективность функционирования ЛПТС. Следовательно, создание (разработка) технологий, обеспечивающих высокую ресурсоэффективность производства, расширение сортамента и высокие качественные показатели как новых, так и уже выпускаемых видов листового проката, является одним из направлений совершенствования (улучшения, прогрессивного развития) ЛПТС.

Разработка технологии – прикладная задача, которая решается рассмотрением множества допустимых вариантов и выбором из них такого, который в наибольшей степени соот-

ветствует заранее заданному критерию. Из сказанного следует, что процесс поиска решения по созданию технологии подобен процессу проектирования, где, не зависимо от уровня декомпозиции рассматриваемого объекта, действия выполняются по одному и тому же алгоритму, который включает в себя процедуры анализа и синтеза. Текущие условия диктуют необходимость сокращения сроков поиска и внедрения в практику новых эффективных разработок. В таком контексте актуальны исследования, направленные на выбор известных и разработку новых методов для анализа и синтеза способов, процессов, технологий листопркатного производства, которые сократят время поиска рациональных решений, обеспечив при этом удовлетворительно высокий уровень их достоверности и обоснованности.

Объекты проектирования технологии производства листового проката

Основываясь на стандартах [6-8], входящих в комплекс нормативных документов единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП), с учетом представлений, высказанных в [9], в работе [10] показано, что и в отдельном прокатном цехе, и в технологической системе производства листового проката осуществляется производственный процесс, в результате которого происходит превращение ресурсов (физических, технических и трудовых) в заданное количество готовой продукции, обладающей требуемым качеством. В ЕСТПП установлены следующие определения.

- **Производственный процесс.** Совокупность всех действий людей и орудий производства, которые должны быть осуществлены для реализации производственной программы прокатного цеха.
- **Технологический процесс.** Часть производственного процесса, включающая действия по изменению состояния предмета труда, т.е. обрабатываемого в цехе металла. Элементами технологического процесса являются технологические операции и переходы.
- **Технологическая операция.** Законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Если в результате выполнения операции состояние предмета труда изменяется, то такую операцию называют операцией обработки. Выделяют также операции контроля и транспортировки. Последние подразделяют на операции перемещения и операции ориентации.
- **Переход.** Законченная часть операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянном режиме. Операции обработки включают переходы обработки и транспортные переходы. Транспортные операции включают только транспортные переходы.

Понятие «Технология» в нормативных документах ЕСТПП не определено, но является предметом изучения в философии техники. В наиболее общем виде дается, например, такая трактовка: «технология представляет собой сложную развивающуюся систему артефактов, производственных операций и процессов, ресурсных источников, подсистем социальных последствий, информации, управления, финансирования и взаимодействия с другими технологиями» [11, стр. 566]. Здесь говорится не только об элементах технологического процесса (производственные операции и процессы, а также артефакты – т.е. созданные человеком элементы объективной реальности для осуществления процессов и операций). К технологии также отнесены различные виды обеспечения (ресурсное, информационное, финансовое), процессы управления, взаимодействия с социумом и другими технологиями.

В нашей работе, с учетом различных точек зрения [11, 12 и др.], мы рассматриваем технологию в традиционном смысле, т.е. как последовательность воздействий на предмет труда с применением определенных инструментов (средств технологического оснащения) с целью достижение желаемого положительного результата (получения продукции требуемого качества в необходимом количестве) при рациональном использовании всех ресурсов.

Такая трактовка не противоречит определениям терминов «технологический метод» и «технологический маршрут». В соответствии с [8] технологический маршрут – последовательность прохождения предмета труда по производственным подразделениям и их участкам

при выполнении технологического процесса. Технологический метод, исходя из определения, данного в [7], есть совокупность правил, определяющих последовательность и содержание воздействий на предмет труда (включая технический контроль и испытания) в технологическом процессе, которые не зависят от наименования, типоразмера или исполнения изделия. На наш взгляд указанное определение указывает на сходство между технологическим методом и способом осуществления технологического процесса как объектом изобретения.

Действительно, способ, как объект изобретения, представляет собой совокупность действий над материальным объектом [13]. Различают девять типов способов. В качестве особенности способа как технологического процесса выделяют совокупность действий, направленных на материальные объекты (т.е. на предмет труда) с целью их полезного преобразования в готовые продукты и изделия. При этом отличительными характеристиками способа могут быть собственно целенаправленные действия (приемы, операции), последовательность операций и режимы проведения операции (параметры которыми характеризуется операция) [14].

Таким образом, объектами разработки или совершенствования технологии производства листового проката могут быть как отдельные технологические операции или их элементы (переходы), система технологических операций, а также режимы осуществления одной или нескольких операций.

Многовариантность технологий производства листового проката

Технологический процесс получения листового проката включает технологические операции подготовки заготовок к дальнейшей обработке, операции формоизменения прокаткой и резанием, операции обеспечения окончательных свойств продукции. Например, широкополосная горячекатаная листовая сталь, поставляемая в рулонах, производится с применением следующей последовательности технологических операций (рис. 1): зачистка (при необходимости), нагрев, горячая прокатка на заказанную толщину, предварительное охлаждение водой, смотка, окончательное охлаждение рулонов на воздухе. Требуемые свойства проката из стали известного химического состава обеспечивают сочетанием температур конца прокатки и смотки.

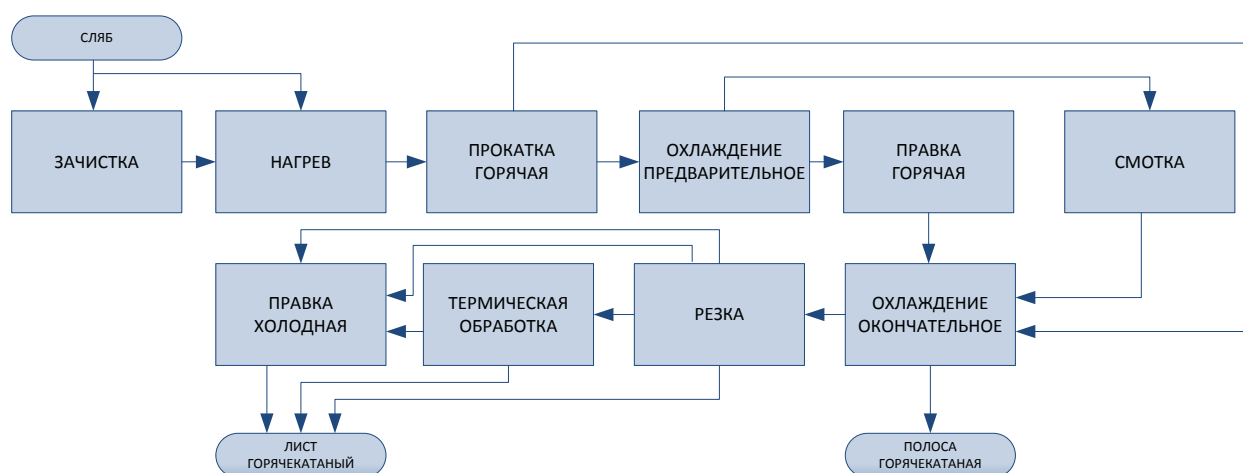


Рис. 1. Технологические операции и варианты технологий производства стального горячекатаного листового проката

Технология производства широкополосного горячекатаного проката, поставляемого в листах, включает все технологические операции получения рулонов, а также резку и (при необходимости) термическую обработку. По данному способу холодная правка выполняется листопрямительными машинами, установленными в агрегатах резки. Примером такой техноло-

гии может быть решение задачи получения листов для электросварных труб, разработанное Ю.А.Тверским [15].

Все технологии производства крупногабаритных листов включают зачистку сляба (при необходимости), нагрев, горячую прокатку на заказанную толщину, резку для обеспечения ширины и длины по заказу. Горячей правкой, подвергают раскаты при наличии неплоскостности. Окончательное охлаждение осуществляется либо на воздухе при естественных условиях, либо по режиму противоблоковой обработки. Заданные свойства металла обеспечиваются различными вариантами химического состава стали, термомеханических режимов прокатки, а также термической обработкой с повторного нагрева. Например, при производстве листов высокой прочности с повышенной пластичностью применяют микролегированную сталь, деформацию осуществляют способом термомеханической прокатки, предварительное охлаждение выполняется водой с регулированием скорости охлаждения. Листы нормальной прочности из традиционных марок стали обычно охлаждают только на воздухе, без предварительного охлаждения водой. Листы из традиционных марок стали повышенной прочности могут быть получены без предварительного охлаждения водой с применением термической обработки после охлаждения на воздухе.

Все процессы производства холоднокатаного проката из малоуглеродистой стали предусматривают удаление окалины с поверхности горячекатаного подката, холодную прокатку на заданную толщину и рекристаллизационный отжиг (рис. 2).

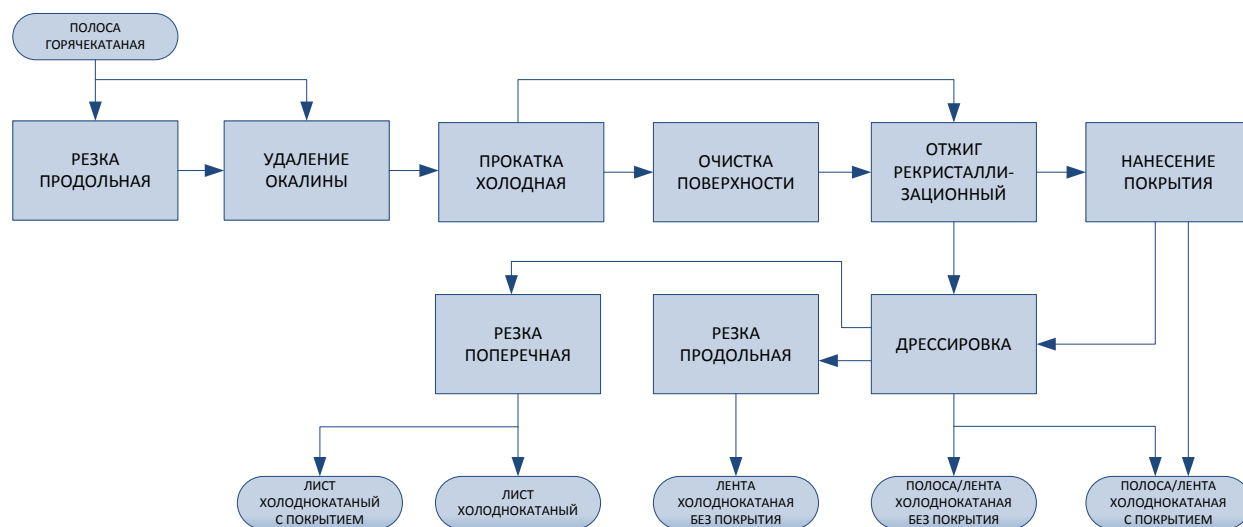


Рис. 2. Технологические операции и варианты технологий производства холоднокатаного листового проката из малоуглеродистой стали

При производстве узких холоднокатаных лент, а также по другим технологиям прокатки из подката многократной ширины перед удалением окалины производят продольную резку подката. При поставке холоднокатаного проката без покрытия после отжига производят дрессировку. Дрессировка также может быть применена при деформационной обработке после нанесения цинкового покрытия горячим способом. Если заказана поставка металла в листах, производится поперечная резка. При необходимости уменьшения ширины применяют продольную резку.

Таким образом, технологии производства листового проката включают ограниченное множество технологических операций. Однако, каждая из технологических операций может быть реализована различными средствами технологического оснащения. Например, при производстве толстолистного проката могут применяться и реверсивные, и широкополосные станы горячей прокатки. Плоскостность холоднокатаных полос может быть улучшена правкой в роликовой правильной машине или применением изгибно-растяжной правильной машины. Следовательно, возникают пересечения элементов множества технологических

операций с элементами множества средств технологического оснащения и каждое из таких пересечений представляет собой индивидуальную технологию, которая отличается от других, по крайней мере, способом выполнения некоторой технологической операции.

Аспекты методологии проектирования технологий листопркатного производства

Исходя из обобщений, сделанных А.М.Новиковым и Д.А.Новиковым, методологию необходимо рассматривать как систему взглядов, в которых обосновывается пригодность некоторой совокупности методов деятельности для реализации определенных целей. Собственно система методов, применяемая для достижения цели, представляет собой методику решения соответствующей задачи [16].

При разработке и совершенствовании технологий с целью повышения эффективности технологических систем производства проката используют различные методы: обобщение отечественного и зарубежного опыта; лабораторные и производственные экспериментальные исследования параметров процесса и механических свойств металла с использованием тензометрии, ультразвукового контроля, оптической металлографии; статистические методы обработки экспериментальных данных; математическое моделирование (аналитическое, цифровое); оптимизацию. При аналитическом моделировании широко применяют дифференциальное, интегральное и вариационное исчисление, а также в отдельных случаях другие математические теории.

Так О.Н.Тулупов [17] предложил методику решения задач оперативного анализа и совершенствования технологических схем сортовой прокатки с элементами оперативного управления формоизменением профиля. Методика основана на принципе единства математического описания и представления информации с применением комплекса адаптивных моделей на основе математического аппарата структурных матриц. Итогом исследования стали адаптивные структурно-матричные модели технологических схем формоизменения, в том числе и в калибрах нетрадиционной формы, которые были успешно применены для разработки комплекса технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности процессов сортовой прокатки и точности прокатываемых профилей как простого, так и фасонного сечения.

Положительные результаты совершенствования технологий получают так же и при обоснованном выборе и корректном применении совокупности традиционных методов, которая наилучшим образом соответствуют особенностям решаемой задачи. При этом некоторые методы, например методы исследования и моделирования трансформации микроструктуры металла, могут быть заимствованы из смежных областей исследования. Например, А.В.Алдунин [18] предложил методику разработки технологий горячей прокатки полос с заданными механическими свойствами из сплавов как черных, так и цветных металлов. При этом он исходил из того, что процесс формирования показателей качества металла при прокатке полос и лент различных сплавов протекает последовательно по технологическим стадиям черновой и чистовой прокатки, а также последующей упрочняющей обработки. Методика предусматривает исследование сопротивления металла деформации, закономерностей формирования его структуры, условий обеспечения равномерного формоизменения, а также построение диаграмм пластичности. По результатам исследования разрабатываются математические модели и критерии оптимальности процесса прокатки полос (равномерность деформации по толщине полосы; минимум уширения, поперечная устойчивость при обжатии вертикальными валками, степень использования ресурса пластичности), которые применяются для разработки режимов прокатки.

Для расширения представлений о технологиях производства проката как объектах исследования могут применяться методы из иных областей знания. Например, В.Н.Заверюха [19] доказал возможность выполнять исследования и находить решения по улучшению системы «Валки-Полоса» с применением таксономического и мерономического классифицирования. При этом он исходил из того, что оба подхода реализованы, в частности, в международной классификации изобретений, где, по его мнению, таксон проявляется как объект изо-

брения с некоторым множеством признаков, а мерон – как описание изобретения. Указанный подход позволил В.Н.Заверюхе создать классификацию способов прокатки как упорядоченную совокупность подмножеств, закономерности которых могут быть описаны методами реляционной алгебры для создания баз и банков данных.

Любой метод улучшения системы должен быть нацелен на поиск решения, которое является если не оптимальным, то рациональным, что требует рассматривать несколько вариантов и выбирать наиболее приемлемый из них на основании определенного критерия. В указанных аспектах проявляется объективно существующая аналогия между поиском решения, направленного на улучшение технологии производства проката и ЛПТС, и процессом проектирования.

В ходе проектирования используют блочно-иерархический подход [20], предусматривающий, что представления об объекте и процесс проектирования расчленяются на уровни, которые отличаются один от другого степенью детализации объекта проектирования. Причем на каждом уровне детализации процесс проектирования каждого из выделенных в результате декомпозиции элементов есть решение совершенно определенной совокупности задач (рис. 3).

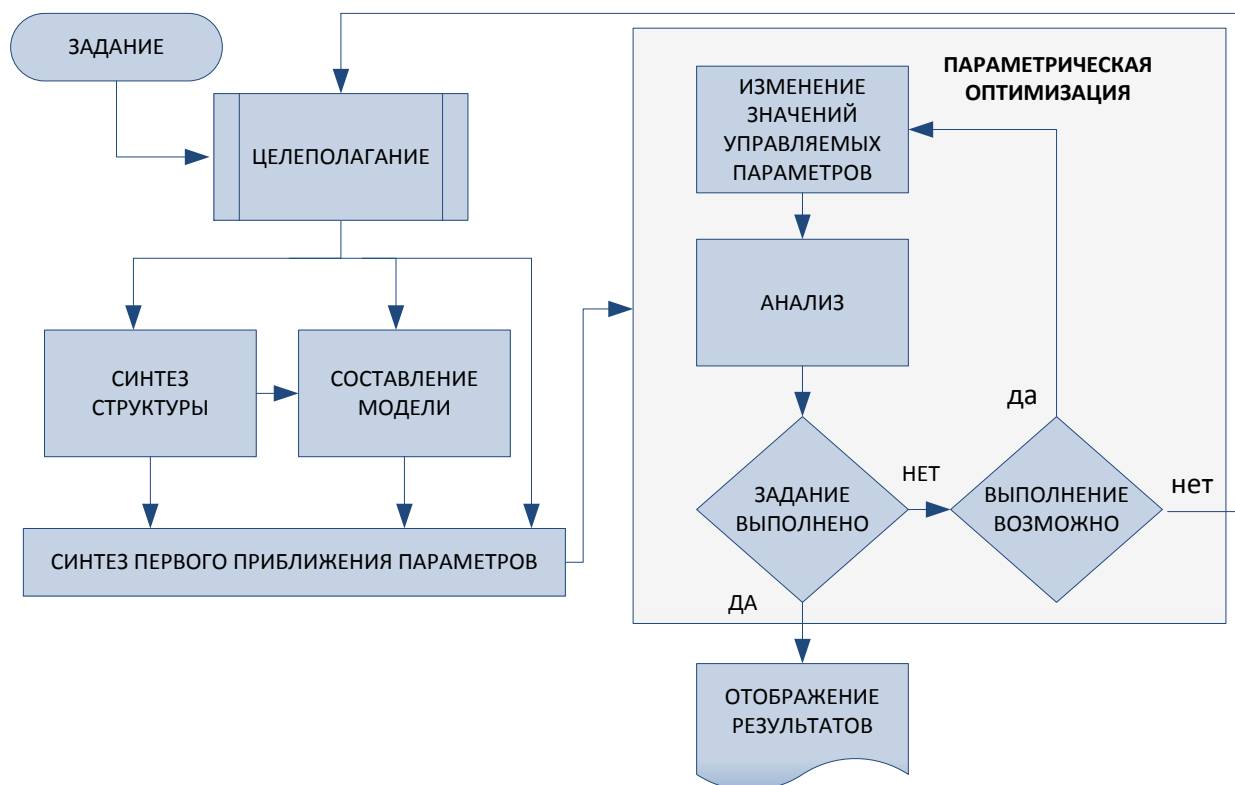


Рис. 3. Алгоритм проектирования на некотором иерархическом уровне

На основании задания, составленного на предыдущем уровне проектирования, синтезируют структуру проектируемого на данном уровне объекта (определяют элементы и назначают взаимодействия между ними). Составляют модель объекта и, выбрав из множества внутренних параметров управляемые параметры, задают исходные (ориентировочные) значения внутренних параметров. Далее анализом модели проверяют, соответствуют ли ожидаемые значения выходных параметров проектируемого объекта значениям тех же параметров, указанным в задании. Если соответствие имеет место, оформляют необходимую техническую документацию.

Если вариациями управляемых параметров не удастся добиться необходимого соответствия, изменяют структуру проектируемого объекта. Если и вариации структуры не позволяют решить проектную задачу, сформулированную в задании, изменяют техническое зада-

ние. Корректировка технического задания (целеполагания) означает возврат на предыдущий уровень проектирования.

В теории проектирования синтез рассматривают как разработку вариантов объекта без изучения его свойств [20, 21]. Понятие «синтез» близко понятию «проектирование». Но если рассматривать «проектирование», то – это весь процесс генерации информации об объекте. «Синтез» означает лишь момент этого процесса. Причем при проектировании синтез может быть выполнен несколько раз. Решением задачи синтеза является структура объекта (структурный синтез) и численные значения его внутренних параметров (параметрический синтез).

Анализ – это изучение свойств объекта, структура и значения внутренних параметров которого известны. Решением задачи анализа являются численные значения выходных параметров варианта проектируемого объекта и оценка соответствия этих значений указанным при целеполагании (в техническом задании).

Таким образом, проектирование – итеративный процесс, включающий выбор структуры объекта проектирования и изменение значений его внутренних параметров до тех пор, пока выходные параметры объекта не будут удовлетворять заданию на проектирование.

Применительно к проектированию технологий производства проката задание представляет собой требования к качеству и количеству продукции, которую необходимо произвести. Синтез структуры означает выбор технологических операций и последовательности их осуществления, а также технологическую систему для реализации технологии. При этом может быть использован как очевидный метод аналогий, так и его развитие в форме методики технологической адаптации [22]. Причем в последнем случае, за счет использования соответствующего прецедента, будет также решена задача синтеза первого приближения технологического режима.

Параметрическую оптимизацию, т.е. процедуру поиска наилучшего в наперед заданном смысле варианта технологического режима, можно осуществлять с применением нескольких опытных прокаток, т.е. путем многократного натурного моделирования. Однако из экономических соображений предпочтительнее применять компьютерное моделирование.

Подход к созданию технологии с применением принципов проектирования использовал С.В.Денисов при разработке технологий производства горячекатаных полос и листов с повышенными потребительскими свойствами из низколегированных марок стали [23]. В своей диссертационной работе он представил «специальную инжиниринговую систему» (СИС), которая предусматривает следующую последовательность действий:

- формирование исходных данных (размеры и значения характеристик качества продукции, в том числе химический состав стали, а также компоновку и характеристики оборудования стана);
- предварительное определение этапов контролируемой прокатки и охлаждения;
- разработка технологических параметров (выбор температурного и деформационного режима исходя из заданных механических свойств);
- расчет параметров заготовки, кинематических и энергосиловых параметров процесса прокатки;
- анализ результатов и выбор корректирующих действий (при необходимости).

Для принятия решений в условиях неопределенности (например, определение химического состава стали, выбор стана, а также этапов контролируемой прокатки и охлаждения, оценка механических свойств при отсутствии предыдущего опыта прокатки стали с выбранным химсоставом) в СИС применяются оценочный и экспертный методы, экспериментальные исследования (дилатометрические, пластометрические, опытные прокатки). Расчеты параметров заготовки и процесса прокатки выполняются с использованием как известных инженерных методик, так и методом конечных элементов с оценкой повреждаемости прокатываемого металла. Выбор температурного и деформационного режимов, обеспечивающих заданные механические свойства, производится с применением нейросетевых моделей обратного действия, а механические свойства проката при заданных параметрах процесса прогнозируются с применением нейросетевых моделей прямого действия.

В целом СИС, разработанная С.В.Денисовым, представляет собой комплексную методику для создания пакета новых технологий получения горячекатаного низколегированного высокопрочного проката. Определенными недостатками методологии является ориентированность на разработку технологий только контролируемой прокатки, а также оценивание результативности технологии без учета возмущающих воздействий на процесс. Кроме того, ЭВМ применяется в СИС только для расчета параметров по отдельным, самостоятельно функционирующим, разрозненным программам.

Ранний опыт применения ЭВМ для совершенствованию технологических систем прокатного производства, представленный в работах В.П.Полухина [24], Л.А.Кузнецова [25], В.А.Шилова и В.К.Смирнова [26] показал, что компьютерное моделирование целесообразно осуществлять с помощью единой программы, которая отображает весь комплекс явлений, существенных для анализа технологии. Нами было высказано мнение, что такая программа должна реализовывать методику автоматизированного проектирования [27]. В последствие работы В.Н.Скореходова и А.П.Долматова [28], В.Л.Мазура и А.В.Ноговицына [29] подтвердили, что наиболее эффективно задачи разработки и совершенствования режимов прокатки могут быть решены с применением автоматизированного проектирования. Целесообразность автоматизированного проектирования режимов деформации подтверждена также практикой других способов получения металлопродукции [например, 30].

Таким образом, в методологии проектирования технологий производства листового проката целесообразно учесть следующие аспекты. Во-первых, совершенствование технологии производства листового проката необходимо рассматривать как позитивное изменение ЛПТС, которое может проявляться как улучшение показателей производства уже выпускаемой продукции, освоение выпуска новой продукции с применением действующей обрабатывающей подсистемы, реконструкция действующей или строительство новой обрабатывающей подсистемы [9, 10]. Во-вторых, оценка изменения должна производиться с учетом последовательности необходимых технологических операций в их взаимосвязи с соответствующими средствами технологического оснащения. В-третьих, с целью минимизации времени поиска решения при достаточно высокой его достоверности процесс улучшения реализуется с применением автоматизированного проектирования. В-четвертых, при создании и совершенствовании технологий, а также при оценивании возможностей оборудования для выпуска новых видов листового проката важное значение имеет задача разработки режима прокатки.

Заключение

В методологии создания и совершенствования технологий листопркатного производства, которая позволит сократить время поиска эффективных решений при обеспечении удовлетворительно высокого уровня их достоверности и обоснованности, целесообразно учесть следующие аспекты.

1. При ограниченности множества технологических операций, могут быть реализовано большое количество вариантов технологий, которые отличаются одна от другой, по крайней мере, способом выполнения некоторой технологической операции.

2. Объектами разработки или совершенствования технологии производства листового проката могут быть как отдельные технологические операции или их элементы (переходы), система технологических операций, а также режимы осуществления одной или нескольких операций.

3. Совершенствование технологии производства листового проката необходимо рассматривать как позитивное изменение, которое может проявляться как улучшение показателей производства уже выпускаемой продукции, освоение выпуска новой продукции с применением действующей обрабатывающей подсистемы, реконструкция действующей или строительство новой обрабатывающей подсистемы.

4. Оценка изменения должна производиться с учетом последовательности необходимых технологических операций в их взаимосвязи с соответствующими средствами технологического оснащения.

5. С целью минимизации времени поиска решения при достаточно высокой его достоверности процесс улучшения реализуется с применением автоматизированного проектирования.

Библиографический список

1. Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года // Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/> (дата обращения: 02.05.2015).
2. Гугис Н.Н. Развитие прокатного производства Российской Федерации в 2015-2017 годах // Труды XI конгресса прокатчиков. Том I. 2017. С. 11-21.
3. Целиков А.И., Зюзин В.И. Современное развитие прокатных станов. М.: Металлургия, 1972. 400 с.
4. Вишневская Т.А. Повышение эффективности работы листовых станов, М.: Металлургия, 1981. 75 с.
5. Юсупов В.С. Некоторые тенденции развития листопркатного производства // Производство проката. 2005. № 2. С. 32-35.
6. ГОСТ 27.004-85 Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1986. 13 с.
7. ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ. 2012. 14 с.
8. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовки производства. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ. 2009. 8 с.
9. Румянцев, М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопркатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2017. №1. Т.15. С. 45-55.
10. Румянцев М.И., Завалищин А.Н. Листопркатная технологическая система и задача ее совершенствования // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2019. №1(28). С. 21-27.
11. Философский словарь / Под ред. И.Т.Фролова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Республика, 2001. 719 с.
12. Некрасова Н.А., Некрасов С.И. Философия науки и техники: Тематический словарь справочник. М.: МНИТ, 2009. 424 с.
13. Глоссарии терминов в области интеллектуальной собственности [Электронный ресурс] // URL: <http://new.fips.ru/glossariy/index.php> (дата обращения 20.02.2018).
14. Тютиков С.С. Объекты и признаки изобретений [Электронный ресурс] // URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/42048940.pdf> (дата обращения 20.02.2018).
15. Тверской Ю.А. Моделирование и совершенствование технологической системы производства широкополосной горячекатаной стали для сварных труб: дис. канд. техн. наук. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И.Носова», 2005. 120 с.
16. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. М.: Либроком, 2009. 280 с.
17. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: дис. д-ра техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, 2001. 404 с.
18. Алдунин А.В. Исследование, разработка и внедрение эффективных технологий производства полос и лент из стали и сплавов цветных металлов с заданными структурой и

- свойствами: дис. д-ра техн. наук. М.: Московский государственный открытый университет, 2011. 369 с.
19. Заверюха В.Н. Развитие и применение методов исследования и методов улучшения листовой прокатки на основе системного подхода: дис. д-ра техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И.Носова, 1990. 442 с.
 20. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. М.: Мир, 1981. 456 с.
 21. Кудрявцев Е.М. Основы автоматизированного проектирования: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 304 с.
 22. Голубчик Э.М. Развитие методологических основ адаптивного управления качеством металлопродукции в многовариантных технологических системах: дис. д-ра техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, 2014. 417 с.
 23. Денисов С.В. Развитие научных основ, создание и реализация эффективных технологий прокатки низколегированных стальных полос и листов с повышенными потребительскими свойствами: дис. док-ра техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, 2009. 368 с.
 24. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. М.: Metallurgia, 1972. 512 с.
 25. Кузнецов Л.В. Система автоматического проектирования технологии и оборудования тонколистовой холодной прокатки // Черная металлургия. Бюл. Ин-та Черметинформация. 1982, №24. С. 60-61.
 26. Шилов В.А., Смирнов В.К., Инарович Ю.В. САПР «Сортовая прокатка» и опыт ее использования // Обзорная информация ин-та Черметинформация: серия «Прокатное производство». Вып. 4. М.: Черметинформация, 1988. 21 с.
 27. Румянцев М.И. Опыт развития и применения автоматизированного проектирования режимов горячей и холодной прокатки листовой стали разнообразного назначения на станах различных типов // Труды IX конгресса прокатчиков 2013: сборник научных трудов. 2013. С. 43-54.
 28. Долматов А.П. Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали / А.П.Долматов, В.Н.Скороходов, В.П.Настич, А.Е.Чеглов. М.: Наука и технологии. 2000. 448 с.
 29. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (Численный анализ и технические приложения). Днепропетровск: РИА «Днепр-VALI», 2010. 500 с.
 30. Довженко Н.Н., Седельников С.Б., Васина Г.И. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов. Научное методическое обеспечение: монография. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2000. 196 с.

• INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH •

M.I.Rumyantsev, A.N.Zavalishchin

Nosov Magnitogorsk State Technical University

TECHNOLOGIES OF PRODUCE OF FLAT ROLLED PRODUCT AND SOME ASPECTS OF DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF THEIR ENGINEERING

Abstract. It is shown that with the limited number of technological operations can be implemented a large number of variants of technologies that differ from each other, at least by the realization method of some technological operation. It has been revealed that the project engineering of objects of flat rolling product technologies can be separate technological operations or their elements (transitions), system of technological operations, and modes of implementation of one or more operations. The main aspects of the methodology for creating and improving flat rolling

product technologies are substantiated, which reduces the time it takes to find effective solutions while ensuring a satisfactory high level of reliability and validity.

Keywords: hot-rolled flat product, cold-rolled flat product, flat rolled product technology, engineering, object of engineering, engineering methodology.

В.Ю.Рубцов

АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»

О.И. Шевченко

«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт (филиал)

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. Проведен обзор исследований на сегодняшний день в области поперечно-винтовой прокатки, как при производстве шаров, так и при производстве периодических профилей осесимметричной формы. Приведено историческое развитие процессов поперечно-винтовой прокатки периодических профилей от их появления до наших дней. Особое внимание уделено современным зарубежным разработкам китайских и польских ученых, которые, используя программы моделирования процессов как поперечно-винтовой, так и поперечно-клиновой и плоско-клиновой прокатки, провели детальное исследование этих процессов и предложили свои варианты решений. Представлен краткий обзор статей и анализ достигнутых результатов.

Ключевые слова: поперечно-винтовая прокатка, поперечно-клиновая прокатка, плоско-клиновая прокатка, поперечная прокатка, клиновинтовая прокатка, шар, периодический профиль, осесимметричный профиль, метод конечных элементов.

Введение. История появления станов прокатки шаров

Поперечно-винтовая прокатка является разновидностью процесса обработки металлов давлением, где формирование металла происходит между вращающимися в одном направлении валками, при этом круглая заготовка вращается в направлении, противоположном вращению валков и одновременно перемещается вдоль своей оси, в комплексе представляя собой винтовое движение (рис. 1.а) [1].

Впервые концептуальная модель валков была разработана и запатентована в Германии в 1888 [2], где поверхность валков представляла выполнение винтовых калибров на гиперболоиде, при этом, из-за сложности изготовления валков и малого искажения калибров, такой способ не получил применения. Следующая попытка разработки машины для производства шаров поперечно-винтовой прокаткой датируется 24 февраля 1925 г. [3], когда американский изобретатель Ходж подал заявку на патент «Машина для прокатки шаров». Принципиальное конструктивное отличие заключалось в том, что валки имели уже цилиндрическую форму с незначительной конусностью (углом подъема реборды). Уже в данном патенте подробно была описана принципиальная конструкция прокатной клетки с механизмами проводок, угловым и осевым смещением валков. Другой американский изобретатель Пол Кламп 2 июня 1934 г. предложил использовать данную конструкцию стана для изготовления коротких тел вращения, представив патент «Стан для прокатки изделий круглого сечения и неправильного профиля» [4]. В дальнейшем, для получения изделий, где длины заготовки значительно превышают диаметр, методом поперечно-винтовой прокатки, изобретателями из Японии были разработаны и получены патенты на конструкцию валков, обеспечивающих получение данных изделий [5]. При этом практическое применение вышеупомянутых технологий, а также их научное обоснование было проведено в СССР командой ученых ВНИИМЕТМАШ под руководством академика А.И.Целикова [6, 7] в 1940-1950 гг. В 1951 году был запущен первый промышленный стан производства заготовок подшипниковых шаров 25-50 мм, разработки ВНИИМЕТМАШ, в 1-ом ГПЗ в городе Москва, а в 1954 г., первый стан для производства мелющих шаров 25-50 на Калининском заводе им. 1-ого мая, в городе Тверь. Уже в 1960-е гг.

были разработаны и запущены станы для производства заготовок для машиностроения, по форме и размерам очень близкие к готовому изделию [8].

В последующем, с изменением рынка и отсутствием массовой потребности в однотипных заготовках, шаропрокатные станы ограничили только производством мелющих шаров, а также шаров и колец для подшипников качения.

Теоретические основы, предложенные А.И.Целиковым, использовались для разработки калибровок, используемых на станах поперечно-винтовой прокатки. В последующие годы методики расчета калибровок валков претерпели незначительные изменения. С появлением металлорежущего оборудования, имеющего возможность производить нарезку винтовой линии переменного параметра (токарные копировальные полуавтоматы, 4-х и 5-и координатные обрабатывающие центры), стали разрабатываться и применяться калибровки шаропрокатных валков с непрерывно-изменяющимся шагом [9] вместо используемых до этого калибровок с дискретно-изменяющимся шагом.

С развитием вычислительной техники и появлением программных сред моделирования процессов ОМД, исследования стали развиваться значительно интенсивнее и с началом XXI века появляется множество теоретических исследований процессов поперечно-винтовой прокатки, основанных на МКЭ. Существуют некоторые исследования, проводимые в России [10], но большинство исследований, основанных на компьютерном моделировании процессов поперечно-винтовой прокатки (рис. 1.а), а также пришедшего ему на смену более прогрессивного метода плоско-клиновой прокатки (рис. 1.в), при производстве стальных мелющих шаров и прочих тел проводилось учеными в КНР и Польше.

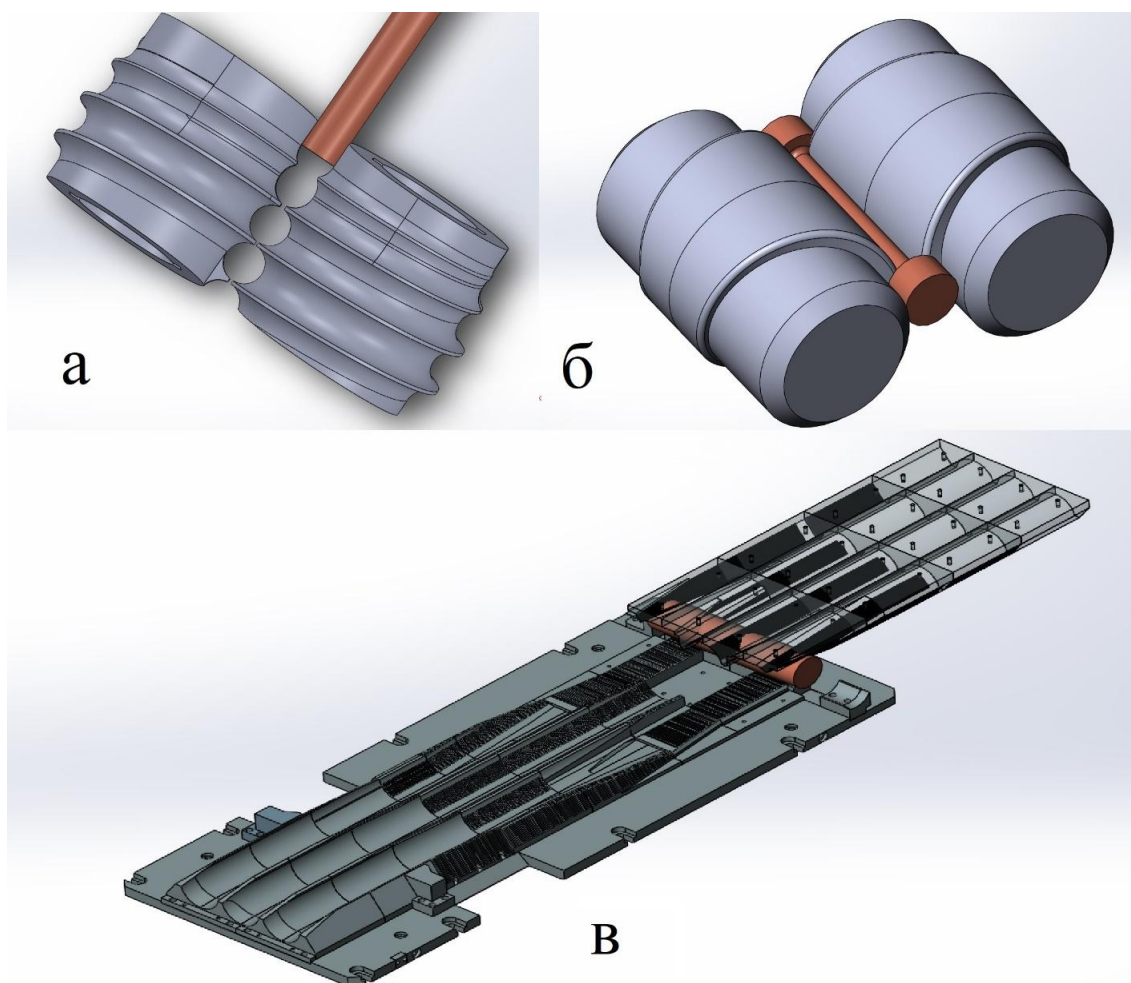


Рис. 1. Процессы прокатки для получения периодических профилей:
а – поперечно-винтовая прокатка, б – поперечно-клиновая прокатка,
в – плоско-клиновая прокатка

Для определения перспективности метода проектирования, используя программные модули, основанные на МКЭ, ниже будут рассмотрены основные достижения зарубежных ученых в области прокатки шаров и прочих тел за последние два десятилетия.

Исследования и достижения в области поперечно-винтовой прокатки и однородных процессов в КНР

В Китайской Народной Республике, в отличие от России и прочих стран, с учетом масштаба внутреннего и внешнего рынка, возникает потребность в продуктах массового производства, поэтому за последние два десятилетия, заимствуя знания о процессах поперечно-винтовой прокатки, было освоено и получено множество продуктов различных форм, представленных на рис. 2. Кроме шаров различных диаметров были получены ролики, короткие ступенчатые валы, шпильки и множество других продуктов [11]. Первые математические модели, основанные на проектировании с использованием метода конечных элементов, представлены в работе [12].



Рис. 2. Сортамент, получаемый поперечно-винтовой прокаткой

В перечисленных исследованиях модель была сформирована в программной среде ANSYS/LS-DYNA. В статье [11] был смоделирован процесс прокатки ступенчатой оси диаметрами 15 и 25 мм из круглой заготовки диаметром 30 мм и длиной 50 мм. Данный процесс прокатки претерпевает также радиальные обжатия, которые происходят с уменьшением межвалкового зазора в процессе перемещения заготовки.

В этом исследовании было показано, что при прокатке осей данным методом:

1. Достигнута прямая зависимость между распределением обжатий и переменной кривой заданного профиля. Нормальные точечные напряжения в центре заготовки находятся в состоянии растяжения.
2. Существует значительная разница в напряжениях между центральной областью поперечного сечения заготовки и периферией в процессе прокатки. В центральной области, создается напряжение на растяжение, а на поверхности – напряжение сжатия.
3. Пластическая деформация достигает пикового значения в областях на контактной поверхности и достаточно высокого значения в центре заготовки.

В другом исследовании [13] было проведено моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки шаров в системе ANSYS. В качестве материала был выбран алюминий. Согласно данному исследованию было выявлено, что при формировании и врезке реборды металл течет в обоих направлениях, соответственно объем, поступающий в шар, эквивалентен объему, переходящему в заготовку, что доказывает наличие растягивающих напряжений, которые значительно превышают напряжения сжатия. По данному исследованию были сделаны следующие выводы:

1. изменение поля деформаций и напряжений в процессе прокатки алюминиевого шара вызывает его асимметрию, что возможно получить с помощью программного моделирования и трудно получить с помощью аналитических методов расчета, также поясняется разреженность в центре алюминиевого шара;
2. посредством анализа полей напряжений шара из чистого алюминия выясняется, почему алюминиевый шарик имеет круглый косой пояс;
3. рассматривается множество факторов, влияющих на процесс образования шара из алюминия, построенная модель объективно отражает реальные промышленные условия, а по результатам моделирования возможно создание теоретической базы для проектирования валков при винтовой прокатке алюминиевого шара.

Другими словами, в данной статье впервые было подтверждено на полученной модели, что при калибровке шаропрокатных валков следует учитывать правило постоянства объема, т.к. данный процесс показал течение металла в двух направлениях (в калибр и обратно в заготовку), а также асимметричность распределения обжатий. Это исследование доказывает необходимость развалки калибра в начальных заходах для его дальнейшего полного заполнения.

Необходимость развалки калибров была установлена еще А.И.Целиковым и сформулирована как условие постоянного прилегания металла к реборде валка [7], но не имела прямых доказательств. В вышеприведенной статье [13] было показано распределение течения металла в процессе поперечно-винтовой прокатки и возникновение растягивающих напряжений.

В связи с вышесказанным, растягивающие напряжения создаются в центральной части заготовки вдоль ее оси. При превышении данных напряжений межкристаллической связи, происходит образование пустот. Данные пустоты могут достигать значительных размеров и образуют сплошное отверстие в металле, так называемый «Эффект Маннесмана» [14]. Данный феномен был назван в честь братьев Маннесманов, разработавших в 1891 году пилигримовый стан для прокатки бесшовных труб, что является зарождением поперечно-винтовой прокатки [15]. В отличие от прокатки труб, где образование пустот и, как следствие, сплошных отверстий в заготовке – основное условие процесса, при прокатке шаров их образование является нежелательным эффектом и иногда приводит к недопустимым дефектам.

В большинстве своем устранение данных дефектов происходит при помощи изменения калибровки валков, режимов прокатки (включая скорость и температуру прокатываемого металла). В Китае, где одним из наиболее важных параметров является высокая производительность, ученые пошли другим путем. В статье [16] описано, что число отходов металла достигает 23% в большей степени по причине образования шаров с внутренними пустотами. Для уменьшения процента отходов авторы не ограничивают процесс прокатки и допускают получение шаров с пустотами, но в дальнейшем данные шары подвергают прессованию, что позволяет практически полностью исключить пустоты, при этом полученная геометрия шаров не превышает допустимых отклонений и укладывается в стандарт. Согласно выводам данной статьи:

1. При помощи установленной механической модели, методом плоского прессования были устранены пустоты в стальных прокатываемых шарах и получены теоретические зависимости между факторами закрытия пустот. Затем, на основе модели конечных элементов, было изучено поведение металла, распределение напряжений и влияние параметров процесса на микроструктуру и напряженное состояние вокруг пустоты в образцах. Металл в стальном шаре в большей мере стремится к пустоте, и это представляет тенденцию к увеличению де-

формации и действующего напряжения от поверхности к центру шара. Кроме того, полное закрытие пустоты происходит, когда шар находится в следующих условиях: температура шара не менее 1000°C и создаваемое давление 150 МПа. Следовательно, только в определенном диапазоне температуры и давления ожидается реализация полного закрытия пустоты и измельчения зерна для получения лучших механических свойств, поэтому его необходимо строго соблюдать.

2. Поскольку действующее напряжение и температура в центре шара являются ключевыми факторами, для лучшего срастания иглоподобных пустот, трансформированных из макропустот, важно правильно подобрать параметры процесса для проката стальных шаров с различными диаметрами. Метод проектирования используется для получения отношения между параметрами процесса и действующими в центре шаров напряжениями, необходимыми для закрытия пустот. Впоследствии было выведено уравнение определения требуемой температуры и давления с помощью линейного подбора данных в программном обеспечении MATLAB, которое предоставляет теоретические данные по выбору параметров процесса.

3. Эксперимент плоского прессования был выполнен на оборудовании HIP (горячего изостатического прессования), в котором давление и температура воздуха могут достигать 200 МПа и 2000°C соответственно. Результаты эксперимента доказали, что пустоты исчезают и изменение геометрических размеров шаров составляет не более 5% при температуре 1200°C и создаваемом давлении 200 МПа в течение 2 часов, что полностью согласуется с результатами моделирования.

Также стоит отметить, что в Китае за последние два десятилетия произошло развитие поперечно-клиновой прокатки (рис. 1.б). Данный процесс максимально сходен с поперечно-винтовой прокаткой, потому что в нем происходят те же деформационные процессы. Их отличие заключается в том, что при поперечно-клиновой прокатке формирование профиля происходит за один оборот валка и валки в большинстве случаев находятся параллельно друг другу.

В ряде исследований были рассмотрены принципы поперечно-клиновой прокатки. Наиболее интересный способ прокатки ступенчатых валов был описан в статье [17], где были получены следующие результаты:

1. разработана модель многоклиновой прокатки с клиньями переменного шага, а также составлен принцип для определения основных технологических параметров клиньев на многоклиновых валках, что обеспечивает стабильность прокатки и проектирования валков с клиньями переменного шага;
2. по результатам анализа методом конечных элементов есть возможность смоделировать процесс прокатки полых ступенчатых валов валками с переменным шагом клина и найти эффективную технологию для получения точной и почти гладкой формы, формируемой полый оси или вала.

Согласно данному исследованию, используя принцип переменного шага, существует возможность проектировать валки для прокатки не только сплошных, но и полых деталей, что показывает нахождение оптимального распределения напряжений, позволяющих при прокатке сохранять исходную форму поверхностей, не находящихся в контакте с валком.

Наиболее подробное теоретическое обоснование процессу прокатки длинных валов и определение параметров клиньев с переменным шагом, а также теоретических углов развалки, описано в статье [18]. У каждого клина выделено три зоны: зона врезки, зона растяжения и калибрующая зона (рис. 3). Определены допустимые углы подъема клина и углы развалки, определена допустимая овализация профиля и выведены коэффициенты овализации при прокатке.

Согласно рис.4. были определены углы формирования α в диапазоне $35-50^{\circ}$, угол развалки β в диапазоне $2,5-4,5^{\circ}$ и площадь контакта ψ от 25 до 70%. В данных диапазонах определены тангенциальные усилия и овальность при сжатии заготовки в радиальном направлении, а также площади контакта. Доказано, что уменьшение угла растяжения и увеличение угла формирования может увеличить овализацию. Найдена зависимость, как уменьшение

площади влияет на овальность заготовки от комбинации осевого удлинения и пластического изгиба деформации. Угол растяжения больше влияет на овальность, чем угол формирования; изменение площади дает незначительный эффект для улучшения параметров процесса. Были определены коэффициенты для прогнозирования овальности, что облегчает выбор необходимых параметров. Основываясь на влиянии этих параметров на заготовке, был усовершенствован процесс поперечно-клиновой прокатки, позволивший получать полые оси высокого качества.

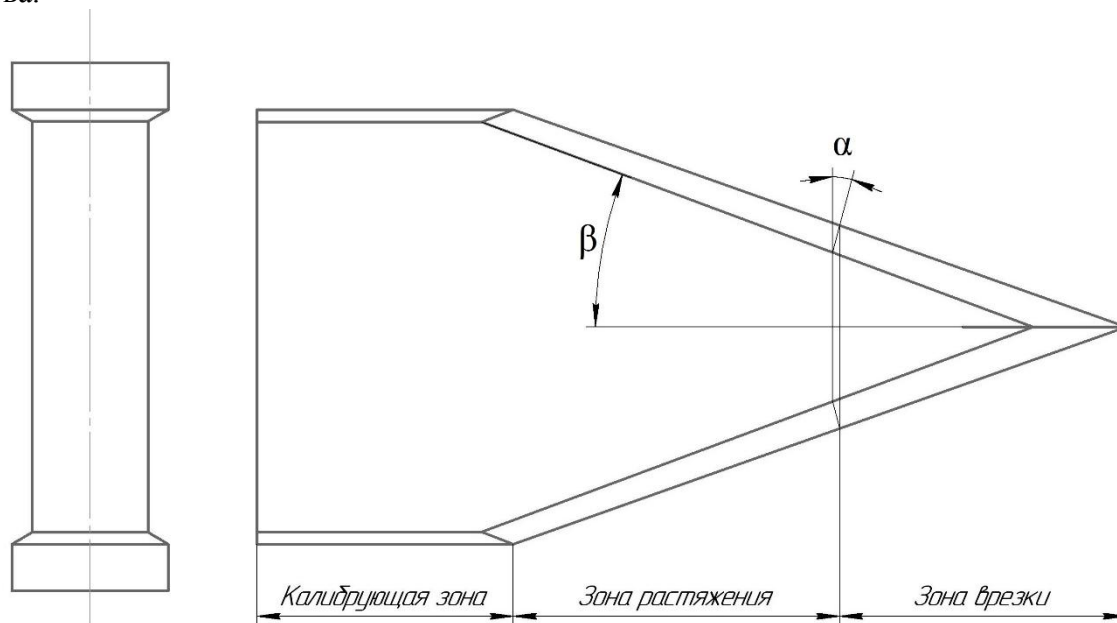


Рис. 3. Ключевые параметры заготовки и клина валька

В целом, проведенные китайскими учеными исследования в области поперечно-винтовой и поперечно-клиновой прокатки, в той или иной мере, были реализованы и внедрены на производственных площадках КНР, что показывает их высокий потенциал рациональности при производстве массовых партий изделий.

Исследования польских ученых в поперечно-винтовой и поперечно-клиновой прокатке

Основная часть их исследований заключается в моделировании процессов при помощи программного обеспечения методом конечных элементов. Так, ими был предложен способ прокатки шаров из головок рельсов [19]. Согласно данной статье существует возможность изготовления мелющих шаров из головок изношенных железнодорожных рельсов методом поперечно-винтовой прокатки, для чего:

1. головки изношенных рельсов предварительно перед прокаткой должны пройти боковую осадку, чтобы увеличить компактность формы поперечного сечения;
2. температура шаров, изготовленных с помощью данного метода, позволяет производить процесс закалки непосредственно с прокатного нагрева;
3. был разработан метод поперечно-винтовой прокатки при помощи конических валков, благодаря которым предварительное сечение заготовки обкатывается до попадания в зону формирования шаров и превращается в круглое, необходимое при прокатке шаров;
4. полученные максимальные значения силы и крутящего момента при моделировании данного метода значительно ниже, чем при прессовании в гидравлическом прессе;
5. были проведены опытные испытания поперечно-винтовой прокатки шаров из головок изношенных рельсов в лаборатории Люблинского технологического университета.

В дальнейшем авторы модифицировали способ получения мелющих шаров из головок изношенных рельсов более прогрессивным методом плоско-клиновой прокатки (рис. 1.в) [20].

Также данные ученые занимались моделированием процессов поперечно-винтовой прокатки деталей нетрадиционной формы, образованных осесимметричным профилем, пользующихся массовым спросом (аналогично проведенным ранее советским исследованиям [8, 9] и китайским исследованиям [11]), например, фрезерных головок, ступенчатых роликов дюбелей с шарообразной головкой и шипов, назвав данный процесс клиновинтовой прокаткой «Helical wedge rolling process». В статье [21] представлена компьютерная модель прокатки вышеперечисленных изделий. По результатам моделирования были приведены следующие выводы:

1. предложенный метод может быть использован для производства осесимметричных деталей сложной формы;
2. распределение эффективных нагрузок на элементах, произведенных методом клиновинтовой прокатки, аналогично распределениям нагрузок в процессах поперечно-винтовой прокатки, где возникают повышенные деформации из-за быстрого течения металла в окружном направлении;
3. при моделировании параметр разрушений показывает на то, что заготовка в процессе прокатки не должна разрушиться и на ней не образуются трещины;
4. несмотря на длительное время протекания клиновинтовой прокатки, температура заготовки не падает ниже предела температур горячей прокатки;
5. нагрузка на направляющие проводки в процессе прокатки во много раз ниже, чем на валки.

Согласно выводам, авторы предлагают осуществлять данный метод прокатки, используя его как перспективный при производстве осесимметричных деталей массового назначения и в последующих работах предоставляют результаты опытно-промышленных испытаний производства дюбелей с шарообразной головкой [22]. По результатам опытной прокатки в данной статье сделаны следующие выводы.

1. Основным преимуществом представленного процесса является высокая производительность, которая превышает используемые ранее технологии поперечно-клиновой прокатки и штамповки.
2. Процесс клиновинтовой прокатки обеспечивает получение высокоточных изделий. Кроме того, разработанная схема отделения готовых деталей от остальной заготовки является более эффективной, чем схема отделения деталей, прокатанных по технологии поперечно-клиновой прокатки.
3. Экспериментальными исследованиями было подтверждено предполагаемое критическое значение триггера, которое составляет 2,75, что инициирует удаление перемычек для отделения деталей.
4. Полученные напряжения, нагрузки и температура схожи с теми, которые наблюдаются при поперечно-клиновой прокатке.

Также как и с производством шаров из головок рельсов, авторы предлагают в качестве альтернативного способа производство данных дюбелей с шарообразной головкой методом плоско-клиновой прокатки [23] с проведением как моделирования, так и опытно-промышленных испытаний.

Также был предложен способ производства резьбовых винтов как трёхвалковой поперечно-винтовой, так и плоско-клиновой прокаткой, с приведением результатов опытно-промышленных испытаний при производстве винтов для крепления шпал Ø22 мм на промышленном стенде [24]. Основные заключения по данному исследованию:

1. Преимущество данной технологии заключается в возможности формирования резьбы в любой части вала.

2. В процессе прокатки заготовка смещается в осевом направлении в результате разнополярности осевых сил. Точное определение этого смещения и его дальнейшая нейтрализация – основная технологическая задача для правильного проведения процесса прокатки.

3. При помощи специального инструмента возможно одновременное производство 2-х винтов для крепления шпал.

Авторами из Люблинского технологического университета было предложено производство множества изделий, образованных осесимметричными профилями неклассической формы, описанных выше, и даже выделен отдельный метод, названный клиновинтовой прокаткой, ранее известный как поперечно-винтовая прокатка. Но, несмотря на это, в отличие от Китая, Европейский рынок больше направлен на выполнение индивидуальных заказов и отсутствие массового рынка такого масштаба для производства однотипных периодических профилей, поэтому основной объем исследований был проведен по использованию метода поперечно-винтовой прокатки при производстве мелющих шаров.

Одно из первых исследований, проведенных учеными с получением опытной партии шаров, было проведено в 2013 году при производстве шаров Ø30 мм на валках поперечно-винтовой прокатки [25]. Шары при этом имели значительные дефекты, включая неотделяемые перемычки в виде «гирлянд». Положительным эффектом в ходе этого испытания было то, что результаты моделирования (рис. 4.а), включая наблюдаемые нагрузки, температуры и прочие параметры, а также дефекты, полученные на шарах со значительной степенью точности, сошлись с результатом, полученным опытной прокаткой (рис. 4.б).

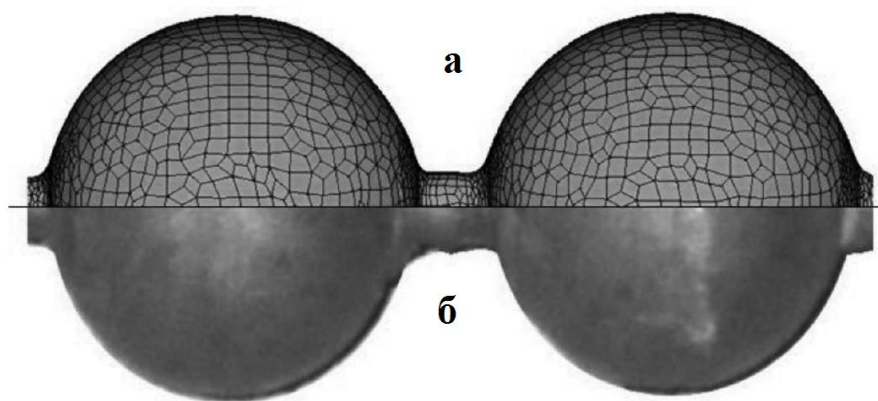


Рис. 4. Сравнительный анализ результатов моделирования и опыта

Дальнейшие работы польских исследователей по прокатке шаров в большей мере проводились с использованием моделирования по методу конечных элементов.

Для процесса моделирования многозаходной поперечно-винтовой прокатки шаров (с 4-мя заходными валками), которые используются для повышения производительности шаропрокатных станов, использовалось программное обеспечение Simufact.Formingv.12 simulation [26]. Согласно приведенным в статье выводам:

1. эффективность прокатки увеличивается пропорционально количеству примененных заходов;
2. во время прокатки нагрузки и крутящий момент изменяются циклически в пределах $\pm 6\%$ от их среднего значения, что происходит благодаря работе валка одновременно в нескольких калибрах и приводит к стабилизации процесса.

В следующем исследовании для анализа характера износа валков авторами использовалась программа SimufactEngineering, как результат соединения двух программных модулей: MSC.SuperForm и MSC.SuperForge [27].

Согласно данному исследованию было доказано, что нагрузки и крутящий момент в процессе винтовой прокатки шаров имеют характерные периодические колебания, при этом износ инструмента деформации возникает из-за множества факторов. Металлообработка вы-

зывает износ инструмента. Самый распространенный тип износа инструмента в процессах прокатки металла – абразивный износ. Износ инструмента при прокатке вызывает увеличение размеров готового продукта.

Выделены основные факторы износа.

Один из наиболее важных факторов, влияющих на износ инструмента в процессах прокатки металла, является проскальзывание металла в валке. Скольжение на контактной поверхности металлорежущего инструмента происходит из-за разности скоростей по боковой стороне реборды, что влияет на процесс трения.

Также выявлено, что износ инструмента уменьшается с повышением температуры металла.

Первый и второй оборот на валке чаще всего подвержен износу. Износ на первом обороте винтовой канавки валка является самым высоким, потому что в нем происходит глубокий врез в заготовку, для обеспечения начала процесса прокатки. На третьем обороте валка наблюдается наименьший износ, так как в данной области происходит окончательное формирование шара и износ распространяется по всей площади контакта равномерно.

Когда процесс происходит при самой низкой возможной температуре, около 850°C, повышенный износ наблюдается по всей длине инструмента. При максимальной температуре – 1150°C, наблюдаемый износ инструмента значительно меньше и не превышает 0,001 мм, при этом на первой врезной реборде также продолжает наблюдаться повышенный износ.

В следующей статье авторы изучают влияние параметров процесса (диаметра заготовки, температуры нагрева заготовки перед прокаткой) на качество получаемых шаров на примере получения шаров с условным диаметром 40 мм [28]. В основных выводах данного исследования сообщается:

1. Диаметр заготовки оказывает наибольшее влияние на качество выпускаемых шаров. Следовательно, правильная калибровка позволяет прокатывать шары требуемого качества из стальных прутков, изготовленных по обыкновенному классу точности. Однако процесс прокатки также сильно зависит от начальной температуры заготовки. При этом температуру предварительного нагрева заготовки следует выбирать так, чтобы шары могли подвергаться термической обработке сразу после прокатки.
2. Самая высокая геометрическая точность шаров достигалась, когда шары прокатывались из заготовки диаметром 40 мм (то есть диаметр заготовки был на 3,5% меньше диаметра шара).
3. Использование заготовки, диаметром на 6% меньше диаметра шара, приводит к недостаточному заполнению; тем не менее, достигнутая геометрическая точность прокатываемого изделия достаточна для использования его как мелющего тела.
4. Использование диаметра заготовки равного или большего диаметру получаемых шаров, вызывает переполнение и серьезные дефекты поверхности шаров.
5. Заготовка должна быть предварительно нагрета до минимально возможной температуры, чтобы можно было произвести термообработку шаров сразу после процесса прокатки.
6. Когда температура предварительного нагрева заготовки слишком высока, появляются проблемы с удалением перемычек от получаемых шаров, в связи с чем, они часто остаются на шарах.
7. Переполнение в результате слишком большого диаметра заготовки или применения низкой температуры предварительного нагрева приводит к внезапному увеличению силовых параметров, что уменьшает срок службы инструмента.
8. Значительная аппроксимация между экспериментальными данными и результатами моделирования конечных элементов доказывает, что программное моделирование может быть использовано для анализа сложных процессов обработки металлов.

Наиболее необычным из предложенных данными авторами процессов прокатки шаров является способ их производства поперечной прокаткой [29].

Согласно заключению авторов статьи:

1. Предложенный метод поперечной прокатки может быть использован для формирования шести шаров одновременно диаметром 100 мм. При прокатке шести шаров диаметром 100 мм, минимальная длина валка должна быть равна 800 мм. Если валки имеют меньшую длину, количество одновременно произведенных шаров будет уменьшено.
2. Предлагаемый процесс поперечной прокатки для изготовления шаров может быть выполнен, либо двумя плоскими инструментами (плоско-клиновая прокатка), или с использованием двух валков (поперечная прокатка). Прокатные станы, оснащенные двумя валками, встречаются гораздо чаще. Когда процесс прокатки выполняется с использованием валков, прокатный стан должен также быть оснащен двумя направляющими проводками для удержания правильного положения заготовки в рабочем пространстве.
3. Точность производимых шаров достаточно низкая, но при этом форма и размеры производимых шаров по предлагаемому способу удовлетворяют требованиям, предъявляемым к мелющим шарам.
4. Шары, полученные при поперечной прокатке с двумя валками, имеют более высокую точность форм и размеров, так как заготовка точно позиционируется в рабочем пространстве прокатного стана. Некорректное позиционирование заготовки может привести к различным дефектам, таким как недостаточное заполнение одного из боковых шаров, переполнение вследствие перекоса положения заготовки и возникновения трещин по оси шара.
5. Предлагаемый способ прокатки для изготовления шаров диаметром 100 мм характеризуется высокой производительностью, составляющей 7,2 т/ч для двухвалкового варианта процесса. Применение прокатных станов, оснащенных двумя валками предотвращает работу инструмента на холостом ходу (в отличие от плоско-клиновой), что может привести к увеличению эффективности процесса прокатки. Производительность данного процесса прокатки также во многом зависит от эффективности нагрева заготовки.
6. Температура полученных шаров достаточно высока, чтобы проводить закалку без повторного нагрева. Если температура производимых шаров будет слишком высока, шары следует подвергать дополнительному охлаждению на конвейерах, транспортирующих их в закалочный бак.
7. С другой стороны, температура не должна быть слишком низкой, так как это помешает правильному проведению процесса закалки.
8. Предложенный процесс поперечной прокатки для производства шаров диаметром 100 мм может быть реализован с использованием промышленных прокатных станов, широкодоступных на рынке. В результате стоимость внедрения новой технологии изготовления будет достаточно низкой. Кроме того, прокатные станы этого типа могут быть использованы для проката других осесимметричных деталей, что будет способствовать повышению гибкости производства при выполнении производственных компаний.

Однако, в силу всего вышесказанного, процесс поперечной прокатки, даже при возможности одновременного формирования нескольких шаров за один оборот требует проведения дополнительных затратных мероприятий для установки заготовки в межвалковое пространство и имеет трудности с автоматизацией процесса. Поперечная прокатка в большей мере используется для изготовления деталей более сложной конфигурации и значительной длины, где другие способы прокатки неприемлемы. А для производства шаров поперечно-винтовая прокатка и плоско-клиновая более эффективны, т.к. подвергаются автоматизации и являются в большей мере производительными. Поперечно-винтовая эффективна по причине торцевой задачи заготовки, где возможна непрерывность процесса, а плоско-клиновая за счет отсутствия направляющих проводок и самодостаточности самого инструмента деформации, что приводит к уменьшению дополнительных операций на установку заготовки в межвалковый зазор.

В последней рассматриваемой публикации данных авторов [30] описываются различные конструкции шаропрокатных валков, преимущества и недостатки той или иной калибровки шаропрокатных валков.

Согласно заключению данного исследования:

1. Разработанная цифровая модель процесса поперечно-винтовой прокатки для изготовления шаров позволяет изучать изменение формы шара в процессе прокатки и грамотно моделировать операцию разделения шаров.
2. Рассчитанные силовые параметры (радиальная нагрузка и крутящий момент) показывают высокую степень согласия с экспериментальными данными.
3. Поперечно-винтовая прокатка может быть выполнена с использованием винтовых валков с разными формами и размерами реборд. Авторами представлены три варианта валков для прокатки шаров диаметром 125 мм без поверхностных дефектов и внутренних трещин. Принципиальные отличия данных валков заключаются в форме реборды заходной части валка.
4. Использование валков с клиновидными ребордами обеспечивает оптимальное заполнение, равномерную деформацию материала и стабильность силовых параметров в процессе прокатки. Использование валков с широкой ребордой на заходе позволяет получить устойчивый процесс захвата и минимальный износ на заходе, но при этом нагрузки, возникающие в процессе прокатки, значительно выше, чем в других разработанных моделях. Использование валков с узкой ребордой на захвате создает плавную врезку в металл и наименьшие нагрузки, но при этом создается их повышенный износ за счет малой площади контакта.
5. Также для каждого типа разработанных валков представлена аналитическая модель расчета их калибровок для последующего использования.

В целом, подводя итог обзора исследований, проведенных группой польских ученых из Люблинского технологического университета, следует отметить, что данными учеными были исследованы методы прокатки периодических профилей, выведенных в отдельную группу клиновинтовой прокатки. При этом практически все исследования заключались на принципе проектирования методом конечных элементов, что в своё время является ничем иным, как проверочным расчетом правильности калибровки валков с отсутствием теоретического обоснования оптимальности параметров калибровок. В отличие от советских и китайских, данные исследования и разработки не получили широкого промышленного применения и остановились на этапе опытных прокаток. При этом стоит отметить особый вклад авторов в детальное исследование процессов поперечно-винтовой прокатки шаров, в котором были изучены не только процессы калибровки валков и расчет энергосиловых параметров, а также износ валков, его причины, влияние формы реборд, клиньев, элементов валков, температуры и диаметра заготовки на качество получаемых шаров и прочие условия процессов прокатки.

Прочие исследования, проводимые в прокатке периодических профилей. Выводы

Кроме перечисленных выше исследований, охвативших процессы поперечно-винтовой прокатки периодических профилей, масштабные разработки в данной области отсутствуют. Так, к примеру, существует исследование немецких ученых аналогичного процесса поперечной прокатки при раскатке вала [31], где представлены результаты экспериментальных исследований, которые показывают влияние параметров процесса: температуры, геометрии инструмента и скорости на качество продукции. Экспериментальные результаты также проверены методом конечных элементов. Соответственно, данное исследование одним из первых представляет собой моделирование процессов поперечной прокатки методом конечных элементов, используя программное обеспечение.

Из исследований последних лет стоит отметить моделирование прокатки шаров учеными из Украины [32], где подробно рассмотрен процесс моделирования прокатки шаров на шаропрокатных станах.

В Европе и других развитых странах, где, в силу отсутствия массовой потребности однотипных периодических профилей, станы поперечно-винтовой прокатки не нашли широкого применения. В связи с тем, что за последние 30 лет произошло масштабное развитие металлорежущего оборудования, а именно появились 4-х и 5-и координатные обрабатывающие центры, способные изготавливать детали любой сложности, в развитии прокатки периодических профилей поперечно-винтовая прокатка уступила место более прогрессивному методу –

плоско-клиновой прокатке. Однако множество станов поперечно-винтовой прокатки периодических профилей, построенных начиная с 50-х годов 20 века в России, странах СНГ и в КНР продолжают функционировать и производить шары (в редком случае другие продукты) и еще долгое время будут оставаться востребованными. Кроме того за последние годы были введены в производство новые шаропрокатные станы на таких предприятиях как «Северсталь» (Череповец), KSP Steel (Павлодар), УГМК (Сухой Лог), ЕВРАЗ НТМК (Нижний Тагил), поэтому совершенствование процессов поперечно-винтовой прокатки при производстве мелющих шаров на сегодняшний день является актуальной темой для научных изысканий и развития.

Библиографический список

1. A. Tofil, Z. Pater Overview of the research on roll forging process // *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 11, Issue 2, June 2017, pp. 72-86.
2. Патент Германии №42849 от 04.04.1888 г.
3. Hodge G.O. Machine for forming balls. US №1665361 (10.04.1928).
4. Klamp P. Mill for rolling articles of circular section and irregular profile US №2060087 (10.11.1936).
5. Патент Японии JP1372968 от 01.03.1968 г.
6. Грановский С.П., Громов А.А., Ефанов В.И. Прокатка шаров // *Сталь*. 1956. №4.
7. Специальные прокатные станы / А.И.Целиков, М.В.Барбарич, М.В.Васильчиков и др. М.: Металлургия, 1971. 336 с.
8. Шор Э.Р. Новые процессы прокатки. М.: Металлургиздат, 1960. 387 с.
9. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах. М.: Металлургия. 1980. 116 с.
10. Восканьянц А.А., Иванов А.В. Моделирование процессов холодной поперечно-винтовой прокатки методом конечных элементов // *Производство проката*. 2004. №11. С. 10-17.
11. Haibo Yang, Lijie Zhang and Zhenghaun Hu The Analysis of the Stress and Strain in Skew Rolling // *Advanced Materials Research*. 2012. 1650-1653 pp.
12. Yang, S.-C.; Chen, C.-K. The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 215. 2001. 523-532 pp.
13. Shi Xiao-min, Wang Bao-yu, Numerical simulation of Al ball forming process in skew rolling // *Materials Science Forum*. 2012. 151-154 pp.
14. Кожевникова Г.В. Условия устойчивого протекания поперечной и поперечно-клиновой прокаток // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2009. №1(22). С. 44-53.
15. Hatzfeld, Lutz, "Mannesmann, Reinhard" in: *Neue Deutsche Biographie* 16 (1990), S. 62 f.
16. Chang Shu, Jitai Wang, Xuedao Shu, Duanyang Tian Influencing Factors of Void closure in Skew-Rolled Steel Balls Based on the Floating-Pressure Method // *Materials*. №12. 1391. april 2019. pp. 1-15.
17. Cuihua Liu, Zhiping Zhong, Zhi Shen Influence of reduction distribution on internal defects during crosswedge-rolling process // *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*. 2014. pp. 263-267.
18. Cuping Yang, Zhenghuan Hu. Research on the ovality of hollow shafts in cross wedgerolling with mandrel // *Int J Adv Manuf Technol*. 2016. pp. 67-77.
19. Zbigniew Pater Analisis of helical rolling process of balls formed a head of a scrapped rail // *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 10. №30. June 2016. pp. 110-114.
20. Zbigniew Pater, Janusz Tomchzak, Tomask Bulzak A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails // *Procedia Manufacturing* 11. 2017. pp. 466-473.

21. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak FEM modeling of a helical wedge rolling process for axisymmetric parts // *Advances in Science and Technology Research Journal*. Volume 12. Issue 1. March 2018. pp. 115-126.
22. Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak, S. Martyniuk A helical wedge rolling process for producing a ball pin // *Procedia Manufacturing* 27, 2019. pp. 27-32.
23. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Tomasz Bulzak Cavity formation in cross-wedge rolling processes // *J. Iron Steel Res. Int*, 2018. pp. 1-10.
24. Z. Pater, A. Gontarz, W. Weroniski New method of thread rolling // *Journal of Materials Processing Technology* 153–154, 2004. pp. 722-728.
25. J. Tomczak, Z. Pater, J. Bartnicki skrew rolling of balls in multiple helical impression // *Archives of metallurgy and materials* Volume 58, - Issue 4. 2013. 1071-1076.
26. Z. Pater A thermomechanical analysis of the multi-wedge helical rolling (MWHR) process for producing balls // *METABK* 55(2), 2016. pp. 233-236.
27. P. Chyla, Z. Pater, J. Tomczak, P. Chyla Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls // *Arch. Metall. Mater.*, Vol. 61, №2, 2016. 485-492.
28. Janusz Tomczak, Zbigniew Pater, Tomasz Bulzak The Effect of Process Parameters in Helical Rolling of Balls on the Quality of Products and the Forming Process // *Materials*. October 2018. pp. 1-15.
29. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Tomasz Bulzak An Innovative Method for Forming Balls by Cross Rolling // *Materials* September. 2018. 1-14.
30. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Jaroslaw Bartnicki, Tomasz Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls // *Metals*, October 2018. pp. 1-14.
31. M. Houska, M.-I. Rotarescu Experimental and finite-element analysis of axial feed bar rolling (AVQ) // *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II. 1999. pp. 1523-1528.
32. D. Sokhan, V. Makovei, P. Protsenko Modeling ball rolling in spiral rolls // *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol 83, №2. 2018. pp. 24-30.

● INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH ●

V.Y. Rubtsov

EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant

O.I. Shevchenko

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

Nizhny Tagil technological Institute (branch)

**OVERVIEW OF FOREIGN RESEARCHES IN THE AREA
OF CROSS-HELICAL ROLLING PROCESS FOR THE PRODUCTION
OF STEEL GRINDING BALLS AND AXISYMMETRIC PARTS**

Abstract. The review of studies in the field of helical rolling is carried out, both in balls production and in the axisymmetric shapes periodic profiles production. The historical development of the processes of cross-helical rolling of periodic profiles from their beginning to the present day is given. Significant attention is paid to modern foreign developments of Chinese and Polish scientists, who, using programs for modeling processes of both cross-helical rolling and cross-wedge rolling and flat-wedge rolling, conducted a detailed study of these processes and offered their own solutions. The brief review of the articles and the results analysis are presented.

Keywords: cross-helical rolling, cross-wedge rolling, flat-wedge rolling, helical-wedge rolling, wedge rolling, ball, periodic profile, axisymmetric profile, finite element method.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьева Маргарита Владимировна – старший преподаватель кафедры информатики и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Область исследований: металлургия, автоматика, вычислительная техника. Тел.: +79124013387.
E-mail: nansy_stokli@mail.ru.

Завалищин Александр Николаевич – докт. техн. наук, профессор кафедры литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». E-mail: zaval1313@mail.ru.

Калугина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Область исследований: металлургия, автоматика, вычислительная техника. Тел.: +79193278622.
E-mail: kalugina.olga@bk.ru.

Красулин Алексей Сергеевич – ведущий инженер отдела горных работ АО «ЕВРАЗ-КГОК».

Михайлова Ульяна Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Область исследований: металлургия, автоматика, вычислительная техника. Тел.: +79124013387.
E-mail: ylianapost@gmail.com.

Рубцов Виталий Юрьевич – калибровщик рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», аспирант Уральского федерального университета. Область исследований: поперечно-винтовая прокатка, металлургические печи. Тел.: +79533836810. E-mail: uriylot@mail.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Afanaseva Margarita Vladimirovna – senior lecturer of «Informatics and Information security» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Research themes: metallurgy, automation, computer science. Phone: +79124013387.
E-mail: nansy_stokli@mail.ru.

Zavalishchin Aleksandr Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of «Foundry engineering and Materials science» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. E-mail: zaval1313@mail.ru.

Kalugina Olga Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Informatics and Information security» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Research themes: metallurgy, automation, computer science. Phone: +79193278622.
E-mail: kalugina.olga@bk.ru.

Krasulin Aleksei Sergeevich – Leading mining engineer of EVRAZ KGOK.

Mikhailova Ulyana Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Informatics and Information security» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Research themes: metallurgy, automation, computer science. Phone: +79124013387.
E-mail: ylianapost@gmail.com.

Rubtsov Vitaly Yurievich – roll pass designer of rail and structural steel mill department of EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant, post graduate student of Ural Federal University. Research themes: Cross-helical-rolling, Multi-stage furnace. Phone: +79533836810.
E-mail: uriylot@mail.ru.

Румянцев Михаил Игоревич – докт. техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Область исследований: совершенствование технологии производства листового проката на основе развития методологии анализа листопрокатных технологических систем. Тел.: +79320139323. E-mail: mir@magtu.ru.

Серебренников Александр Алексеевич – ведущий специалист электротехнической лаборатории АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат».

Шевченко Олег Игоревич – докт. техн. наук, заведующий кафедрой металлургических технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» Нижнетагильский технологический институт (филиал).

Rumyantsev Mikhail Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of «Technologies of Material Processing» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Research themes: sheet and plate production. Phone: +79320139323. E-mail: mir@magtu.ru.

Serebrennikov Aleksandr Alekseevich – Leading electrical Specialist of EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant.

Shevchenko Oleg Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of metallurgical technologies «Federal University named after first President of Russia B.N.Yeltsin» Nizhny Tagil technological Institute (branch).