

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



ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
КАЛИБРОВОЧНОЕ БЮРО

ВЫПУСК 12

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

SiKE

SOFTWARE



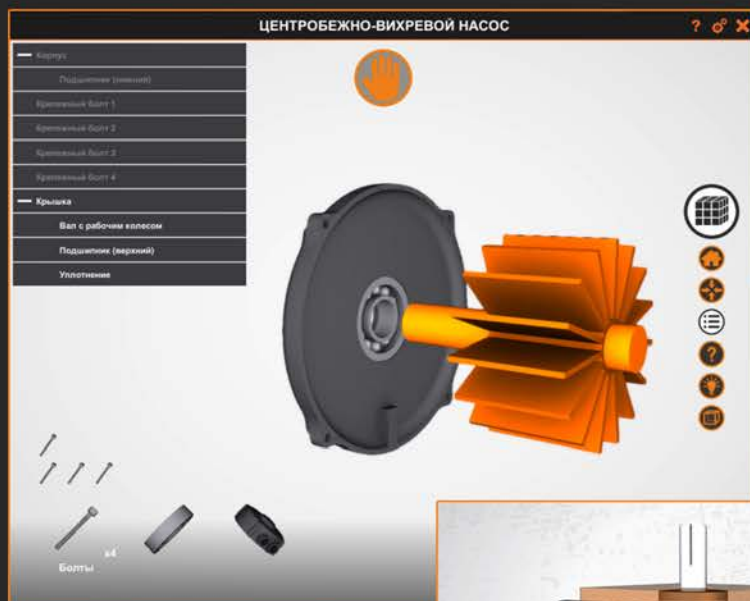
МЫ ПРЕДЛАГАЕМ ГОТОВЫЕ РЕШЕНИЯ

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

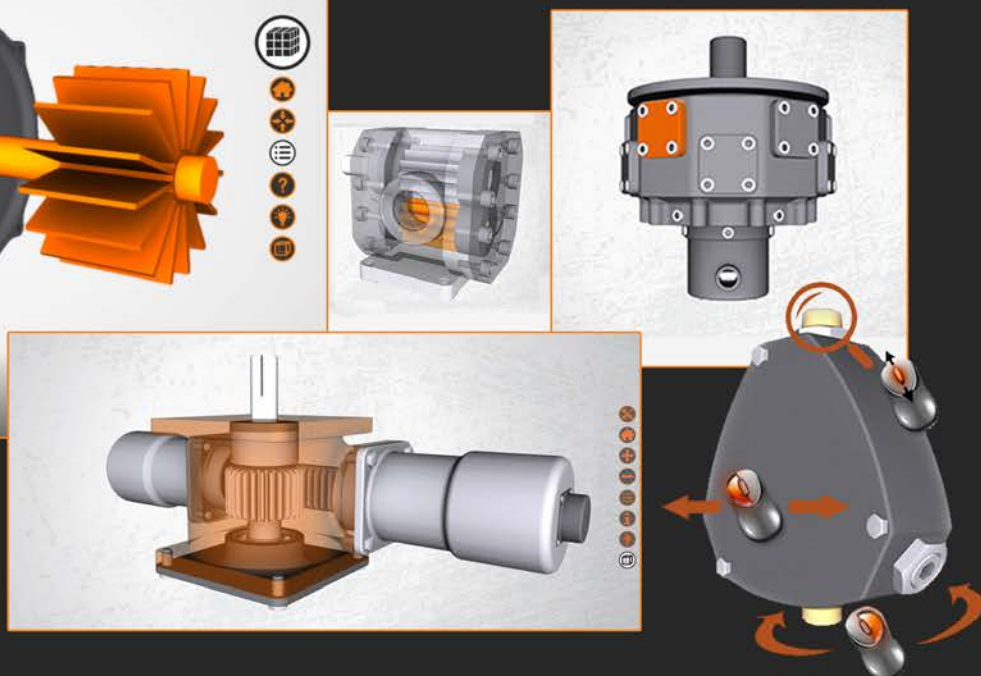
- Проблемы с текучкой кадров?
- Неоправданные затраты на обучение?
- Сотрудники долго и некачественно выполняют ремонт?

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 12

Дата опубликования: 30.06.2018.

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>Г.К.Рожков, С.А.Левандовский</i>	
РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ МИНИ-ЗАВОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОГО ПРОКАТА	5
<i>В.Ю.Рубцов, Д.В.Гаев, С.В.Борисов</i>	
МОДЕРНИЗАЦИЯ КОРИДОРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА РЕЛЬСОВ ПОД ЗАКАЛКУ	10
Листопрокатное производство	18
<i>М.И.Румянцев, А.Н.Колыбанов</i>	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРОЩЕНИЯ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛКОВ И ПРОФИЛЯ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КЛЕТИ КВАРТО	18
<i>А.Н.Колыбанов</i>	
УПРОЩЕНИЕ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИИ ВАЛКОВ И ПРОФИЛЯ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КЛЕТИ КВАРТО С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	22
Производство специальных видов проката	26
<i>В.Ю.Рубцов</i>	
КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ КРИВЫМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА.....	26
Производство гнутых профилей.....	34
<i>A.V.Filimonov, S.V.Filimonov</i>	
FORMING DIAGRAMS AND ROLL-PASSES IN ROLL-FORMING OF SECTIONS WITH MIDDLE RIGIDITY ELEMENTS	34
<i>С.В.Поворов</i>	
СПОСОБ РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ В РОЛИКАХ	41
Сведения об авторах	51

Г.К.Рожков, С.А.Левандовский
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ МИНИ-ЗАВОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

Аннотация. В статье представлена актуальная информация по состоянию мирового рынка стали и раскрыты причины заинтересованности производителей металлургического оборудования и инвесторов в развитии концепции мини-заводов. Так же в статье дана необходимая информация для понимания концепции мини-заводов и представлены виды их классификации. Показаны сильные и слабые стороны мини-, микро- и нано- заводов. Рассмотрены возможности дальнейшего развития мини-заводов в России и в мире. Приведены примеры уже введенных в эксплуатацию объектов.

Ключевые слова: мини-завод, микро-завод, нано-завод, мировой рынок стали, новая нормальность, ЛПА, mini-mill, железо прямого восстановления.

В контексте проведенных научно-исследовательских работ на кафедре технологий обработки материалов МГТУ им. Г.И.Носова интересным является вопрос состояния рынка мини-заводов в мире в целом и на территории Российской Федерации в частности [1, 2].

Мировой рынок стали, к настоящему моменту, перешёл в состояние, которое зарубежные эксперты называют «период новой нормальности потребления металлов». Этому периоду предшествовал бурный рост китайской экономики и, как следствие, очень быстрый прирост годового потребления стали. Сейчас же на мировом рынке повторяется ситуация 1976-2000 годов (период предыдущей «новой нормальности»), характеризующаяся медленным ростом потребления стали в год – в среднем 1-2 %.

Вместе с тем фактом, что в настоящее время мировые мощности по производству металлопродукции загружены примерно на 70 % (с дельтой в 2 %, в зависимости от источника), мы получаем безрадостную картину для металлургической отрасли, и в частности для производителей металлургического оборудования. Капиталовложение в новое производство снижается в среднем на 30-35 % третий год подряд. Сейчас отрасль и её поставщики совместно пытаются приспособить избыток мощностей и иные факторы к текущему снижению роста потребления.

В свете вышесказанного, ориентация мировых производителей металлургического оборудования на технологии мини-заводов кажется наиболее логичным ходом. Подтверждением этому может являться четвёртая конференция «Danieli. Реальные инновации» (Fourth Danieli Innovation Meeting) проведённая с 3 по 5 октября 2017 года в штаб-квартире Danieli в Италии. Одной из ключевых тем упомянутой конференции были мини металлургические заводы и технологии с ними связанные [3].

Чтобы вести конструктивный разговор о каком-либо предмете, для начала необходимо определиться, что конкретно понимать под этим предметом. Что же такое мини-завод? Исходя из названия, мини-завод – это металлургический завод, выпускающий относительно малый объем и ассортимент готовой продукции, географически занимающий относительно небольшие площади.

Несмотря на то, что сейчас при упоминании мини-завода понимают максимально электрифицированное предприятие (дуговые сталеплавильные печи, электронагрев заготовок и т.д.), первые мини-заводы были организованы на базе мартеновских печей. Более того, можно сказать, что мини-заводы были всегда. Примерами таких заводов на территории РФ могут служить Омутнинский металлургический завод, основанный 245 лет назад и Гурьевский завод, основанный в 1816 году и до сих пор использующий мартены с общей производительностью 210 тыс. тонн в год [4].

Однако впервые о понятии мини-заводов (или как их ещё называют mini-mill) заговорили в США. Первый, полноценный мини-завод, построенный компанией Chaparral Steel,

был пущен в 1975 году в штате Техас, США. Он обладал всеми отличительными признаками мини-заводов – электродуговая сталеплавильная печь, непрерывная разливка стали и малый объем производства (200 тыс. тонн арматуры в год).

Так же из-за связи с первыми мини-заводами США, мини-заводы связывают с производством арматуры, по большей части из некачественной стали, полученной из передельного лома. Некоторые вспоминают об американской компании Nucor, которая планомерно отвоевала рынок полосы в США за счёт широкого внедрения литейно-прокатных агрегатов (ЛПА).

Очень часто мини-заводы являются основными поставщиками узкоспециализированных видов проката, как например, Гурьевский завод (Сибирь, Кемеровская область), который кроме широкого спектра фасонных и простых профилей является поставщиком четверти всех мелющих шаров, используемых в измельчении минерального сырья. Более того, благодаря нововведениям, завод наладил производство шаров повышенной объемной твердости, не имеющих аналогов в России. Это позволило ему занять одну из лидирующих позиций в данной области.

Омутнинский металлургический завод, расположенный в Кировской области является одним из крупнейших производителей стальных фасонных профилей высокой точности среди предприятий черной металлургии России и Европы. Его сортамент насчитывает 1200 профилей (автомобилестроение, лифтостроение, горнодобывающая промышленность, станкостроение, судостроение, товары народного потребления и различный сортовой прокат). Этот завод предоставляет разработку профилей по специальным чертежам заказчика, подбор и разработку стали по требованиям заказчика и т.д.

Бервел – новый завод, открытый в 2015 году в Рязанской области, ориентированный на производство калиброванного проката (80 000 тонн в год) и высокопрочного крепежа (27 000 тонн в год), является одним из поставщиков продукции для строительства крымского моста.

При этом существуют предприятия, которые имеют в своём составе несколько мини-заводов различного характера и различных объемов. К таким предприятиям относится НМЛК-Урал, завод в Нижних Сергах, производство которых специализируется на традиционной для мини-заводов арматурной стали. Так же в состав предприятия НМЛК-Урал входят заводы, расположенные в городах Ревда (сталеплавильное производство) и Берёзовский (производство катанки).

Если говорить о Европе, то можно посмотреть на немецкий мини-завод Lech-Stahlwerke (Meitingen, Германия), примерно половину продукции которого составляет арматурная сталь, а половину – точный сортовой прокат для автомобилей немецких марок таких как «Мерседес» и «БМВ».

Каждый из представленных мини-заводов обладает различной производительностью, начиная от 100 тыс. тонн (Бервел) до 2 млн. тонн в год (завод по производству непрерывнолитой заготовки группы НМЛК-Урал в городе Ревда). Разница объемов составляет 20 раз. А самые мелкие из существующих мини-заводов имеют производительность, начинающуюся от 45 тыс. тонн в год. Поэтому для удобства мини-заводы начали классифицировать по объему выпускаемой продукции как мини- микро- и нано.

Например, в книге «Металлургические мини-заводы» [5] предложена классификация мини-заводов по объёму производства (табл. 1). При этом наименования групп заводов изменены на принятые на западе. Так же для каждой группы приведены стратегии развития производства и поведения на рынке, что указывает на необходимость подразделения мини-заводов по объёму их производства.

Второй основной классификацией, которую стоит упомянуть при разговоре о мини-заводах, является классификация по составу оборудования. Так по составу оборудования мини-заводы можно условно разделить на три группы.

1. Усечённые заводы, изготавливающие полупродукт в виде литых заготовок.
2. Передельные заводы, имеющие в своём составе только прокатные станы или иное оборудование для доведения полуфабрикатов металлургической продукции до ко-

нечного вида. Такие заводы не предполагают возможность собственной выплавки стали, а рассчитаны на использование сторонних материалов.

3. Заводы полного цикла, имеющие собственные печи для выплавки стали, агрегаты непрерывной разливки, прокатное оборудование и, возможно, иное оборудование, как заводы второй группы.

Таблица 1

Классификация мини-заводов по объёму производства

Производительность, тыс. тонн/год	Наименование группы	Стратегии развития заводов данной группы
40-230	Нано-завод	– специализация в производстве продукции – фиксация определённого сегмента рынка
230-600	Микро-завод	– фиксация определённого сегмента рынка – специализация в производстве продукции – минимизация издержек производства и реализации продукции
600-2000	Мини-завод	– минимизация издержек производства и реализации продукции – комбинирование разных стратегий

Чтобы однозначно охарактеризовать мини-завод, необходимо определить к какой из групп классификации он относится. Чёткой зависимости между классификациями по оборудованию и объёму производства не наблюдается. В мире имеются заводы всех комбинаций групп представленных классификаций. Усечённые заводы, производящие заготовку, как правило, имеют большие объёмы годового производства и относятся по этому признаку к мини-заводам.

При рассмотрении дальнейших направлений развития концепции мини-заводов необходимо принимать во внимание, что переизбыток производственных мощностей металлургической промышленности, ставший нормой последних десятилетий, не остановил плавный рост производственных мощностей. Причин такого поведения рынка несколько. Одной из них является желание региональных участников рынка самостоятельно обеспечить свой регион продукцией. Примером подобных желаний могут выступать относительно недавно установленные США пошлины на импорт стали. Эти пошлины были призваны стабилизировать внутренние цены и объёмы производства. Некоторые эксперты считают, что примеру США могут последовать и европейские страны, стремящиеся защитить своего производителя от дешёвой китайской стали. Возможно, такое поведение является ответом на опасность попасть под экономическое влияние Китая [3].

В сложившихся экономических условиях, преимущество имеет тот поставщик, который может обеспечивать не только самую низкую цену на продукт, но и минимальные логистические издержки с рациональными сроками поставки. В этом аспекте мини-заводам нет равных. Максимально близкое расположение завода к потребителю, является одним из основных условий в концепции мини-заводов. Что касается минимальных сроков поставки, так, например, у микро-заводов концепции Danieli MI.DA полный цикл производства продукции, начиная от скрапа и заканчивая прокаткой, занимает всего два часа. Один из таких заводов успешно эксплуатируется компанией CMC STEEL в Аризоне, США с 2008 года [6].

Нельзя не отметить, что с ростом количества мини-заводов растёт и потребность в ломе. Несмотря на естественное желание производителей использовать лом высокой чистоты, спросом пользуется вторичное сырьё любого качества. Это создаёт естественные проблемы и является источниками известных стереотипов. Самым распространённым является утверждение, что из лома ничего «путного» произвести невозможно, а значит и сами мини-заводы качественную продукцию выпускать не могут. Опровержением этих слов служит список за-

водов и их сортамента, приведенный выше. Тем более, что сырьём для печной плавки может является не только лом, но и передельный чугун (существуют мини заводы с небольшими доменными печами) и перспективное, железо прямого восстановления.

О железе прямого восстановления (ЖПВ) стоит сказать отдельно. Именно с использованием ЖПВ современная металлургия связывает надежды на создание более экологически чистой альтернативы доменному переделу. Проблема загрязнения окружающей среды металлургическими предприятиями существует по всему миру, но как в Европе, так и в США не существует мини-завода интегрированного с производством железа прямого восстановления. При этом в России существует Оскольский ЭМК, для которого окатыши являются основным железосодержащим сырьём, получаемым из руды курской магнитной аномалии [7].

Основной причиной упомянутой выше ситуации является удорожание производства при использовании окатышей или брикетов прямого восстановления. В среднем производитель, использующий ЖПВ, теряет 40-50 долларов на тонну [3]. В данном вопросе Россия, являющаяся обладательницей как железной руды, так и природного газа, необходимых для производства железа прямого восстановления, может стать одним из ключевых игроков в производстве брикетов ЖПВ. Транспортировка более дешёвых окатышей по морю очень опасна. Имеются упоминания о пожарах, случившихся при транспортировке окатышей ЖПВ [7]. Вследствие этого окатыши более удобны для обращения на внутреннем рынке.

Перспективной смотрится идея совмещения установок ЖПВ и мини-заводов. Возможность загрузки в печь горячих окатышей позволяет сократить затраты энергии на этапе литейного передела [8]. Более того, применение ЖПВ позволяет использовать не только дуговые печи, но и индукционные. Это становится возможным благодаря значительно более плотной укладке шихты, состоящей из окатышей и брикетов, в рабочем пространстве печи, чем при использовании лома [9].

Для производителей современного металлургического оборудования мини-заводы являются одним из основных направлений развития. Целевой аудиторией в данном случае являются региональные компании, для которых мини-заводы являются хорошей возможностью удовлетворить местный спрос на сталь, сочетая это с рациональными капитальными и операционными затратами.

Существование мини-завода обеспечивается грамотным управлением: сортаментным позиционированием на рынке, отношением к клиентам и т.д. При этом конкуренция между мини-заводами поддерживается в силу постоянного сокращения издержек за счёт совершенствования технологий.

На данный момент перед участниками мирового металлургического рынка не стоит вопрос: «Строить мини-завод или нет?». Вопрос звучит следующим образом: «Где и каких размеров строить мини-завод?».

Библиографический список

1. Рожков Г.К., Левандовский С.А. Особенности нагрева старогодных рельсов для производства сортового проката // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т.1. С. 93-96.
2. Кинзин Д.И., Левандовский С.А., Рожков Г.К., Саранча С.Ю. База данных технологических параметров как основа управления сортопрокатным производством // Калибровочное бюро. 2017. №9. С. 8-11.
3. Корпорация Danieli. Идеи для «нового нормального» потребления металлов // DaNews. Январь 2018. №177. С. 9-13.
4. Материалы конференции «Мини-миллы: преимущества и недостатки» [Электронный ресурс] // Журнал металлообработки и сбыт: [сайт]. [2013]. URL: <http://metalinfo.ru/ru/magazine/livestreams/23> (дата обращения: 10.05.2018).
5. Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цуприн А.Ю. Металлургические мини-заводы. Т.1. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 469 с.

6. MI.DA. ESC-Energy Saving Compact plants [Электронный ресурс] // Danieli: [сайт]. URL: https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/mi-da-esc-energy-saving-compact-plants_26_188.htm (дата обращения: 03.05.2018).
7. Кириченко И.С., Алексахин А.В. Развитие мирового и отечественного производства железа прямого восстановления // Молодой учёный. 2016. №2. С. 85-90.
8. Апфель Й., Хайн М., Хубер Х.Й., Чатан Д. 20 лет опыта с технологией подогрева лома // Литье и металлургия. 2015. №4. С. 86-92.
9. Сойфер В.М. Использование продуктов прямого восстановления железа в электросталеплавильных печах // Вестник харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. №33. С. 32-34.

• INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH •

G.K.Rozhkov, S.A.Levandovsky

**DEVELOPMENT OF THE CONCEPTION OF MINI-MILLS AND MINI-PLANTS
FACTORS FOR STEEL ROLLING PRODUCTION**

Abstract. The article presents actual information of the condition of the world steel market and shows the reasons for the interest of manufacturers of metallurgical equipment and investors in the development of the conception of mini-mills (and mini-plants). The article also provides the necessary information for understanding the conception of mini-mills (and mini-plants) and presents the types of their classification. The article shows the advantages and disadvantages of mini-, micro- and nano-plants. The possibilities of further development of mini-plants in Russia and in the world are considered. Examples of already commissioned objects are given.

Keywords: mini plant, micro plant, nano-plant, world steel market, new standard, casting rolling unit (CRU), mini-mill, direct reduction iron (DRI).

В.Ю.Рубцов, Д.В.Гаев, С.В.Борисов

АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат»

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОРИДОРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА РЕЛЬСОВ ПОД ЗАКАЛКУ

Аннотация. Рассмотрен режим нагрева рельсов РП65 под закалку в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-НТМК». Произведено два опытных изменения режима нагрева заготовки. Выявлен недостаток неравномерности температуры рельсов при увеличении интенсивности нагрева. Предложено конструктивное решение, в виде установки частотных преобразователей на каждую зону печи и обеспечения разных скоростных режимов нагрева для пакетов с рельсами, при увеличении интенсивности нагрева и обеспечении равномерности получаемых температур в разных точках, тем самым увеличивая производительности печи.

Ключевые слова: коридорная печь, режим нагрева, рельс, ролики, зона нагрева, частотный преобразователь, термонара, скоростной режим.

Введение

Проходная печь – промышленная печь непрерывного действия для нагрева штучных изделий с механизированным транспортированием их через рабочее пространство. Такие печи применяют для нагрева металлических заготовок перед горячей обработкой давлением и при термообработке изделий и деталей, а также для обжига керамических и эмалированных металлических изделий и т.д.

В печах такого типа происходит перекрестное движение нагреваемого материала и нагревающих его газов. Эта схема реализуется при выполнении нескольких условий – размещении топливосжигающих устройств и каналов для удаления отходящих газов на продольных стенках печного канала и при транспортировании обрабатываемой продукции в осевом направлении. Проходные печи пригодны для реализации, как для высокотемпературных, так и низкотемпературных режимов тепловой обработки технологических материалов.

Тепловой режим проходных печей является постоянным по времени и переменным по длине печи. Температурный режим – одинаковая температура в каждом поперечном сечении, а по длине печи – либо одинаковая, либо переменная.

К проходным печам относятся:

- секционные печи скоростного нагрева, применяемые преимущественно для нагрева трубных и листовых заготовок перед прокаткой или для термической обработки труб, а также для нагрева круглых заготовок при прокатке стальных шаров;
- печи с кольцевым подом, используемые на трубо- и колесопрокатных цехах;
- коридорные печи с роликовым подом для термической обработки листов, прутков, рельсов, труб и других изделий, пригодных для перемещения вдоль печи вращающимися роликами.

Поступление изделий горячими, сразу после прокатки, в коридорную печь способствует повышению производительности печи и снижению расхода топлива. Отопление рабочего пространства производится горелками, установленными над и под роликами. Сверху иногда размещают сводовые горелки. Для боковой установки используются инжекционные горелки, подсасывающие воздух для горения из атмосферы, что позволяет избежать установки устройства разветвленной системы воздухопроводов, или двухпроводные горелки.

Боковые стены выполняют плоскими, в случае низкотемпературных печей – однослойными из малотеплопроводных материалов. Свод делают арочным или (при большой ширине печей) подвесным. В случае установки двухпроводных горелок воздух для горения подогревается в трубчатых рекуператорах до 300-350 °С, а топливо не подогревается. При использовании инжекционных горелок ни топливо, ни воздух (из атмосферы) не подогревают.

Приводные вращающиеся ролики в зависимости от рабочей температуры имеют водяное охлаждение: при температурах до 950 °С – только цапф, при 1000-1150 °С – всей оси. Количество этих роликов при данной длине печи определяется видом обрабатываемой продукции и возможностью ее деформации при нагреве. Шаг роликов с учетом возможности деформации изделий колеблется в пределах $sr' = 300 + 800$ мм. Минимальный межосевой промежуток относится к листу толщиной 0,5-1 мм при температуре его нагрева 1000-1150 °С, максимальный – к рельсу при операции отпуска (450-480 °С).

Печи с роликовым подом весьма перспективны, так как имеют наиболее совершенную систему транспортирования металла через печь, но недостатком таких печей является большие потери тепла с охлаждающей водой. Основным показателем работы печи является производительность, при этом зачастую режимы нагрева заготовки ограничены конструктивной возможностью печи.

Рассмотрим режимы нагрева на примере печи термического отделения рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат».

Характеристика печи

Закалочная печь предназначена для нагрева рельсов до температуры 820-850 °С перед объемной закалкой в масле. Общая длина 186,6 м и ширина 3,94 м по кладке. По длине печь разделена на семь зон. В первых пяти зонах происходит нагрев рельсов до заданной температуры, шестая – зона выравнивания, седьмая – камера боковой выдачи.

Рельсы транспортируются с помощью роликового пода, ролики установлены с шагом 1160 мм, диаметр ролика – 500 мм. Цапфы роликов водоохлаждаемые. Каждый ролик имеет индивидуальный привод.

Рабочее пространство печи представляет собой тоннель шириной 3016 мм и высотой от уровня пода до пучка свода печи 2683 мм. По ширине печи укладывается в одном пакете 11 рельсов типа Р-65. Каждая зона печи выше оси роликов, за исключением седьмой, поделена на съемные секции. Секция имеет стальной кожух, футерованный изнутри шамотным легковесным кирпичом. Толщина футеровки боковых стен – 464 мм, свод футерован шамотом класса Б (300 мм) и изолирован диатомовым кирпичом (116 мм).

Газ (коксодоменная смесь $Q_{нр} = 1500$ ккал/м³) сжигается с помощью инжекционных горелок типа Н48/17,5. Всего в печи установлено 520 горелок. Продукты горения через отверстия 694x465 мм, расположенные в поде печи, удаляются в сборный боров сечением 3016x2310 мм, который между 5 и 6-ой зонами разделен перегородкой. Дымовые газы от зон 1-5 удаляются через котел-утилизатор «КУ-125» и дымовую трубу высотой 70 м. Дымовые газы от зон 6-7 удаляются дымовой трубой высотой 35 м.

Печь оснащена контрольно-измерительными приборами и системами автоматического регулирования температуры в каждой зоне.

Оценки степени прогрева рельсов

Был проведен тестовый нагрев двух опытных сверленных рельсов в закалочной печи термического отделения РБЦ с использованием накопителя измеряемых величин «черного ящика». Первый опытный рельс был установлен в четвертой позиции, а второй в последней по ширине пакета. В подготовленные отверстия опытных рельсов были установлены ХА-термопары: на глубину 40 мм и 1500 мм от переднего конца, и еще одна термопара для контроля температуры атмосферы печи на высоте около 30 мм от головки первого рельса (на расстоянии около 1500 мм от переднего конца).

Эскиз сверленного рельса и схема установки термопар и подставки для контейнера представлены на рис. 1 и 2.

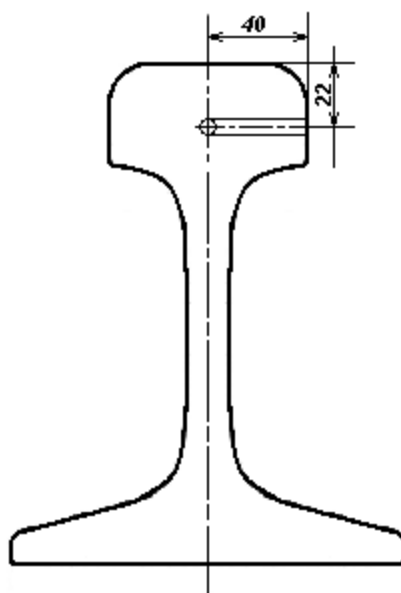


Рис. 1. Схема расположения отверстий в опытном рельсе

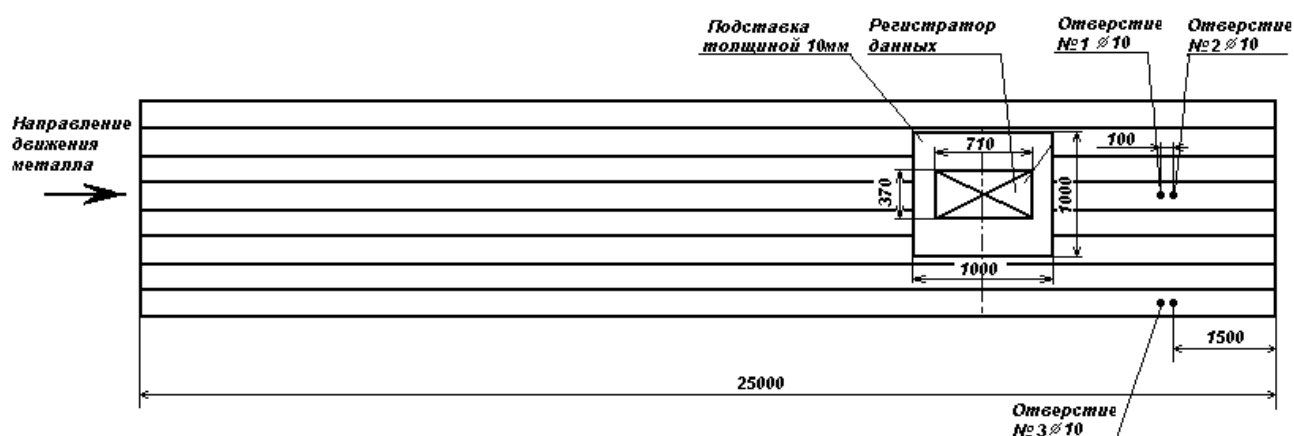


Рис. 2. Схема установки регистратора данных на пакет с рельсами

В печь были посажены два пакета рельсов РП65 перед пакетом с опытными рельсами, и один пакет после опытного. Опытный пакет был посажен в закалочную печь в 14 часов 30 минут и нагревался в печи полный цикл в соответствии с ТИ 102-П.С-9-2010. Из опытного пакета был выдан один рельс на рольганг для закалки, температура которого на выдаче из печи составила 826 °С (по штатному прибору). Остальные рельсы пакета находились в 7-ой зоне в течение 27 мин, затем пакет начали передвигать по печи в сторону окна посадки, и он был выдан в поперечный пролет в 16 часов 24 минуты. Длительность нагрева пакета с опытными рельсами в закалочной печи составила 59 мин, в 7-ой зоне пакет находился 27 мин.

Заданный и фактический температурные режимы в зонах печи представлены в табл. 1.

Таблица 1

Температурный режим по зонам закалочной печи

Режим	Температура по зонам, °С						
	1	2	3	4	5	6	7
Заданный	740	760	830	840	845	830	830
Фактический (по термопарам)	708-755	743-766	818-845	833-848	839-853	828-832	820-840

Динамика нагрева опытных рельсов представлена на рис. 3.

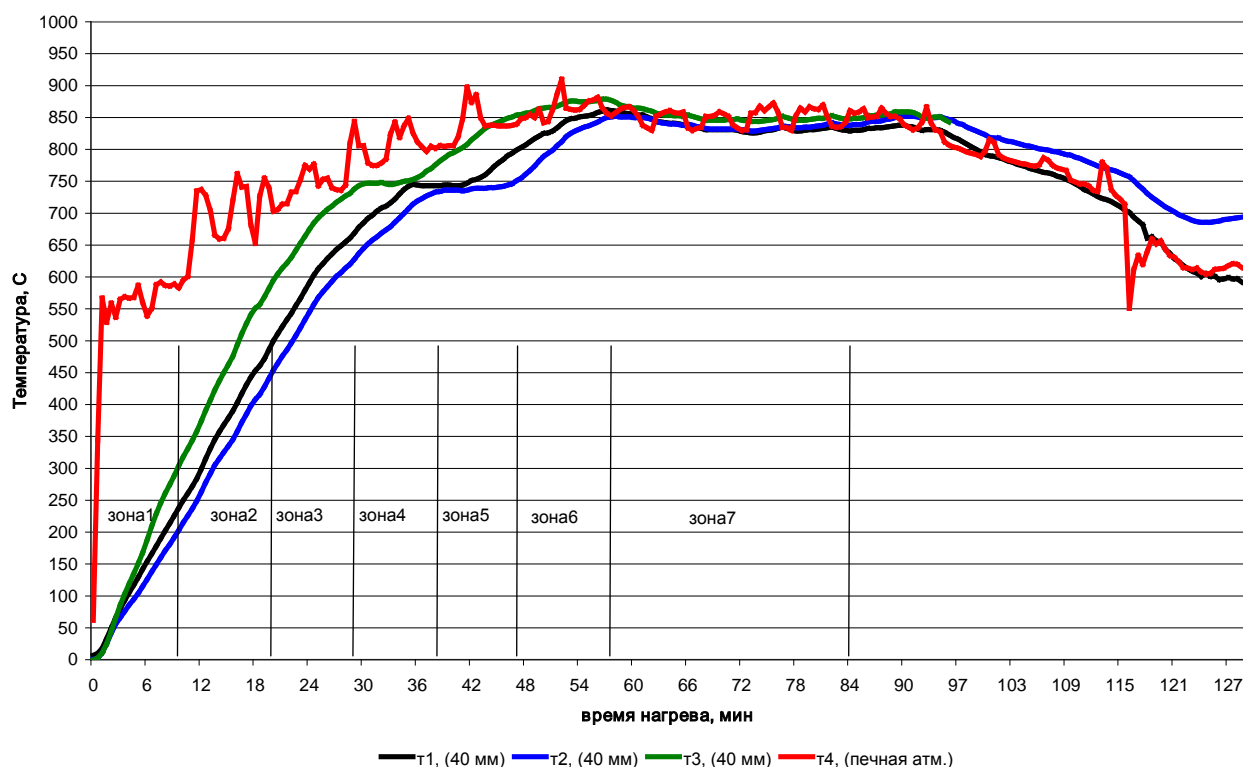


Рис. 3. Нагрев опытных рельсов в закаточной печи (опыт №1)

Температура по сечению рельсов на момент предполагаемой выдачи: t_1 – 857 °С, t_2 – 851 °С, t_3 – 868 °С (см. табл. 2).

Таблица 2

Температура рельсов по сечению

Время замера	Температура по точкам, °С			Максимальный перепад температуры, °С
	1	2	3	
На момент начала выдачи	857	851	868	17
Через 8 мин (конец выдачи)	835	836	850	15

Перепад температуры в одном рельсе (между t_1 и t_2) составил 6 °С. Максимальный перепад температуры между средним и последним в пакете рельсом (t_2 и t_3) составил 17 °С.

Также был проведен второй опыт. По сравнению с предыдущим опытом был скорректирован температурный режим. Во второй зоне температура увеличена с 760 до 780 °С, в третьей зоне с 830 до 840 °С, в четвертой с 840 до 850 °С. Корректировка сделана с целью увеличения скорости нагрева в первых зонах и дальнейшего выравнивания температуры в пятой и шестой зонах.

Пакет был набран из девяти рельсов: два рельса текущего производства (плавка №112072), пять рельсов для промышленности РП65 и два – опытных (с отверстиями для термопар). Рельсы текущего производства были установлены первыми в пакете, опытные рельсы – четвертым и девятым.

В подготовленные отверстия были зачеканены ХА-термопары. Термопары были установлены в следующем порядке: №1 – в четвертый рельс на расстоянии 1,5 м от переднего конца, №2 – в девятый рельс на расстоянии 1,5 м от переднего конца, №3 – в четвертый рельс на расстоянии 12,5 м от переднего конца, №4 – для контроля температуры атмосферы печи на высоте около 30 мм от головки четвертого рельса на расстоянии 1,5 м от переднего конца. Регистратор данных («черный ящик») был установлен на специальную подставку, расположенную на пакете.

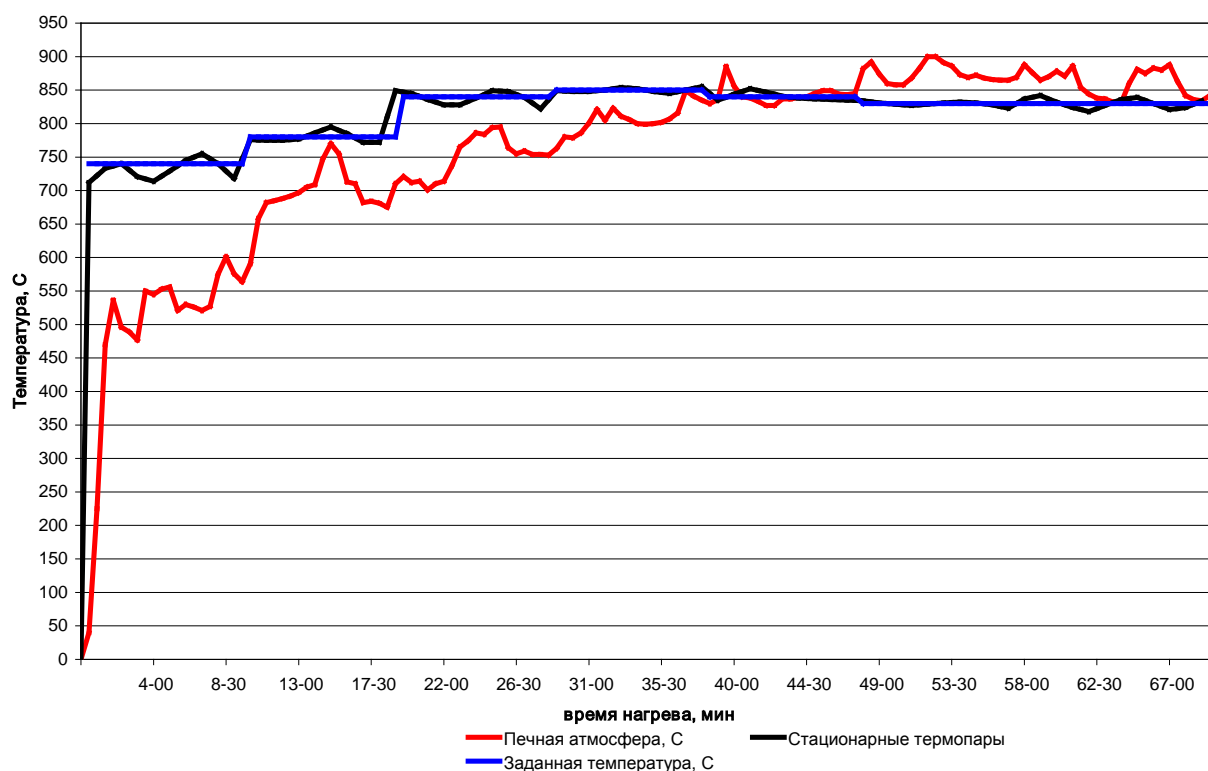


Рис. 5. Температурный режим печи

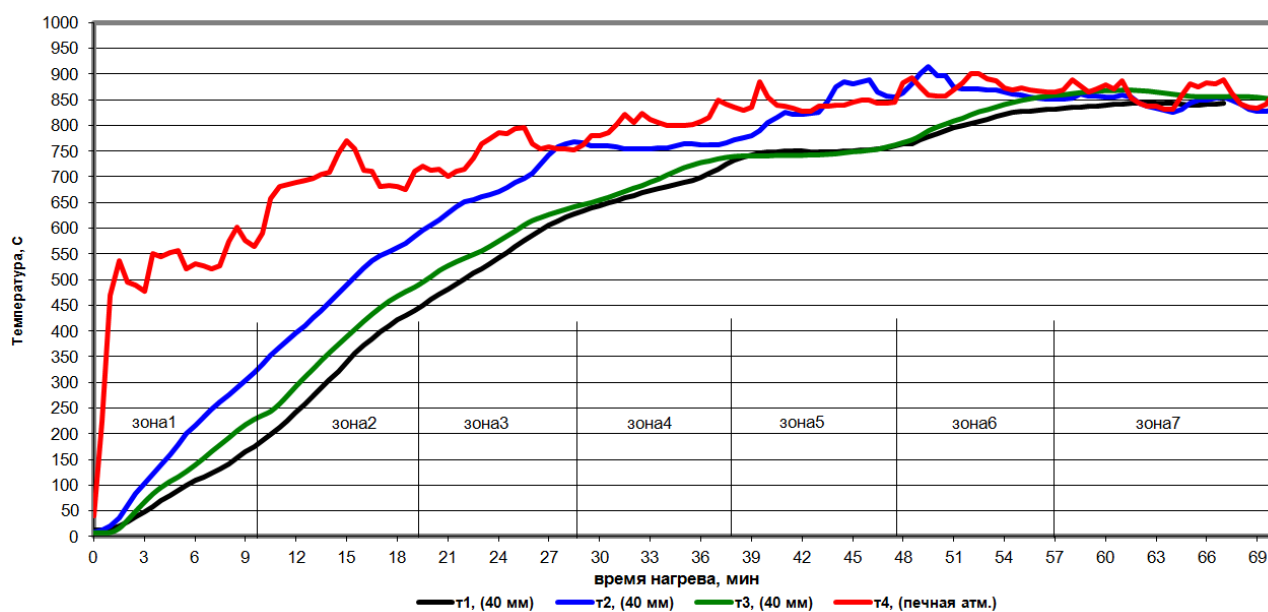


Рис. 6. Нагрев опытных рельсов в закалочной печи (опыт №2)

Таблица 4

Температура рельсов по сечению

Время замера	Температура по точкам, °С			Максимальный перепад температуры, °С
	1	2	3	
На момент начала выдачи	832	852	859	27
Через 8 мин (конец выдачи)	840	843	857	17

При анализе результатов тестового нагрева установлено, что температурный режим по показаниям регулирующих термопар в зонах соответствовал заданным. Скорость нагрева

рельсов во втором опыте по показаниям опытных термопар несколько ниже, чем в первом опыте, что связано с инерционностью печи. Максимальный перепад температуры по длине рельса (между t_1 и t_3) составил $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на момент начала выдачи), в отличие от первого опыта, где перепад был не более $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнивая результаты графиков нагрева опытных рельсов (рис. 3 и 6), видим, что нагрев осуществляется неравномерно, выравнивание температур происходит только в седьмой зоне. Изменения температурного режима недостаточно для увеличения производительности печи. В качестве прогрессивной технологии предлагается, при увеличении температуры в зонах 4 и 5, уменьшить время нахождения в них для более быстрого прохождения рельсов через зоны горения, тем самым сглаживая пульсации и повышая интенсивность нагрева, и увеличить время нахождения рельсов в зоне 7, но при этом производить ускоренный режим покачивания, что конструктивно допустимо. В целом, оперируя скоростными режимами нагрева, можно обеспечить равномерный нагрев заготовки. Для выполнения данных условий ролики каждой зоны печи необходимо оборудовать частотными преобразователями, тогда, начиная с четвертой зоны, где начинается уменьшение интенсивности нагрева, появится возможность производить ускорение пакета рельсов и увеличить частоту покачивания, что при достаточном отставании не будет мешать последующему пакету с рельсами. При появлении разрывов между пакетами в зонах 4-7, лимитирующим параметром для производительности печи останется нахождение заготовок в зонах 1-3. Особенно важно применение раздельного времени нахождения по зонам печи при нагреве профиля меньшего сечения, например Р-50, что также приемлемо для практики закалки рельсов.

Выводы

1. Произведено два опыта по нагреву рельсов в закалочной печи термического отделения РБЦ АО «ЕВРАЗ-НТМК». Результаты опытов показали, что в текущем состоянии, при изменении температурных режимов печи не является возможным повышение производительности печи в силу инерционности нагрева.
2. Нахождение заготовки в каждой зоне печи одинаково в силу конструктивной особенности печи и равномерного скоростного режима, что не позволяет производить ускоренный нагрев и сглаживать пульсации от пламени горения.
3. Предлагается модернизация печи с установкой позонных частотных преобразователей, для обеспечения изменения времени нахождения в последующих зонах печи, создание зоны отставания и увеличение частоты покачивания роликов для обеспечения более равномерного нагрева.

Библиографический список

1. Теория и практика теплогенерации / С.Н.Гущин, М.Д.Казяев, Ю.В.Крюченков и др. Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2005. 379 с.
2. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А.С.Телегина. М.: Металлургия, 1982. 368 с.
3. Теплотехника металлургического производства. Том II. Конструкция и работа печей: учебное пособие для вузов / В.А.Кривандин, В.В.Белоусов, Г.С.Сборщиков и др. М.: МИСИС, 2001. 736 с.
4. Б.С.Мастрюков. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1986. 375 с.
5. Дипломное и курсовое проектирование теплотехнических агрегатов: методические указания к оформлению дипломных и курсовых работ / Н.Б.Лошкарёв, А.Н.Лошкарёв, Л.А.Зайнуллин, Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 50 с.
6. Справочник конструктора печей прокатного производства / Под редакцией В.М.Тымчака. М.: Металлургия, 1970. 576 с.

7. Методические указания по составлению раздела «Инженерная экология в выпускных работах студентов специальности 150103 – Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей / М.Д.Казяев, Ю.Н.Овчинников, В.Л.Советкин, Ю.Г.Ярошенко. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.
8. ГОСТ 22667-82 Газы горючие природные.
9. ТИ 102-П.С-9-2012 Производство термоупрочненных рельсов.

●————— INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH —————●

V.Y.Rubtsov, D.V.Gaev, S.V.Borisov
EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant

**MODERNIZATION OF THROUGH FURNACE
FOR HEATING RAILS FOR TEMPERING**

Abstract. Mode of heating of rails the RP65 for tempering in the rail-shop department of JSC «EVRAZ-NTMK» is considered. Two experiments were performed with a change of heating mode of billet. Temperature was uneven on rails, because speed of heating was increasing. A constructive solution is proposed. Frequency converters installing for each zone of the furnace, will provide different heating rates in the packages with rails, with an increase in the intensity of heating and ensuring the uniformity of the temperatures obtained at different points, thereby increasing productivity of the furnace.

Keywords: through furnace, mode of heating, rail, rollers, zone of heating, frequency converter, thermocouple, mode of speeds.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРОЩЕНИЯ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛКОВ И ПРОФИЛЯ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КЛЕТИ КВАРТО

Аннотация. В статье сформулирована и поставлена задача упрощения расчета деформации валков и профиля полосы при прокатке в клети кварто.

Ключевые слова: деформация валков, профиль полосы, поперечная разнотолщинность, модуль жесткости, усилие прокатки, клеть кварто.

Введение

Задача расчета деформации валков в самой общей постановке требует совместного описания напряженно-деформированного состояния (НДС) валковой системы и прокатываемой полосы с помощью трехмерной теории упругости и пластичности. Существуют различные методики расчета деформации валков [1-5]. Но расчеты по простым методикам [1-2] дают заметную погрешность, а расчеты по более точным методикам [3-5], как правило, трудоемкие. В 1970-2009 годах на кафедре ОМД МГТУ им. Г.И.Носова Салгаником В.М., Мельцером В.В., Полецковым П.П. и Омельченко Б.Я. была создана и развивалась модель деформации валкового узла кварто при симметричном нагружении [6-10 и др.]. С ее применением были получены хорошие результаты при решении ряда задач [11-15]. Поэтому для дальнейшей работы выбираем именно данную модель.

Особенности модели деформации валкового узла

Поперечная разнотолщинность (профиль) полосы на выходе из валков:

$$\delta h = \frac{K_c - K_{\varepsilon}}{K_c} (w_{p1} + w_{p2} - z_{p1} - z_{p2}) + \frac{K_{\varepsilon}}{K_c} \delta H, \quad (1)$$

где w_{p1} и w_{p2} – прогибы осей верхнего и нижнего рабочих валков;
 z_{p1} и z_{p2} – текущие профили верхнего и нижнего рабочих валков;
 δH – поперечная разнотолщинность полосы на входе в валки;
 K_c – коэффициент упругой податливости рабочих валков:

$$K_c = \frac{\pi}{2 \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \ln \frac{3,04 D_p E_p}{P_{1b} (1 - \nu_p^2)}}, \quad (2)$$

ν_p и E_p – коэффициент Пуассона и модуль Юнга на сжатие материала рабочего валка (например, для стального кованого валка $\nu_p = 0,3$ и $E_p = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм². Для легированного чугунного валка двухслойной заливки $E_p = 1,5 \cdot 10^4$ кг/мм² и $\nu_p = 0,27$);

D_p – диаметр бочки рабочего валка;

$P_{1b} = P / b$ – усилие прокатки P , отнесенное к ширине полосы b ;

K_{ε} – эффективный коэффициент:

$$K_{\varepsilon} = \frac{K_{\Delta h} K_c}{K_{\Delta h} + K_c}, \quad (3)$$

$K_{\Delta h} = P / \Delta h$ – коэффициент податливости полосы.

Профили рабочих z_{p1} и z_{p2} , а также необходимые для других расчетов профили опорных валков (z_{o1} и z_{o2}) являются исходными данными. Прогибы рабочих валков w_{p1} и w_{p2} определяются с учетом прогибов опорных валков (w_{o1} и w_{o2}) и проседания рабочих валков как балок на упругом основании. При этом отображается нагружение валкового узла не только усилием прокатки P , но и регулирующим усилием противоизгиба ($+Q$) или дополнительного изгиба ($-Q$) рабочих валков. В целом модель включает 11 уравнений и реализуется с применением матричного метода, который требует применения специальной компьютерной программы.

Возможный подход к упрощению расчета деформации валков и профиля полосы

С целью упрощения расчета поперечной разнотолщинности полосы может быть применен метод аппроксимации зависимости прогиба валка от особенностей размеров валкового узла и условий нагружения. При таком подходе множественным регрессионным анализом получают уравнение, которое при актуальных характеристиках валкового узла, ширине полосы, значениях усилий P и Q позволит определить величину δh простым расчетом по формуле. Такой подход использован, например, в работе [2] для расчетов деформации валкового узла кварто стана 1700 холодной прокатки.

В более общем виде указанный упрощающий подход может быть применен, если построить зависимость для расчета модуля поперечной жесткости валковой системы. Поперечная разнотолщинность полосы выражается через модули поперечной жесткости валковой системы от усилия прокатки (M_B^P) и регулирующего усилия (M_B^Q) следующим образом [3, 16-18]:

$$\delta h = \frac{P}{M_B^P} - \frac{Q}{M_B^Q}. \quad (4)$$

Модули жесткости численно равны обратной величине изменения поперечной разнотолщинности полосы от единичного приращения усилия прокатки (δh_P) и регулирующей силы (δh_Q) по следующим формулам:

$$M_B^P = 1 / \delta h_P = \frac{P' - P''}{\delta h(P') - \delta h(P'')}; \quad (5)$$

$$M_B^Q = 1 / \delta h_Q = \frac{Q' - Q''}{\delta h(Q') - \delta h(Q'')}, \quad (6)$$

где $\delta h(P')$, $\delta h(P'')$ и $\delta h(Q')$, $\delta h(Q'')$ – значения поперечной разнотолщинности полосы при разных значениях усилия прокатки ($P' > P''$) и регулирующей силы ($Q' > Q''$) соответственно и при прочих равных условиях.

Таким образом, для упрощения расчета деформации валкового узла и профиля полосы при прокатке в клети кварто необходимо найти зависимость модуля поперечной жесткости валковой системы от влияющих факторов $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$:

$$M_B = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (7)$$

С учетом известных закономерностей деформации валковых узлов кварто [16-17] искомая зависимость должна быть нелинейной. На основании формул (1-3) влияющими факто-

рами следует принять: 1) ширину прокатываемой полосы b ; 2) длину межвалкового контакта l_{op} ; 3) коэффициент податливости полосы $K_{\Delta h}$; 4) диаметр рабочего вала D_p .

Заключение

Задача расчета упругой деформации валков листопркатного стана имеет важное значение не только для оценки жесткости рабочей клетки, но и для расчета поперечного профиля полосы. Решение указанной задачи с применением простых методик дают заметную погрешность, а расчеты по более точным методикам трудоемкие. С целью упрощения расчета поперечной разнотолщинности полосы может быть применен метод аппроксимации результатов расчета деформаций валков по точным методикам в широком диапазоне варьирования особенностей валкового узла и условий нагружения. При этом откликом (аппроксимируемой величиной) целесообразно принять модули поперечной жесткости валкового узла от усилия прокатки и регулирующей силы, а собственно аппроксимация должна быть нелинейной.

Библиографический список

1. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчет и исследование прокатных валков. М.: Металлургия, 1976. 256 с.
2. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А., Кузнецов Л.А., Журавский А.Г. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
3. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. М.: Металлургия, 1972. 512 с.
4. Профилирование валков листовых станов. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др. К.: Техника, 1986. 190 с.
5. Болобанова Н.Л. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов с целью совершенствования технологии прокатки широких полос: диссертация. Череповец: ФГБОУ ВПО «ЧГУ», 2015. 123 с.
6. Мельцер В.В., Салганик В.М. Матричный метод расчета деформации и профилировки валков листопркатной клетки кварто: учеб. пособие. Магнитогорск: МГМИ, 1970. 50 с.
7. Салганик В.М., Мельцер В.В., Омельченко Б.Я. Расчет профилировки валков листопркатных станов / МГТУ им. Г.И.Носова. Свердловск, 1977. 57 с.
8. Салганик В.М., Мельцер В.В. Исследование на ЭВМ деформаций и нагрузок валковой системы кварто: учеб. пособие. Свердловск: изд. УПИ, 1987. 78 с.
9. Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill // Metal Forming. The University of Birmingham. UK September 9-11. 2002.
10. Салганик В.М., Полецков П.П. Моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто и повышение качества листового проката по профилю: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 133 с.
11. Исследование и разработка эффективной профилировки рабочих валков клеток стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» для условий производства широких полос / П.П.Полецков, О.В.Синицкий, А.Г.Соловьев, Ю.Б.Литяйкина // Материалы 62-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательской работы за 2002-2003 гг.: сб. докл. Т1. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С 52-55.
12. Улучшение плоскостности широких полос на стане 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» / В.Л.Носов, В.М.Салганик, П.П.Полецков, В.В.Галкин // Материалы межзаводской школы по обмену производственным опытом. Выпуск №6, май-июнь 2004 г.
13. Повышение плоскостности широких полос на стане 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» в условиях преимущественного производства узких полос / В.М.Салганик, П.П.Полецков, О.В.Синицкий, А.Г.Соловьев, Ю.Б.Литяйкина // Труды V

- конгресса прокатчиков. Череповец, 21-24 ноября, 2003 г. М.: Черметинформация, 2004. С 48-51.
14. Улучшение поперечного профиля полос, получаемых на широкополосном стане горячей прокатки, в условиях большого сортамента по ширине / В.М.Салганик, П.П.Полецков, О.В.Синицкий, Ю.Б.Литяйкина // Моделирование и развитие технологических процессов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С 10-18.
 15. Омельченко Б.Я., Румянцев М.И., Федоров Д.С. Модель формирования профиля полос в чистовой группе широкополосного стана горячей прокатки // Материалы 64-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2004-2005 г. Сб. докладов. Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2006. С 48-51.
 16. Баркая В.Ф., Рокотян С.Е., Рузанов Ф.И. Формоизменение листового металла. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
 17. Рокотян С.Е. Теория прокатки и качество металла. М.: Металлургия, 1991. 223 с.
 18. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке / С.М.Бельский, И.П.Мазур, С.Н.Лежнев, Е.А.Панин. Темиртау: КГИУ, 2016. 161 с.

● INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH ●

M.I.Rumyantsev, A.N.Kolybanov
Nosov Magnitogorsk State Technical University

**STATEMENT OF THE PROBLEM TO SIMPLIFICATION OF CALCULATION
THE ROLL DEFORMATION AND STRIP PROFILE IN A FOUR-HIGH STRIP MILL**

Abstract. The article formulated and posed the problem to simplification of calculation the roll deformation and strip profile in a four-high strip mill.

Keywords: deformation of rolls, strip profile, transverse thickness, modulus of rigidity, rolling force, four-high strip mill.

А.Н.Колыбанов
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И.Носова»

УПРОЩЕНИЕ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИИ ВАЛКОВ И ПРОФИЛЯ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КЛЕТИ КВАРТО С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА¹

Аннотация. В статье описаны план и результаты компьютерного эксперимента на основании которых получены нелинейные аппроксимации для упрощенного расчета модулей поперечной жесткости валкового узла чистовой клетки кварты ШСГП 2500.

Ключевые слова: деформация валков, профиль полосы, модуль жесткости, планирование эксперимента.

Введение

Ранее была сформулирована и поставлена задача упрощения расчета деформации валков клетки кварты и профиля полосы путем отыскания модулей жесткости от усилия прокатки и регулирующей силы в виде полиномиальной зависимости для конкретного стана. Наиболее эффективным методом решения указанной задачи является методика планирования эксперимента.

Плана эксперимента

Эксперимент будет осуществляться с помощью компьютерной программы с использованием математической модели [1-5]. Предметом исследования выбрана чистовая клетка ШСГП 2500 ПАО «ММК». Целью эксперимента является замена вышеупомянутой модели зависимостью в виде полинома.

В качестве влияющих факторов на модули жесткости валковой системы были выбраны: 1) ширина прокатываемой полосы b ; 2) длина межвалкового контакта l_{op} ; 3) коэффициент податливости полосы $K_{\Delta h}$; 4) диаметр рабочего вала D_p .

Согласно методике планирования эксперимента [6], выбираем симметричный композиционный ротатабельный план второго порядка. А поскольку выбрано четыре влияющих фактора, то план является четырехфакторным. Всего будет проведено 25 опытов, 16 из которых соответствуют полному факторному эксперименту («ядро» плана), 8 опытов со «звездными» точками и один опыт в центре плана. Диапазон изменения факторов выбираем согласно возможному изменению этих факторов на ШСГП 2500. Усилие прокатки в точках плана принято равным 16 МН, а регулирующее усилие 0,2 МН. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Факторы	b , мм	l_{op} , мм	D_p , мм	$K_{\Delta h}$, МПа
Основной уровень, (0)	1625	2200	690	20460
Интервал варьирования	187,5	100	10	8120
Верхний уровень, (+1)	1812,5	2300	700	28580
Нижний уровень, (-1)	1437,5	2100	680	12340
Звездная точка, (+2)	2000	2400	710	36700
Звездная точка, (-2)	1250	2000	670	4220

¹ Научный руководитель магистранта – М.И. Румянцев – к.т.н., профессор каф. ТОМ МГТУ

Результаты эксперимента

После того, как получили уравнения регрессии, по методике [6], и осуществили переход от них к полиномам с натуральными факторами, получили два уравнения модулей жесткости валков от усилия прокатки M_B^P и регулирующей M_B^Q силы:

$$M_B^P = -26465 + 3,227 b + 2,918 l_{op} + 62,39 D_p + 1,45 K_{\Delta h} - 0,018405 b l_{op} + 0,00666 b D_p + 0,0011846 b K_{\Delta h} - 0,02412 l_{op} D_p - 0,001767 l_{op} K_{\Delta h} + 0,002833 D_p K_{\Delta h} + 0,010365 b^2 + 0,009477 l_{op}^2 - 0,00975 D_p^2 - 0,000007 K_{\Delta h}^2; \quad (1)$$

$$M_B^Q = 1990 + 0,732 b - 1,3359 l_{op} - 3,6758 D_p + 0,387 K_{\Delta h} - 0,001243 b l_{op} - 0,0030986 b D_p - 0,0002147 b K_{\Delta h} + 0,00081 l_{op} D_p + 0,000261 l_{op} K_{\Delta h} + 0,0006084 D_p K_{\Delta h} + 0,0011014 b^2 + 0,000747 l_{op}^2 + 0,006 D_p^2 - 0,00000023 K_{\Delta h}^2. \quad (2)$$

При расчетах по уравнениям (1-2) значение $K_{\Delta h}$ должно иметь размерность кг/мм². На рис. 1 и 2 представлены диаграммы соответствия модулей жесткости валков от усилия прокатки и регулирующей силы, соответственно, рассчитанные с помощью модели [1-5] и полученных уравнений (1-2).

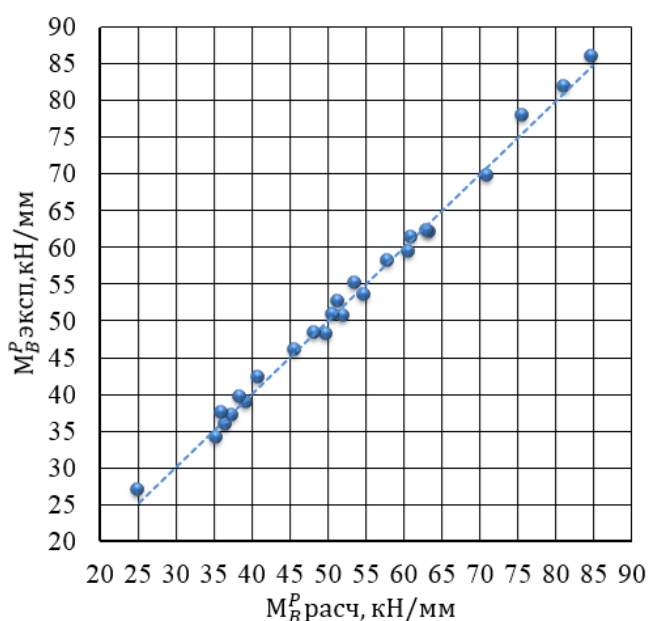


Рис. 1. Диаграмма соответствия модуля жесткости от усилия прокатки

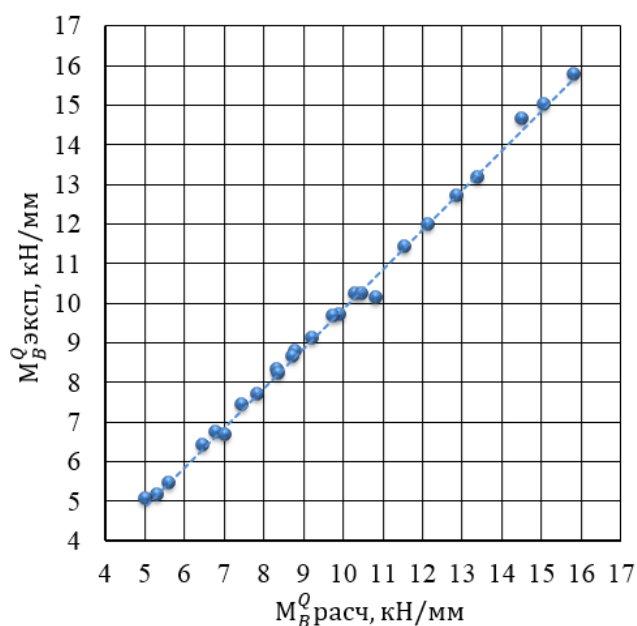


Рис. 2. Диаграмма соответствия модуля жесткости от регулирующей силы

В табл. 2 приведены относительные δ и абсолютные Δ погрешности, коэффициент детерминации (степень соответствия) R^2 и действенность [7, 8] E_δ полученной математической модели при $|\delta|$ не более 5%. Указанные оценки качества модели показывают, что ее соответствие результатам эксперимента можно считать отличным.

На рис. 3 приведены зависимости модулей жесткости валков от ширины полосы при действующих усилиях прокатки и регулирующей силы при максимальных, средних и мини-

мальных значениях влияющих факторов. Из рис. 3 видно, что модули жесткости тем больше, чем больше длина межвалкового контакта l_{op} . Но если с увеличением ширины полосы модуль M_B^Q монотонно уменьшается, то модуль M_B^P имеет минимум, положение которого зависит от ширины. С увеличением длины межвалкового контакта указанный минимум смещается в область больших ширин.

Таблица 2

Оценочные характеристики математической модели

Модуль жесткости валков от усилия прокатки					
$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$	$\Delta, \text{кН}$	$\Delta_{cp}, \text{кН}$	R^2	$E_5, \%$
-3,74...6,55	0,16	-1,80...2,32	0,06	0,99	96
Модуль жесткости валков от регулирующей силы					
$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$	$\Delta, \text{кН}$	$\Delta_{cp}, \text{кН}$	R^2	$E_{0,05}, \%$
-6,98...0,79	-1,73	-0,71...0,12	-0,15	0,99	92

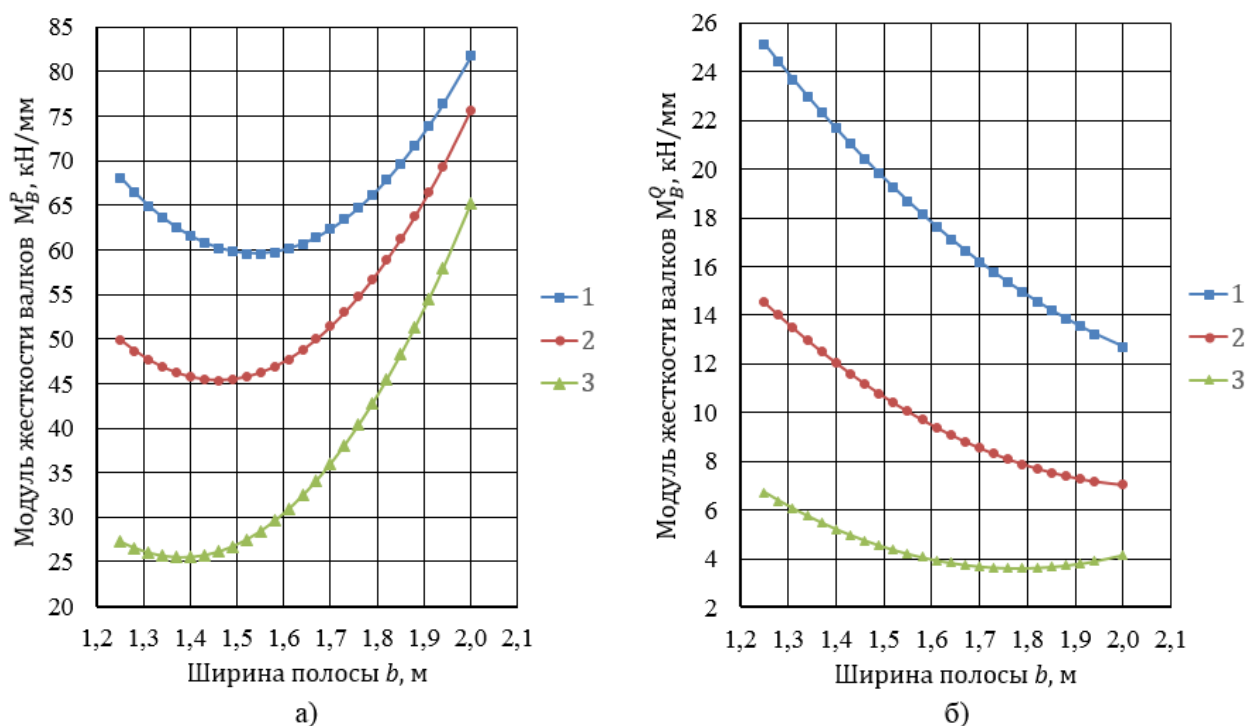


Рис. 3. Зависимость модулей жесткости валков от ширины полосы при вариации усилия прокатки (а) и регулирующей силы (б):

1 – $l_{op} = 2400$ мм, $D_p = 710$ мм, $K_{\Delta h} = 36700$ МПа; 2 – $l_{op} = 2200$ мм, $D_p = 690$ мм, $K_{\Delta h} = 20460$ МПа; 3 – $l_{op} = 2000$ мм, $D_p = 670$ мм, $K_{\Delta h} = 4220$ МПа

Заключение

С использованием методики планирования эксперимента получены полиномы второй степени, которые позволяют упростить расчет модулей поперечной жесткости от усилия прокатки и регулирующей для валкового узла чистовой клетки ШСГП 2500 ПАО «ММК». Действенность математической модели в виде указанных полиномов при допустимой погрешности 5% составляет 96% для модуля жесткости от усилия прокатки и 92% от регулирующей силы. Расчет по этим выражениям производится за короткое время, что является значительным преимуществом для производственных условий.

Библиографический список

1. Мельцер В.В., Салганик В.М. Матричный метод расчета деформации и профилировки валков листопркатной клетки кварто: учеб. пособие. Магнитогорск: МГМИ, 1970. 50 с.
2. Салганик В.М., Мельцер В.В., Омельченко Б.Я. Расчет профилировки валков листопркатных станов / МГТУ им. Г.И.Носова. Свердловск, 1977. 57 с.
3. Салганик В.М., Мельцер В.В. Исследование на ЭВМ деформаций и нагрузок валковой системы кварто: учеб. пособие. Свердловск: Изд. УПИ, 1987. 78 с.
4. Salganik V. Mathematical modeling of roll load and deformation in a four-high strip mill // Metal Forming. The University of Birmingham. UK September 9-11. 2002.
5. Омельченко Б.Я., Румянцев М.И., Федоров Д.С. Модель формирования профиля полос в чистовой группе широкополосного стана горячей прокатки // Материалы 64-й научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 2004-2005 г. Сб. докладов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2006. С. 48-51.
6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.
7. Румянцев М.И. Методы разработки и улучшения технологий производства проката для совершенствования листопркатных технологических систем // Теория и технология металлургического производства. 2017. №4 (23). С. 26-36.
8. Румянцев М.И. К вопросу построения математических моделей для исследования процессов прокатного производства / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Б.Моллера. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова. 2018. Вып. 24. С. 18-24.

● INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH ●

A.N.Kolybanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University

**SIMPLIFICATION OF CALCULATION OF THE SHAFT DEFORMATION
AND STRIP PROFILE FOR ROLLING IN A FOUR-HIGH STRIP MILL WITH
THE APPLICATION OF THE METHODOLOGY PLANNING THE EXPERIMENT**

Abstract. The article describes the plan and results of a computer experiment on the basis of which nonlinear approximations were obtained for a simplified calculation of the lateral stiffness moduli of a roll knot of a four-high strip mill 2500 hot rolling.

Keywords: deformation of rolls, strip profile, transverse thickness, modulus of rigidity, rolling force, four-high strip mill.

В.Ю.Рубцов

АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»

КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ КРИВЫМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Аннотация. В работе представлен обзор существующего на сегодняшний день состояния по развитию поперечно-винтовой прокатки периодических профилей. Проведен анализ существующих методик по калибровке валков и расчету усилий прокатки, как в поперечно-винтовой, так и поперечно-клиновой прокатке. Разработана методика калибровки валков для периодического профиля с полуэллипсоидными кривыми. Рассмотрена возможность разработки калибровок и изготовления валков для прокатки профилей, образованных кривыми второго порядка.

Ключевые слова: поперечно-винтовая прокатка, периодический профиль, кривые второго порядка, калибровка валков, приращение шага, подрезка реборды, уравнение кривой.

Введение. Состояние металлургической промышленности на сегодняшний день в области поперечно-винтовой прокатки периодических профилей

В современном мире просматриваются следующие тенденции в развитии черной металлургии:

1. изменение пропорций между развитыми и развивающимися странами в пользу последних;
2. ослабление прежней топливно-сырьевой ориентации и усиление ориентации на транспортные пути;
3. усиление ориентации на потребителя;
4. переход от крупных предприятий (комбинатов) к средним и мелким.

Вследствие этого расширяется производимый сортамент, как по маркам сталей, так и по изготавливаемым профилям. Около 90 % полученной стали проходит прокатный передел – это означает, что рынок черных металлов сосредоточен на изготовлении профилированных заготовок (круг, квадрат, швеллер, уголок), либо целиком готового продукта (рельс, труба, шпунт) с металлургических предприятий.

Для получения готовых периодических профилей широко применяется поперечная прокатка. Два наиболее производительных способа, являющиеся разновидностями поперечной прокатки: поперечно-винтовая и поперечно-клиновая прокатка. Данные способы прокатки являются наиболее сложными процессами среди всех существующих процессов прокатки, поэтому применяются достаточно редко.

При поперечной прокатке заготовка вращается между валками, вращающимися в одном направлении. Точки контакта между заготовкой и инструментом перемещаются по периметру заготовки в плоскости, перпендикулярной оси заготовки.

Процесс винтовой прокатки периодических профилей первоначально был разработан в начале 1950-х в СССР [1]. Процесс разрабатывался под руководством академика А.И.Целикова [2].

При винтовой прокатке заготовка перемещается поступательно, валки под углом друг к другу вращаются в одном направлении. Точки контакта между заготовкой и инструментом перемещаются по оси [3]. Процесс прокатки происходит следующим образом: круглый пруток задается в непрерывно вращающиеся валки, на боковой поверхности которых нарезаны винтовые калибры, повторяющие профиль получаемого изделия. Прокатка сплошных изделий осуществляется на двухвалковом стане. Передний конец прутка захватывается ребордами валков, начинает вращаться и, продвигаясь по оси калибра, постепенно обжимается, приобретая форму требуемого изделия. В конце калибра изделие отделяется и выбрасывается из валков. При этом реборды валков захватывают новую порцию металла, и процесс осуществ-

ляется непрерывно, пока не прокатывается весь прут. Обжимаемая валками заготовка удерживается на оси прокатки в стане с помощью специальных направляющих линеек. Калибровку валков выполняют таким образом, чтобы было обеспечено постепенное внедрение реборд валков в обжимаемую заготовку [4].

Еще во времена СССР, впервые в мировой практике, методом прокатки стали производиться различные заготовки для машиностроения по форме и размерам очень близкие к готовому изделию [5].

Исследования и разработка деталей прокатных технологий были начаты в конце 1940-х гг. по инициативе академика А.И.Целикова, а затем продолжены и развиты его учениками во ВНИИМЕТМАШ [6].

Но в настоящее время винтовая прокатка используется только для тел относительно простой формы, например, кольца и шары для подшипников, а также шары для шаровых мельниц.

В ряде статей последних лет были предложены методы расширения сортамента для поперечно-винтовой прокатки, так результаты детально изученных математических исследований специалистами из Люблинского технологического университета показали, что винтовая прокатка может использоваться для производства крепежа, ступенчатых валов и форсунок [3, 7]. В то же время авторы из Люблинского университета подчеркивают потребность в дальнейших экспериментальных исследованиях винтовой прокатки, чтобы расширить её применение для производства других деталей, включая полые элементы.

Проблема состоит в том, что даже винтовую прокатку стальных шаров трудно проанализировать теоретически из-за ее сложности. Прогнозы в технологии производства шаров, прежде всего основаны на экспериментальных методах исследования, а исследования в области применения данного способа прокатки для производства изделий более сложной формы могут завести в тупик. Недавно ученые из Китая – Ши и Ван, смоделировали процесс поперечно-винтовой прокатки и определили много упрощений для производства стальных изделий. В данном исследовании были разработаны новые инструменты для производства сферических деталей с винтовым вращением. Калибры валков были спроектированы с использованием инновационных технологий, которые были позаимствованы из более известного процесса – поперечно-клиновой прокатки (ПКП) [8].

По сравнению с другими стандартными процессами формирования, ПКП обладает многими преимуществами, такими как: высокая производительность, широкий диапазон используемой номенклатуры, повышенное качество получаемых изделий, автоматизация процесса и более низкая цена производимых изделий. Кроме того, это очень безвредный для окружающей среды процесс, что значительно улучшает условия труда, уменьшает промышленные отходы, поэтому применение основ данного метода в развитии процессов поперечно-винтовой прокатки вполне приемлемо.

Изучив существующую в настоящий момент картину по состоянию развития поперечно-винтовой прокатки, целью дальнейших исследований является рассмотрение возможности расширения сортамента поперечно-винтовой прокатки с получением периодических осевых профилей произвольной формы (рис. 1.). Кроме этого необходимо научное обоснование применения тех или иных методов, составление теоретических основ для изготовления калибров различных форм, моделирование их, а также написание расчетно-аналитической методики для подтверждения оптимальности создаваемых моделей.

Предполагаемые пути развития поперечно-винтовой прокатки

В данной статье рассмотрена возможность использования поперечно-винтовой прокатки для получения периодических профилей произвольной формы. Для осуществления данных мероприятий требуется разработка методик расчета прокатки периодических профилей, образованных кривыми первого и второго порядка (кривые третьего и четвертого порядка редко используются в технике и никогда не используются в формах деталей массового на-

значения, поэтому не составляют интереса для исследования их в качестве образующих кривых при поперечно-винтовой прокатке).

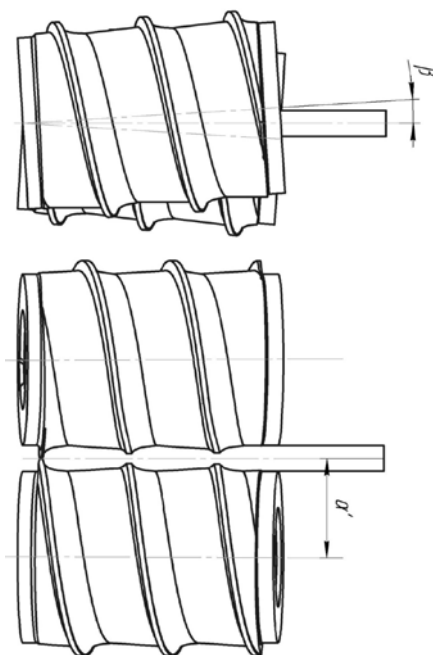


Рис.1. Процесс получения периодического осевого профиля произвольной формы

Методика должна включать расчет калибровки валков и расчет усилий прокатки. В статье проведена систематизация имеющихся в настоящий момент методик для расчета профилей, образованных кривыми первого и второго порядков и результаты сведены в таблицу, где представлена схема систематизации профилей по сложности конфигурации и возможности их применения для поперечно-винтовой прокатки. Также в данную таблицу включён способ поперечно-клиновой прокатки, т.к. некоторые получаемые профили могут быть позаимствованы из него, используя модели, полученные учеными из Китая [8].

Таблица

Профили, образование кривыми первого и второго порядка

Кривая или профиль образующей	Поперечно-винтовая прокатка	Поперечно-клиновая прокатка
Первого порядка		
Прямоугольник (цилиндр)	используется (цилиндры, кольца)	используется (штанги, трубы)
Трапеция (конус)	используется (наконечники)	используется (заклепки, валы, оси)
Второго порядка		
Окружность	используется (шары)	не применимо
Овал	используется (цильпессы)	используется (валы, оси, метизы)
Эллипс	не используется	используется (ступенчатые валы, оси)

Используя данную таблицу, видно, что кроме эллипсов в настоящий момент на практике используются все оставшиеся кривые первого и второго порядков, и их комбинации в поперечно-винтовой прокатке. Аналитический расчет калибровок и усилий прокатки был использован только у А.И.Целикова [4], им были описаны методики получения конических, прямоугольных (цилиндрических) и круглых (сферических) профилей. Также данная мето-

дика по расчету усилий прокатки была трансформирована и переработана для расчета усилий прокатки при производстве периодических профилей полуэллипсоидной формы [9], но в настоящий момент она не приемлема для ее практического применения. По ней для определения усилия в определенный момент времени, требуется нахождение элементарных площадей в каждой точке контакта, что приводит к объемному расчету с применением нескольких переменных параметров.

Среди методик расчета калибровок, кроме оригинальной, предложенной А.И.Целиковым [4], существует переработанная методика калибровки шаров, представленная учеными из Новокузнецка [10-12]. Остальные методики, как расчета калибровок, так и расчета усилий прокатки основаны либо на экспериментально-практических достижениях [13, 14], либо методом конечных элементов, с моделированием в программной среде [15, 16].

Кроме вышесказанного, в ряде случаев были определены интенсивности напряжений и степени деформации как в абсолютных величинах [17], так и в относительных [18].

Основной целью в настоящий момент является создание единой методики расчета профилей, образованных данными кривыми и их комбинациями, доступной для промышленного использования, но при этом учитывающей необходимые параметры, позволяющие получить достаточную соизмеримость с действительными.

С одной стороны, потребность заказчиков направлена на увеличение номенклатуры изделий, но с другой стороны, например, производство шестерен (на конотопском заводе «Красный металлист» в 1971 году прокатали более 1,5 миллионов шестерен [5]) в настоящий момент не актуально, и шестерни любых конфигураций преимущественно получают штамповкой и механической обработкой, в силу их серийности. Но одновременно с ростом номенклатур и разнообразия товаров, также появляются другие виды продукции, серийность которых растет и возможно в будущем потребует применения более технологичных методов изготовления, среди которых поперечно-винтовая прокатка для стальных изделий может являться одним из лидеров. Это относится к деталям различных размеров от заклепок и метизов, до корпусных деталей с осевой симметрией.

Разработка калибровки при прокатке профилей, образованных кривыми второго порядка

Разработка калибровок валков таких изделий будет заключаться в построении модели прокатки и проверки постоянства объемов.

Согласно теории расчета калибровки валков, для полного заполнения профиля необходимо, чтобы в процессе формовки металл заготовки непрерывно прилегал к реборде калибра. Это возможно при условии, что элементарный объем металла, вытесненный из перемычки (dV_{Π_α}), всегда равен или несколько меньше элементарного приращения объема получаемой фигуры (dV_{Φ_α}) [4]. Тогда коэффициент натяжения в перемычке, компенсирующий неточности изготовления валков и настройки стана определяется по формуле:

$$k = \frac{|dV_{\Phi_\alpha}|}{|dV_{\Pi_\alpha}|}. \quad (1)$$

При значениях $k > 1$, будет происходить вытяжка металла, с возможным образованием пустот между заготовкой и ребордой, что в дальнейшем образует накат, а при $k < 1$ – будет происходить натяжение перемычки, что может привести к разрыву заготовки в процессе прокатки. Анализируя известные калибровки, можно увидеть, что коэффициент k варьируется от 1 до 1,2. По данному коэффициенту можно определить характер калибровки.

Аналитический метод будет заключаться в расчете элементарных объемов получаемой фигуры и варьированием данных параметров по длине валка.

В качестве примера зададимся цилиндрической фигурой, с двух сторон имеющей полуэллипсоидные профили (рис. 2).

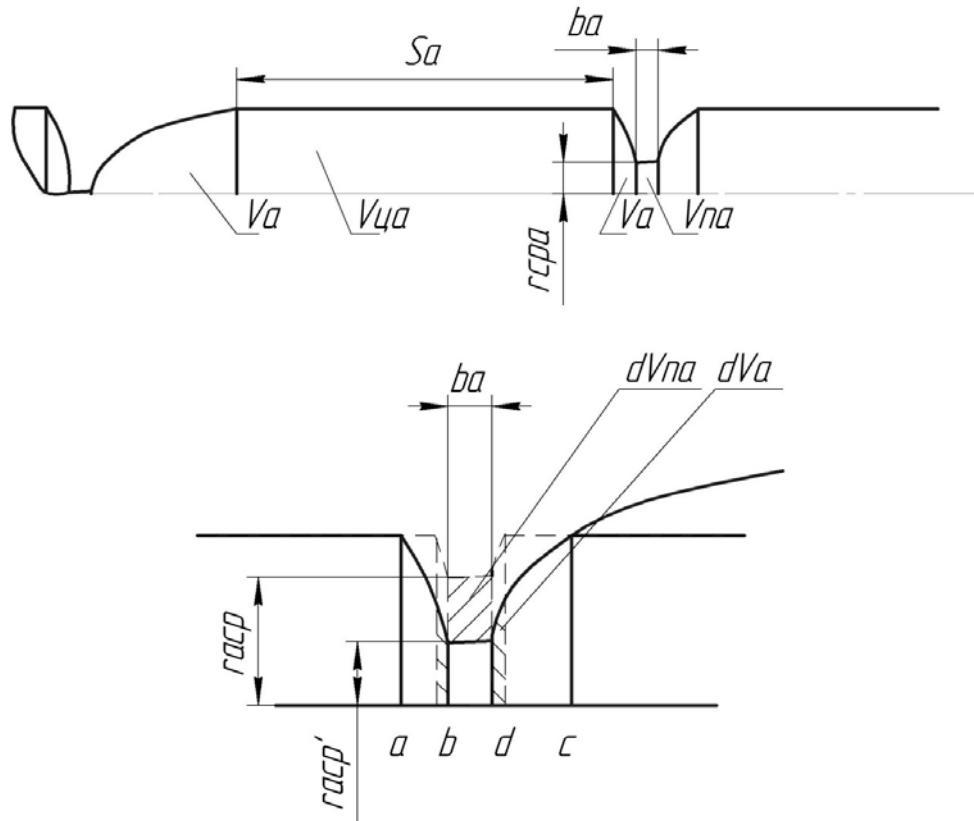


Рис. 2. Схема приращения объемов при прокатке

Для перемычки элементарный объем определяется следующим выражением:

$$V_{п\alpha} = \pi r_{\alpha pr}^2 b_{\alpha}. \quad (2)$$

Элементарный объем, вытесненный из перемычки, равен полному дифференциалу функции от двух переменных:

$$dV_{п\alpha} = 2\pi r_{\alpha pr} b_{\alpha} dr_{\alpha pr} + \pi r_{\alpha pr}^2 db_{\alpha}. \quad (3)$$

Для полуэллипсоида общее уравнение объема представляет:

$$V_{\alpha} = \frac{2}{3} \pi r x y z. \quad (4)$$

Преобразовав для нашего случая, получим:

$$V_{\alpha} = \frac{2}{3} \pi R^2 l. \quad (5)$$

Приращение объемов для двух элементов составит:

$$dV_{\alpha(n)} = \frac{\frac{2}{3} \pi r_{(n-1)ab}^2 l_{(n-1)ab}}{\sqrt{r_{(n-1)ab} l_{(n-1)ab} - r_{nab} l_{(n)ab}}} dr_{nab} + \frac{\frac{2}{3} \pi r_{(n-1)cd}^2 l_{(n-1)cd}}{\sqrt{r_{(n-1)cd} l_{(n-1)cd} - r_{ncd} l_{(n)cd}}} dr_{ncd}. \quad (6)$$

Сумма данных объемов равна в любой момент прокатки.

$$\sum V = V_{n\alpha} + V_{ш\alpha} + V_{y\alpha} = const. \quad (7)$$

Рассмотрев два произвольных положения получим:

$$V_{п\alpha n} + V_{ф\alpha n} + V_{ц\alpha n} - V_{п\alpha n+1} - V_{ф\alpha n+1} - V_{ц\alpha n+1} = 0; \quad (8)$$

$$V_{у\alpha} = \pi R^2 s_{\alpha}; \quad (9)$$

$$V_{ф\alpha n} - V_{ф\alpha n+1} = dV_{\alpha(n)}; \quad (10)$$

$$V_{у\alpha n} - V_{у\alpha n+1} = -\pi R^2 (s_{\alpha n+1} - s_{\alpha n}). \quad (11)$$

Вытяжка будет определяться ΔS :

$$\Delta S = s_{\alpha n+1} - s_{\alpha n}. \quad (12)$$

Вытяжка в данном случае является удлинением цилиндрической части получаемой заготовки, подставив известные параметры в формулу 12, получим:

$$\Delta S = \frac{dV_{\alpha(n)} + V_{п\alpha n} - V_{п\alpha n+1}}{\pi R^2}. \quad (13)$$

В полученном уравнении все параметры известны, поэтому, подставив данные, получаем значение вытяжки. Высота подрезки реборды будет определяться изменением $r_{\alpha sp}$, изменение шага определяется по известной методике. Данный пример показывает возможность разработки калибровок профилей, образованных кривыми второго порядка. При изготовлении фигур более сложной конфигурации, возможно построение 3D моделей с автоматическим определением элементарных объемов в процессе прокатки, учитывая условие заполнения калибров, а затем выбор параметров: шаг нарезки калибра, высота подрезки реборды и шаг подрезки реборды с определением приращений этих функций.

Возможность изготовления валков для получения профилей, образованных кривыми второго порядка

Проблема возникнет в изготовлении валков при нарезке калибров. Учитывая переменный профиль калибра и переменные значения приращения шага и подрезки реборды, появляется задача программирования металлорежущего станка, на котором будут изготавливаться данные валки. В настоящий момент в мире существует только несколько аналогов пятикоординатных металлорежущих станков, на которых возможно получение профиля по построенной 3D модели. Такие станки производят фрезеровку получаемого профиля специальными сферическими фрезами с различным радиусом сферы. Координация производится за счет контрольных точек. Дискретность точек определяется качеством получаемой поверхности. При использовании 3D модели, перемещение инструмента будет производиться пошагово и изготовление валка может занять несколько суток, что приведет к значительным затратам при создании парка дорогостоящего металлорежущего оборудования, способного обеспечить нужную производительность прокатного стана и по цене соизмеримого со стоимостью самого стана, в конечном счете производитель откажется от такого метода производства. В дальнейших исследованиях предлагается разработка модели для определения координатных параметров, которая будет применима на практике. А при написании программы для металлорежущего оборудования, обеспечит рациональное использование его ресурса, а также возможность применения четырехкоординатных станков широкого назначения для изготовления калибров. За основу дальнейших исследований можно взять то, что кривая второго порядка вполне определяется пятью своими точками, если никакие четыре из них не лежат на одной прямой, при этом кривая, заданная пятью точками вырождается в том и только в

том случае, когда три из заданных точек лежат на одной прямой [19]. Уравнение кривой, проходящей через точки (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) , будет составлять:

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5 y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

Модель в таком виде приемлема для большинства программируемых металлорежущих станков. С наложением на данную матрицу переменных по длине вала (приращение шага, подрезки реборды), возможно составление математической модели для программы станка с получением валков с профилями, образованными кривыми второго порядка и любой их комбинации.

Заключение

Поперечно-винтовая прокатка является достаточно перспективным объектом исследования, и, с условием унификации и стандартизации процессов, может послужить развитию промышленности не только в российской, но и мировой экономике, являясь одним из самых экономичных методов получения заготовок периодических профилей в массовом производстве. При этом в настоящий момент, имея технические возможности по проектированию валков и их изготовлению, возможно расширение номенклатуры производимых периодических профилей в очень широком диапазоне. Может быть, в ближайшем будущем будут построены поперечно-винтовые станы, способные производить заготовки любой сложности.

Библиографический список

1. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls / Z. Pater [and etc.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013. T67. P. 1-7.
2. Разумов-Раздолов К.Л. Прогрессивные методы конструирования и технология изготовления калибров валков для поперечно-винтовой прокатки.: автореф. дисс. канд. тех. наук: 05.03.01 / К.Л.Разумов-Раздолов; Тульский гос. ун-т. Тула, 2000. С. 16.
3. Tofil A Overview of the research on roll forging processes / A.Tofil, Z.Pater // Advances in Science and Technology Research Journal, 2017. vol. 11. №2. P. 72-86.
4. Целиков А.И. Специальные прокатные станы / А.И.Целиков, М.В.Барбарич. М.: Металлургия, 1971. 336 с.
5. Мезенин Н.А. Занимательно о железе / Н.А.Мезенин. М.: Металлургия, 1977. 152 с.
6. 60 лет научно-конструкторской и производственной деятельности ВНИИМЕТМАШ / сост. В.Г.Дрозд, А.И.Майоров, Б.А.Сивак; [отв. ред. Н.В.Пасечник]. М.: Наука, 2005. 509 с.
7. Pater Z. FEM Analysis of the Multi-Wedge Helical Rolling Process for a Workholding Bolt / Z.Pater // MATEC Web of Conferences 80, 2016.
8. Wang Influence of cooling condition of tools on central deformation of workpiece and tool wear in cross wedge rolling / Wang [and etc.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012. vol. 59. №5. P. 473-482.

9. Рубцов В.Ю. Методика расчета усилий при поперечно-винтовой прокатке периодических профилей полуэллипсоидной формы на примере цельпечсов / В.Ю.Рубцов // Калибровочное бюро, 2017. №10. С. 14-20.
10. Перетяtko В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 / В.П.Перетяtko, А.С.Климов, М.В.Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2013. №4. С. 27-30.
11. Перетяtko В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2 / В.П.Перетяtko, А.С.Климов, М.В.Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2013. №6. С. 16-20.
12. Перетяtko В.Н. Калибровка валков для прокатки шара / В.П.Перетяtko, А.С.Климов, М.В.Филиппова // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии, 2012. №30. С. 44-50.
13. Филиппова М.В. Усилия при прокатке шаров / Филиппова М.В., Перетяtko В.Н., Климов А.С. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии, 2011. №27. С. 143-146.
14. Филиппова М.В. Усилия и напряжения при прокатке шара / М.В.Филиппова, В.Н.Перетяtko., С.В.Сметанин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2016. Т59. №8. С. 587-588.
15. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls / P.Chila, Z.Pater, J.Tomczak, P.Chila // Arch. Metall. Mater. Vol. 61, 2016. №2. P. 485-492.
16. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail / Z.Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 10, 2016. №30. P. 110-114.
17. Математическое моделирование прокатки шаров / М.В.Филиппова, М.В.Темлянцев, В.Н.Перетяtko, Е.Е.Прудкий // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2017. Т60. №7. С. 516-521.
18. Рубцов В.Ю. Влияние размеров бочки шаропрокатного вала на качество шара / В.Ю.Рубцов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, 2017. Т1. С. 90-93.
19. Корн Г., Корн Т. Характеристическая квадратичная форма и характеристическое уравнение / Г.Корн, Т.Корн // Справочник по математике. 4-е издание. М: Наука, 1978. 64 с.

• INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH •

V.Y.Rubtsov

EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant

**ROLL PASS DESIGN OF CROSS-HELICAL ROLLING OF PERIODIC PROFILES
FORMED BY CURVES OF THE SECOND ORDER**

Abstract. In work the review of existing today progress in development of cross-helical rolling of periodic profiles is submitted. The analysis of the existing methods of roll pass design and calculation for cross-helical rolling, and in cross-wedge rolling is carried out. The technique of roll pass design is developed for a periodic profile formed by semi-ellipsoid curves. The possibility development of roll pass design and production rolls, using for rolling with profiles formed by curves of the 2-nd order is considered.

Keywords: cross-helical rolling, periodic profile, curves of 2-nd order, roll pass design, pitch increment, undercutting of flange, curve equation.

A.V.Filimonov

Ltd Co «New Industrial technologies», city of N. Novgorod

S.V.Filimonov

Ltd Co «Spetstechnology», town of Ulyanovsk

FORMING DIAGRAMS AND ROLL-PASSES IN ROLL-FORMING OF SECTIONS WITH MIDDLE RIGIDITY ELEMENTS

Abstract. There are discussed forming diagrams for roll-formed profiles with middle rigidity elements adopted in traditional roll-forming and in intensive deformation method. A manufacture technology based on the intensive deformation method for a symmetrical profile with middle double thickness rigidity elements is offered.

Key words: roll-forming, roll-formed profile, middle rigidity element, number of passes, forming length zone, forming roll.

Modern thermally separated and non-separated systems of doors, windows, façades, glazed roofs, rails and gates largely use various roll-formed sections (profiles) with middle rigidity elements. Thus, the range of Foerster profiles includes dozens of such semi-closed profiles [1] to be preferably produced through intensive deformation method (owing to minimum number of passes and compact technological equipment) [2, 3]. Nevertheless, their technology is far to be a trivial task. The further limitations come out during the implementation of the method to manufacture the above nomenclature of sections: rather large number of passes, peripheral element edge waviness, flange kink or flange plastic collapse, spring-back, profile surface defects in contact zones, warpage, twist (of an asymmetric profile) [4].

The paper goal consists in revealing the most general laws in forming and pass design for the above sections on the basis of a profile with middle rigidity elements.

The cross-section of the mentioned Foerster profile is given in fig. 1. General requirements towards the profile and to the appropriate roll-forming machine are given in table 1. The patented equipment shown in table 1 is developed and being produced in Ltd Co «Spetstechnology» (town of Ulyanovsk). In column 3 there are indicated two types of roll-forming machines for the case of insufficient number of passes revealed during the technology development. The analysis of the two first columns in table 1 shows that the profile tolerances are rather tight for roll-formed sections.

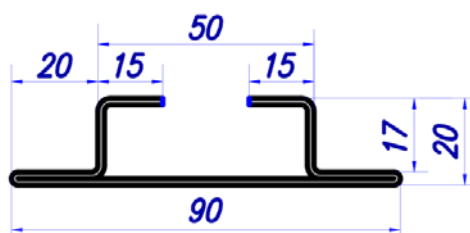


Fig. 1. Initial configuration of profile 90×20×1.5 mm with middle double thickness rigidity elements (material – steel of group 08 or stainless steel)

In small-lot roll-forming it is wise to use the technology based on intensive deformation method [2], since the traditional roll-forming technologies are not sufficiently efficient for small-lot production due to the following grounds: 1) for small-lot production the forming rolls and guidance devices will not be repaid; 2) considerable expenditures related to the powerful equipment use (energy consumption, working area, etc.) will decrease the competitiveness of the profiles having small cross-section dimensions; 3) the use of guidance devices will substantially increase the rolls change-over time, let alone the requirement of high qualification of the profiler; 4) the high number of passes involves a prolonged period of tooling cost recovery; 5) the use of unclosed roll opening requires the use of guidance devices not only for forming itself but also for blank positioning; 6) the force locking of the rolls may cause non-uniform blank deformation across its cross-section and de-

fects of profile shape such as twisting, warping and camber; 7) the blank cutting-in into the upper roll on the last passes may cause some profile surface defects; 8) slipping forces applied to the blank may increase contact friction provoking non-uniform deformation and defects; 9) during the manufacturing reorganization and diversification the bulky and costly equipment for traditional roll-forming may become illiquid.

Table 1

General requirements toward the profile bearing
middle rigidity elements and specifications of roll-forming machines

<i>Requirements toward the profile dimensions</i>	<i>Value</i>	<i>Roll-forming machines specifications (SPU-400K12-65/50 and SPU-400K8-65/50)</i>	<i>Value</i>
Unspecified limit deviations of dimensions	H14, h14, IT14/2	Working shaft diameter, mm	65/50
Unspecified inner radii, mm	1.5(±0,5)	Number of working stands, pc.	12 (8)
Camber, mm/m	1.0 at most	Inter-stand distance, mm	400 (285)
Twist angle, m/mm	2° at most	Inter-axle distance, mm	130/190 (120/150)
Edge waviness, mm	±0.8 at most	Working shaft length, mm	400 (250)
Limit angle deviation, deg.	±1	Key groove dimensions in the shafts (B×t), mm (key height – 10/9 mm)	16×6 (14×5.5)
Limit deviations of elements in height, mm	±0.1	Roll-forming speed, m/min	20/10
Limit deviations of elements in width, mm	±0.2	Lower and upper shaft speed ratio	Lower shafts are driven

The roll-forming of profiles with middle rigidity elements turned inward through intensive deformation method usually causes less problems than that relating to the profiles with rigidity elements turned outward (see case study of roll-forming of the profile type «stringer» with dimensions 85×25×1.0 mm or profiles Knauf in the same book [2]). The technology development on the basis of intensive deformation method includes the following stages: feasibility analysis of a given profile configuration, profile cross-section location in the last stand, choice of base element and tracking axis, number of passes calculation, development of forming diagram, equipment choice, process design and tooling design, tooling manufacturing and its setting-up, technology and equipment implementation. These technology development stages will be further associated with roll-forming of profile Foerster 90×20×1.5 mm with middle rigidity elements (see fig. 1).

Profile design feasibility analysis

Such an analysis is carried out on the contractual stage aiming at the technology development according to paper [5] containing 34 criteria. In necessary cases the profile design may be changed upon the Customer approval. Particularly, for some profiles with large peripheral elements there may be induced constructive or technological rifts to raise the peripheral elements rigidity. These rifts should not contradict the profile functionality. In the actual case, the horizontal flanges width is equal to ten-fold of the blank thickness, thus, the above mentioned measures are not necessary.

Profile locating in the last pass opening

Symmetric multi-element profiles are usually located so as their open part be turned upward (their bottom being horizontal), while asymmetric profile bottom should be tilted at a calculated angle. The upper position of the profile «mouth» allows the operator to observe the process and makes

it easy to set up the tooling. The profile location in the last stand involves the notions of «base element» choice and «tracking axis» choice.

Definition of «base element» and «tracking axis»

In traditional roll-forming both of these two notions are mostly related to the speed mode of manufacturing. In several cases the base element was not associated physically with the blank body. This may be illustrated through the consideration of different methods of tube forming, when the tracking axis was alternatively «fastened» to the lower point, center of gravity or unified edge level [6]. In the second and third cases the base element has no connection with physical body, although it is thought geometrically in terms of a point or segment (connecting the bland edges) respectively. In intensive deformation method the situation is different [2]. The notion «base element» is associated with a physical element of the blank (rectilinear element or bending zone), which is usually in contact with the lower part of the roll opening.

The tracking axis usually passes through the base element middle which is liable to minimum displacements in the space during roll-forming in contrast to other profile elements. The fig. 2, shows the flower forming diagram, where the base element is the profile bottom, while the tracking axis passes through its middle, just in intersecting point of the bottom line and profile axial line.

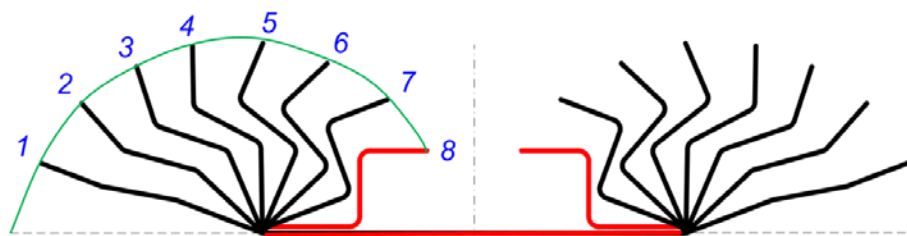


Fig. 2. Flower forming diagram for profile Foerster 90×20×1.5 mm with its edge displacement trajectory: 1-8 – numbers of technological passes

In whole, the choice of base element and tracking axis may affect the forming speed mode (difference of speeds in cross-section height), especially for high profiles. It also may be sensible when selecting technological bases at forming rolls manufacturing.

Number of passes calculation

The traditional roll-forming uses several approaches due to the traditions adopted in some scientific schools [2]. In intensive deformation method, the procedure of number of passes determination is formalized and given by the following equation [7]:

$$N = \frac{\Delta}{L_m \cdot \beta} \cdot \sqrt{\frac{H}{W}} \cdot \sqrt{\frac{s}{k \cdot T}} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_B} \cdot \sqrt[n]{\frac{2\xi}{\pi}} \cdot \eta, \quad (1)$$

where Δ – edge displacement in vertical plane containing the working shafts axis in the last pass with reference to the appropriate points of a flat blank, mm; L_m – roll-forming machine interstand distance, mm; β – limit angle of blank «constraint», rad.; H , W – height and width of the profile cross-section respectively, mm; s – profile reduced thickness; k – profile quality class; T – cross-section size allowance for quality class k , mm; σ_s , σ_B – bland material yield stress and its ultimate stress, MPa; n – number of bending zones in the profile; ξ – total folding angle of the flange carrying the rigidity element, rad.; η – dimensionless form-modifier depending on the ratio «forming roll base diameter to forming height».

The calculation error according to formula (1), as usual, does not exceed 0,7 [7]. Yet, for asymmetric profile, the calculations should be made for both parts (carrying flanges) of the profile with reference to the tracking axis. The edge displacement and total bending angles of the carrying

flanges may be different, giving thus different values of numbers of passes, the greatest of which should be declared sought-for. To illustrate the above, the fig. 3 shows the program and diagrams used to determine the number of passes for profile 90×20×1.5 mm being fabricated to match the 11-th quality class.

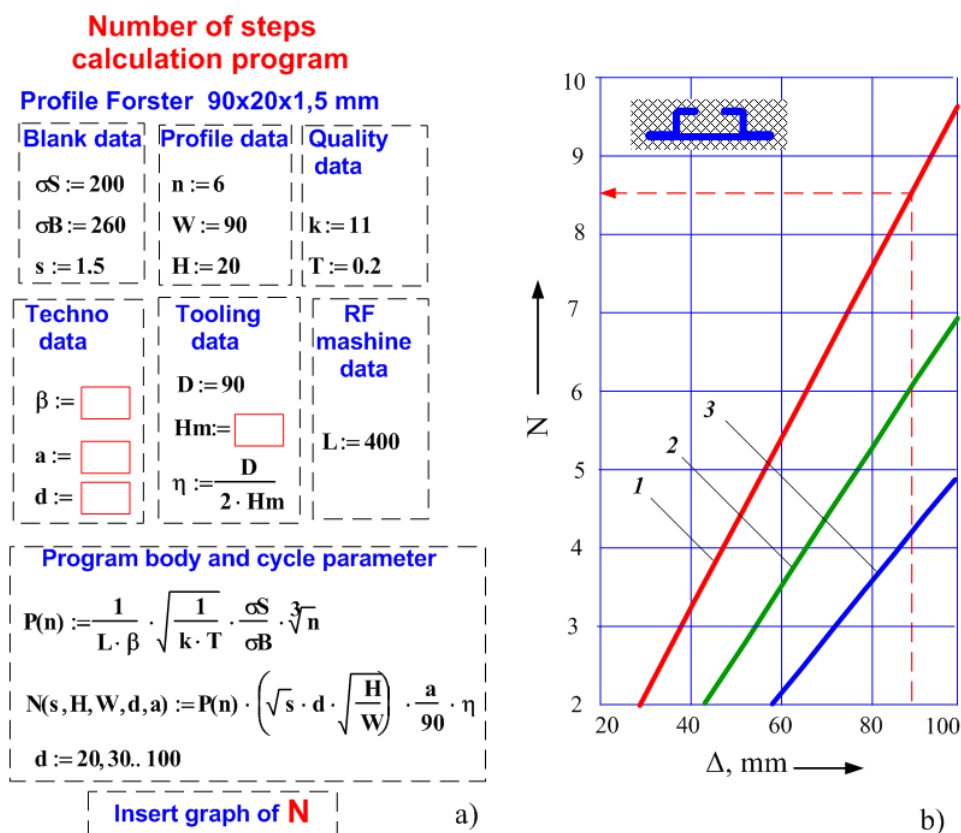


Fig. 3. Program to calculate the number of passes in application MathCad2000Pro (shaded rectangles conceal the data referring to technology «know-how»)

(a) and diagram for number of passes determination
(b): 1, 2, 3 – $\xi = 180, 135$ and 90 degrees respectively

The calculating and graph generating program (fig. 3a) includes the data blocks for: a) blank; b) profile cross-section overall dimensions; c) required quality class; d) secondary parameters (technological); e) tooling; f) roll-forming machine. The program body includes the calculating dependencies and cycle parameter. The computing is ended by the graph generation for the number of passes determination (fig. 3b). For the profile under consideration the required number of passes is eight (round-off included).

Forming diagram development and equipment selection

The forming diagram development is started with the blank calculation on the basis of neutral line by adding a calculated blank width increment to provide for its transversal compression by the rolls to prevent the thinning in bending zones and to reduce the spring-back [2]. In a 3-D application the profile cross-section is located in the last pass taking into consideration the number of passes and inter-stand distance of the eventual roll-forming machine. They select the trajectory of reference points (blank edges and future bending zones), then, the 3-D model is created to deliver the roll opening for each step as a result of intersection of the model and an appropriate vertical plane. Sometimes it requires corrections to match the profile peculiarities and specific requirements towards it. At 2-D designing, a preliminary forming diagram should be created. In this diagram, be it linear (fig. 4a) or flower type (see fig. 2), the folding angles are determined on the basis of equal

longitudinal strains of flanges per step. To do so, we have previously to calculate the reduced thickness for the profile side walls bearing rigidity elements and further to obtain the folding angles with the aid of an iteration procedure [2]. To make the calculations easier, one may approximate the reduced thickness per steps, taking its values in the first and in the last pass into consideration.

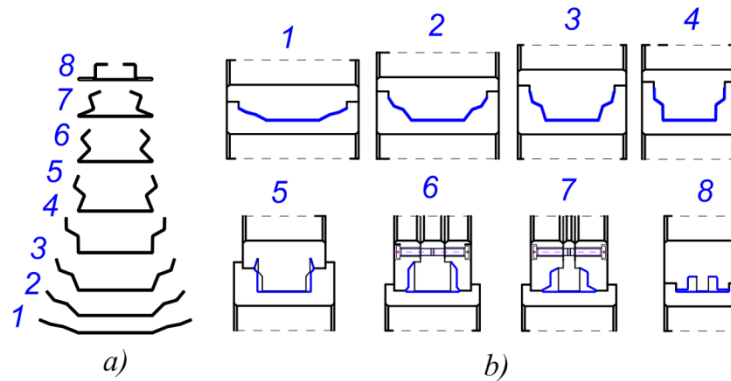


Fig. 4. Linear forming diagram (a) and roll openings (b) for profile 90×20×1.5 mm

It is clear, that the preliminary forming of future bending zones should occur on the first steps with radii matching the profile drawing. This differs the intensive deformation method from the traditional roll-forming where the bending radii variations are monotonous with the step number increase.

On setting the folding angles, one should calculate the deformation length L_k (k – step number) for each step according to the formula [8]:

$$L_k = \sqrt{\frac{4 \cdot b^3 \cdot \theta_k \cdot \left(\frac{2\sigma_{T0}}{\sqrt{3}} + \frac{4}{3} \cdot \lambda \right)}{3\sqrt{3} \left(\frac{\bar{r}}{3} \sigma_{T0} + \frac{2+3\bar{r}}{10} \cdot \lambda \right) \frac{s}{r} + \frac{3 \cdot \bar{C} \cdot s}{2 \cdot \theta_k} \cdot (\sigma_{T0} + \lambda \cdot \varepsilon_{np}) \cdot \varepsilon_{np}}, \quad (2)$$

where b – side wall width; σ_{T0} – blank yield stress; λ – linear hardening module, \bar{r} , \bar{C} – relative radius and relative bottom width respectively; s – blank thickness; ε_{np} – known value of the ultimate elastic strain [7].

The relation (2) is to be used to precise the folding angles θ_k according to the criterion (3), where the right side gives ultimate folding angles:

$$\theta_k \leq \text{root}(L(\theta) - L_M, \theta), \quad (3)$$

where $L(\theta)$ – function defined by formula (2); L_M – roll-forming machine inter-stand distance.

If the condition (3) is not satisfied, it means that on the previous step the blank would be re-formed. That's why the folding angle of the previous step should be diminished. In whole, the limit abilities of the intensive roll-forming are established in paper [8].

As soon as the forming diagram development is over, the final choice of the roll-forming machine should be made. This is important since the roll-forming machines of the same type may have different lengths of their working shafts (see table 1). The calculated blank width may prompt you the required value of the working shafts [7]. As it follows from table 1, the 8-stand roll-forming machine SPU-400K8-65 is suitable to manufacture the profile under consideration.

Process and tooling design, tooling manufacturing and its setting-up

Depending on the Customer's order, the technology may include auxiliary operations (e.g., coil shearing, packing, etc.), so the technology development should be in parallel with the forming rolls manufacturing.

The tooling of the intensive roll-forming should be designed, manufactured and set up according to papers [2, 7]. The electronically designed forming rolls (see fig. 4b) are to be manufactured on the CNC turns adopting electronic drawings without dimensioning.

As shows fig. 4b, the roll openings of all the passes are closed, with horizontal and vertical bases of the lower roll ledges. There is used geometric closing thanks to the use of swing (hinged) links of the roll-forming machine. The blank cutting-in on the first steps is performed into the upper roll, while on the last steps the blank cutting-in is executed into the lower roll. The first and second pairs of rolls give the blank its final bending zones radii. The level of roll opening locking is chosen to ensure favorable forming conditions and to minimize the rolls mass. The upper rolls of the sixth and seventh pairs are split-face to give access to the cutters to the roll working surfaces. The described tooling for the intensive roll forming is very distinct from that of traditional roll-forming.

At the tooling setting-up the blank and profile parameters should be thoroughly monitored according to table 1. The main parameters of profile 90×20×1.5 mm (fig. 5) are given in table 2.



Fig. 5. Specimen of profile 90×20×1.5 mm (produced in Ltd Co «Spetstechnology»)

Table 2

Measured and processed parameters of profile 90×20×1.5 mm

Monitored parameter and its nominal value according to the drawing	Mean value, mm	Standard deviation for universal set	Confidence interval at significance level 0.05	Confidence interval at significance level 0.02	Extreme deviations IT14/2
$C = 90 \text{ mm}$	90.29	0.094	0.024	0.066	± 0.35
$\Delta = 30 \text{ mm}$	29.88	0.106	0.062	0.074	± 0.25
$H_R = 20 \text{ mm}$	20.24	0.080	0.048	0.056	± 0.21
$H_L = 20 \text{ mm}$	20.25	0.054	0.032	0.038	± 0.21
$b_L = 15 \text{ mm}$	15.79	0.027	0.016	0.019	± 0.18
$b_R = 15 \text{ mm}$	14.93	0.040	0.024	0.028	± 0.18
$r_{sL} = 1,5 \text{ mm}$	1.18	0.079	0.061	0.073	± 0.5
$r_{sR} = 1,5 \text{ mm}$	1.10	0.070	0.083	0.049	± 0.5
$r_{iL} = 1,5 \text{ mm}$	1.40	0.104	0.061	0.073	± 0.5
$r_{iR} = 1,5 \text{ mm}$	1.35	0.114	0.061	0.073	± 0.5
$\alpha_L = 90^\circ$	$89^\circ 21'$	$17.7'$	$10.5'$	$12.4'$	$\pm 60'$
$\alpha_R = 90^\circ$	$89^\circ 09'$	$13.0'$	$10.5'$	$12.4'$	$\pm 60'$
Notes: C – bottom width; Delta – gap between horizontal flanges; H_R – height of the right side wall; H_L – height of the left side wall; b_L – width of the left horizontal flange; b_R – width of the right horizontal flange; r_{sL} , r_{sR} , r_{iL} , r_{iR} – bending radii at the left and right horizontal flanges and at the bottom (on the left and on the right) respectively; α_L , α_R – angles between the bottom and vertical side walls (left and right respectively)					

The dimensions of the bottom, flanges, the height and gaps between horizontal flanges were measured with the help of an electronic caliper to within 0,01 mm on the length 200 mm with a step of 20 mm; the angles between the vertical walls and the bottom were measured at spaced intervals of 20 mm with the aid of an angular gauge with vernier 5UM (GOST 5378-88) with main error $\pm 3'$; the bending radii were measured on the section scans with 10-fold selection of approximating circumferences and scaling via the wall thickness in its middle part using the application MS-VISIO; the bending zone quality and thickness variations were assessed with the help of device MPB-2 with magnification 20x. The results were processed using the application MS-EXCEL-2007.

The analysis of table 2 shows that the parameters of the profile being produced are in full conformity with the drawing requirements. Minor deviations slightly beyond the drawing restraints are observed on the left flange, but they do not affect the profile functionality, thus the profile is compatible with assembly requirements. The bending radii which are somewhat lower than those specified in the drawing are also within the allowable limits. Although the mean values of the angles between elements are close to the admissible limit, they do still stay within the allowable boundaries. The camber, twisting and edge waviness were not observed. The comparison of the confidence intervals with allowable extreme deviations allows to state that the roll-forming process stability is rather high.

Industrial implementation

The developed technology is realized on the basis of an automated roll-forming line developed by Ltd Co «Spetstechnology» and is being used on the Customer's industrial premises.

References

1. Catalogue Forster: Schweiz: Forster Profilsysteme AG, 2016. 37 S.
2. Filimonov S.V., Filimonov V.I. Intensive roll-forming of sheet-metal profiles. – Ulyanovsk: Publ. house of UISTU, 2008. 444 p.
3. Filimonov V.I. Classification and trends in roll-forming equipment evolution // Rolled metal production, 2008, №4. P. 37-43.
4. Lapin V.V., Filimonov S.V., Filimonov V.I. Defects of roll-formed profiles with rigidity elements: requirements and employed materials // Sheet-metal profiles roll-forming: theory and practice (2015): collected scientific papers / edited by D.T.S., professor V.I.Filimonov. – Ulyanovsk, 2015. 161 p. P. 18-26.
5. Filimonov V.I., Filimonov S.V., Karpov S.A., Kokorina I.V. Manufacturability and design of roll-formed profiles // Handbook. Engineering journal, 2015, №8. P. 11-17.
6. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romatsev B.A., Samusev S.V. Tube manufacturing technology. Moscow: Internet Engineering, 2002. 640 p.
7. Filimonov A.V., Filimonov S.V. Semi-closed roll-formed profile fabrication using intensive deformation method / edited by prof. V.I.Filimonov. Ulyanovsk: Publ. house of UISTU, 2010. 206 p.
8. Filimonov S.V., Filimonov A.V., Filimonov V.I. Deformation length model at intensive roll-forming of strain-hardening material // Rolled metal production, 2008, №10. P. 26-32.

С.В.ПоворовФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный технический университет)»**СПОСОБ РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ
ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ
ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ В РОЛИКАХ**

Аннотация. При проектировании калибров для производства фасонных профилей из листовой заготовки возникает необходимость графического построения контура поперечного сечения заготовки на промежуточных стадиях формообразования. При этом размеры поперечного сечения известны для конечной формы профиля, а на промежуточных стадиях формообразования значения размеров не известны, но они определяются способом формообразования, который выбрал инженер. Поскольку сложность геометрической формы профиля и количество промежуточных стадий формообразования часто бывают достаточно велики, то актуальным является вопрос автоматизации процесса выполнения этих расчетов. Об одном из способов автоматизации процесса расчета размеров говорится в данной статье.

Ключевые слова: профилегибка, формовка в роликах, калибровка, система линейных алгебраических уравнений.

В работе [1] описан способ автоматизации расчета размеров поперечного сечения заготовки для процесса профилирования в роликах (профилегибки). Показано как задача определения неизвестных размеров сводится к системе линейных алгебраических уравнений и самое главное, показано, как автоматизировать составление матрицы этой системы. Для этих целей предлагается ввести два логических параметра для каждого элемента профильной линии. Первый параметр – dn_i указывает, уменьшается ли длина i -ого элемента профильной линии за счет того, что металл переходит в один или оба смежных с ним участков. Второй параметр – rc_i указывает, увеличивается ли длина i -ого элемента профильной линии в процессе формовки за счет заимствования металла из смежных участков. При таком способе учета особенностей формообразования, задавая значения параметров dn и rc для i -ого элемента профильной линии мы задаем одинаковый закон изменения длины, как для начала, так и для конца этого элемента. Другим словами, если длина i -ого элемента профильной линии уменьшается, а длины $i + 1$ и $i - 1$ увеличиваются, то уменьшение длины i -ого элемента будет равно сумме увеличения длин смежных с ним элементов. На практике встречаются случаи, когда оба элемента профильной линии, смежных с i -ым элементом, увеличиваются в длине по мере прохождения процесса, при этом уменьшение длины i -ого элемента связано с увеличением длины только одного из смежных с ним элементов. Таким образом, для успешного практического применения, данный способ должен быть модернизирован для учета описанных выше особенностей процесса формообразования при роликовой формовке листовой заготовки. Прежде чем перейдем к описанию модернизированного способа расчета, рассмотрим, какие способы формообразования профиля существуют и как задача нахождения неизвестных размеров сводится в системе линейных алгебраических уравнений [1].

В книге [2] рассмотрены семь наиболее распространенных способов формообразования профиля из листовой заготовки. Три из них наиболее распространены при производстве профилей и четыре при производстве прямошовных сварных труб. Рассмотрим особенности формообразования профилей, на примере формовки швеллера показанного на рис. 1.

Как видно из рисунка, поперечное сечение швеллера условно состоит из пяти элементов: прямолинейных полок 1, 5, стенки 3 и двух криволинейных элементов с постоянным радиусом 2, 4. Для каждого элемента на рисунке проведена срединная или так называемая профильная линия. При проектировании калибровок размеры профиля удобно приводить

именно к этой линии, поскольку она является эквидистантной к контуру профиля и расстояние между ней и контуром равно половине толщины листовой заготовки. В дальнейшем размеры профиля будем указывать по срединной линии контура. Так же будем считать, что профильная линия является нейтральной линией деформации, это означает, что ее длина остается неизменной. Таким образом, ширина исходной заготовки будет равна сумме длин срединных линий всех элементов получаемого профиля. Такое допущение приемлемо для случаев подгибки, при которых радиус места сгиба достаточно большой по сравнению с толщиной листа в месте сгиба, а так же если в калибровке не применяется торцевое поджатие к боковым кромкам листовой заготовки.

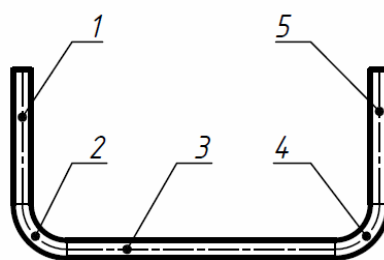


Рис. 1. Швеллер

Во время формовки швеллера в последовательно расположенных калибрах I-IV рис. 2 происходит последовательная подгибка полок, и поперечное сечение в калибрах приобретает вид, показанный на рис. 2.

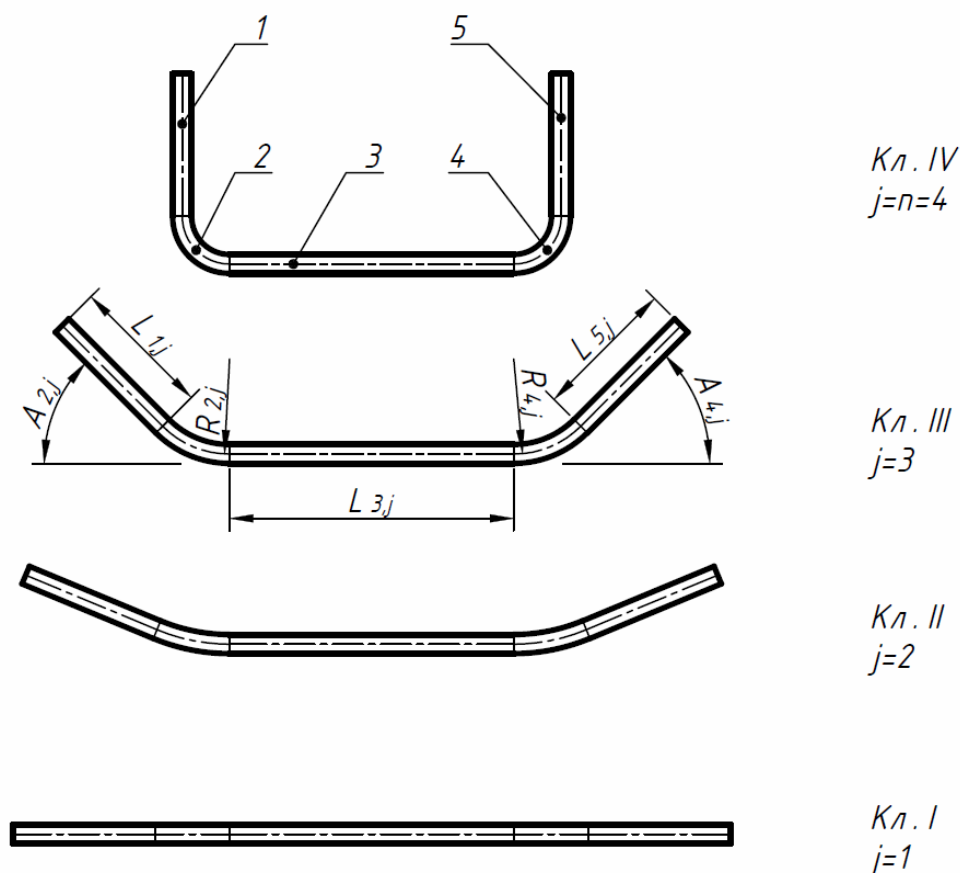


Рис. 2. Первая схема: формообразование швеллера

Подгибаемые полки и стенка профиля остаются плоскими, а формирование зоны сгиба может осуществляться тремя способами. Первый способ состоит в том, что длины средин-

ных линий всех элементов остаются постоянными, а увеличение угла подгибки в радиусной зоне достигается за счет уменьшения радиуса изгиба. При этом заданными являются конечные размеры профиля и величины углов подгибки, выбранные инженером, а неизвестными, подлежащими определению, являются величины радиусов. Определить неизвестные значения радиусов можно из выражения связывающего длину дуги с ее радиусом и углом:

$$L = RA \quad (1)$$

где L – длина дуги окружности [мм], R – радиус [мм], A – угол [рад]. Поскольку длины всех элементов профильной линии по первой схеме формообразования остаются постоянными, то система уравнений для определения длины каждого i -ого элемента профильной линии в j -ой клетки будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} L_{1,j} = L_{1,n}; \\ L_{2,j} = L_{2,n} = R_{2,n}A_{2,n}; \\ L_{3,j} = L_{3,n}; \\ L_{4,j} = L_{4,n} = R_{4,n}A_{4,n}; \\ L_{5,j} = L_{5,n}. \end{cases} \quad (2)$$

Каждый элемент, входящий в систему: длина L , радиус R , угол A имеют два индекса. Первый определяет номер элемента, как это было описано выше и может принимать значения $i = 1 \dots m$, где m – количество элементов профильной линии, для данного швеллера $m = 5$. Второй индекс определяет номер клетки и может принимать значения $j = 1 \dots n$, где n – количество клеток, в данном случае $n = 4$.

Такая система уравнений должна быть решена для каждой клетки. В этой системе первое, третье и пятое уравнения являются тождественными, и их можно было бы опустить, но поскольку в других схемах формообразования этого сделать нельзя, то эти уравнения оставлены для общности формы записи. После определения длин второго и четвертого элементов по выражению (1) можно определить искомые значения их радиусов:

$$\begin{aligned} R_{2,j} &= \frac{L_{2,j}}{A_{2,j}}; \\ R_{4,j} &= \frac{L_{4,j}}{A_{4,j}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Систему уравнений (2) удобно представить в матричном виде $Mx = b$, где M – матрица системы, x – вектор неизвестных, b – столбец свободных членов.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \\ L_{4,j} \\ L_{5,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1,n} \\ L_{2,n} \\ L_{3,n} \\ L_{4,n} \\ L_{5,n} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для первой схемы формообразования матрица системы имеет диагональный вид, элементы, находящиеся на главной диагонали, равны единице, остальные равны нулю. Вектор неиз-

вестных содержит длины элементов в j -ой клетки, и столбец свободных членов содержит длины элементов профильной линии для готового профиля.

Такие системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) легко решаются во всех прикладных математических программных продуктах, а методы их решения подробно описаны в разделе линейной алгебры, что дает возможность подобрать наиболее подходящий способ решения.

При формовке по второй схеме (рис. 3) постоянными остаются длина стенки и величина радиуса в месте изгиба, а увеличение угла подгибки достигается вовлечением в зону изгиба металла из прилегающей подгибаемой полки.

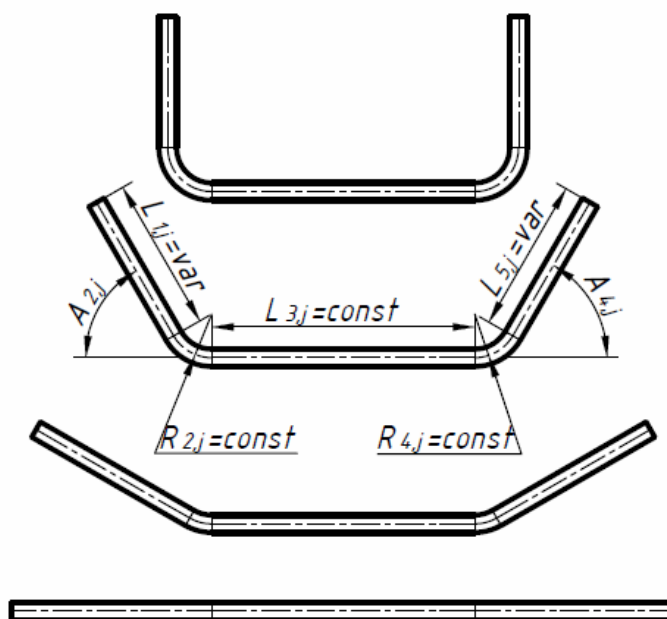


Рис. 3. Вторая схема: формообразование швеллера

При этом длина средней линии радиусного участка увеличивается от нуля, для исходной заготовки, до конечного значения соответствующего заданному профилю, а длина смежной полки уменьшается на такую же величину. При этом исходными данными, помимо размеров конечного профиля, являются значения углов подгибки, заданных инженером, и радиусы в месте изгиба, а неизвестными величинами являются длины подгибаемых полок, т.е. первого и пятого элемента профильной линии, в каждой клетки. Неизвестные величины могут быть определены из уравнения:

$$\begin{cases} L_{1,j} + L_{2,j} = L_{1,n} + L_{2,n}; \\ L_{2,j} = R_{2,j} A_{2,j}; \\ L_{3,j} = L_{3,n}; \\ L_{4,j} = R_{4,j} A_{4,j}; \\ L_{5,j} + L_{4,j} = L_{5,n} + L_{4,n}. \end{cases} \quad (5)$$

В матричной форме эта система будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \\ L_{4,j} \\ L_{5,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1,n} + L_{2,n} \\ R_{2,j}A_{2,j} \\ L_{3,n} \\ R_{4,j}A_{4,j} \\ L_{5,n} + L_{4,n} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Третья схема формообразования похожа на вторую, с тем отличием, что в ней увеличение угла подгибки достигается за счет вовлечения в радиусную зону металла из прилегающей стенки швеллера. Исходные данные такие же, как во второй схеме, а неизвестным является длина третьего элемента профильной линии – стенки швеллера. Система уравнений и ее матричное представление показано ниже.

$$\begin{cases} L_{1,j} = L_{1,n}; \\ L_{2,j} = R_{2,j}A_{2,j}; \\ L_{3,j} + L_{2,j} + L_{4,j} = L_{3,n} + L_{2,n} + L_{4,n}; \\ L_{4,j} = R_{4,j}A_{4,j}; \\ L_{5,j} = L_{5,n}. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \\ L_{4,j} \\ L_{5,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1,n} \\ R_{2,j}A_{2,j} \\ L_{3,n} + L_{2,n} + L_{4,n} \\ R_{4,j}A_{4,j} \\ L_{5,n} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Так же возможен вариант комбинирования второго и третьего способа, тогда материал в радиусную зону будет вовлекаться сразу из обоих прилегающих элементов профиля. В этом случае неизвестными будут длины первого, третьего и пятого элементов профильной линии, а система разрешающих уравнений примет вид:

$$\begin{cases} L_{1,j} + 0.5 L_{2,j} = L_{1,n} + 0.5 L_{2,n}; \\ L_{2,j} = R_{2,j}A_{2,j}; \\ 0.5 L_{2,j} + L_{3,j} + 0.5 L_{4,j} = L_{3,n} + 0.5 L_{2,n} + 0.5 L_{4,n}; \\ L_{4,j} = R_{4,j}A_{4,j}; \\ 0.5 L_{4,j} + L_{5,j} = L_{5,n} + 0.5 L_{4,n}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \\ L_{4,j} \\ L_{5,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1,n} + 0.5 L_{2,n} \\ R_{2,j}A_{2,j} \\ L_{3,n} + 0.5 L_{2,n} + 0.5 L_{4,n} \\ R_{4,j}A_{4,j} \\ L_{5,n} + 0.5 L_{4,n} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

При формовке прямошовных сварных труб распространены следующие схемы.

Формирование трубной заготовки осуществляется по так называемой двух радиусной схеме, при которой сечение заготовки состоит из трех радиусных элементов (рис. 4), т.е. $m = 3$ и, соответственно, количество уравнений будет равно 3.

Боковые элементы профиля ($i = 1$ и $i = 3$) формируются при постоянном значении радиуса и, как было описано выше, в таком случае металл по мере увеличения угла подгибки, вовлекается в радиусные зоны из прилегающего центрального элемента ($i = 2$), который в свою очередь так же является криволинейным.

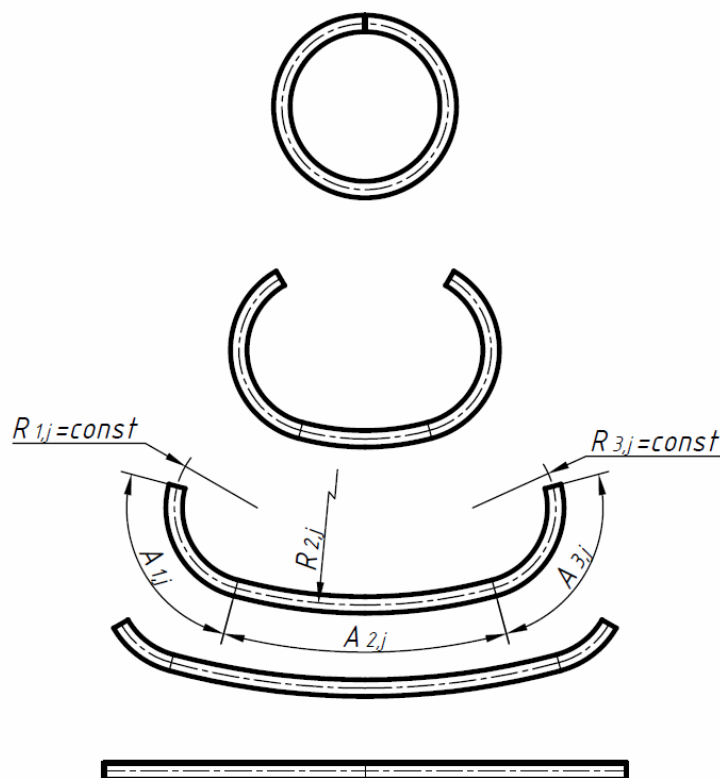


Рис. 4. Четвертая схема: формообразование трубы

По данной схеме исходными данными являются: диаметр конечной трубы и величины углов подгибки, выбранные инженером, а определению подлежит величина радиуса второго элемента, которая может быть определена из выражения (1), для которого предварительно потребуется вычислить длину этого элемента. Система уравнений для определения длин элементов и ее матричное представление показано ниже.

$$\begin{cases} L_{1,j} = R_{1,j} A_{1,j}; \\ L_{2,j} + L_{1,j} + L_{3,j} = L_{2,n} + L_{1,n} + L_{3,n}; \\ L_{3,j} = R_{3,j} A_{3,j}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1,j} A_{1,j} \\ L_{2,n} + L_{1,n} + L_{3,n} \\ R_{3,j} A_{3,j} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Пятая схема формообразования похожа на третью, только в данном случае при постоянном значении радиуса формируется центральная часть заготовки ($i = 2$), а боковые элемен-

ты являются так же криволинейными и являются своего рода донорами материала, который перетекает в центральную часть по мере увеличения угла ее подгибки. В данном случае неизвестными величинами являются радиусы боковых элементов, для определения которых потребуется вычислить длины этих элементов из системы уравнений (13) или СЛАУ (14).

$$\begin{cases} L_{1,j} = L_{2,n} + 0,5L_{2,n} - 0,5L_{2,j}; \\ L_{2,j} = R_{2,j}A_{2,j}; \\ L_{3,j} = L_{3,n} + 0,5L_{2,n} - 0,5L_{2,j}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_{1,j} \\ L_{2,j} \\ L_{3,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1,n} + 0,5L_{2,n} \\ R_{2,j}A_{2,j} \\ L_{3,n} + 0,5L_{2,n} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Шестая схема формообразования отличается от пятой только тем, что центральная часть сечения $i = 2$, остается прямолинейной в процессе формовки, по этому для нее нужно определить только значение длины по системе уравнений (11).

Согласно последней седьмой схеме, формирование трубной заготовки происходит путем равномерного изгиба поперечного сечения листа по всей его ширине, подобно тому, как происходит формирование радиусной зоны при формовке швеллера по первой схеме. Согласно данной схеме профильная линия состоит из одного элемента и полностью описывается зависимостью (1).

Как было показано выше, выбранный способ формообразования определяет матрицу системы линейных уравнений. Это квадратная диагональная матрица, в которой число строк и столбцов равно количеству элементов профильной линии. Для наиболее эффективной автоматизации процесса расчета недостающих размеров профильной линии с применением прикладного математического программного обеспечения, необходим способ автоматического построения этой матрицы для разных видов профилей. В начале этой статьи было рассказано о способе автоматизации [1] который основан на введение двух логических параметров для каждого элемента профильной линии, так же были показаны недостатки этого способа, выявленные при его применении на практике. В результате предлагается другой способ учета особенностей режима формообразования основанный на введении параметра, отражающего способ формообразования, не для элементов профильной линии, а для точек сопряжения этих элементов. Таким образом, каждый параметр будет определять взаимодействие в процессе формообразования только двух соседних элементов, которые сопрягаются в данной точке, и исключает влияние на процесс формообразования этих элементов с другими соседними, за счет чего достигается улучшение метода расчета необходимое для его применения в решении большого количества практических задач.

Количество точек k сопряжения элементов составляющих профильную линию на единицу меньше количества этих элементов, т.е. равно $m - 1$ и $k = 1 \dots (m - 1)$. Для каждой такой точки введем параметр Fk , который может принимать значения от -1 до 1. Для объяснения принципа, который связывает выбранный режим формообразования и значение параметра Fk , введем криволинейную систему координат связанную с профильной линией (рис. 5). Начало координаты s , связано с началом первого элемента профильной линии, сама координатная ось s полностью повторяет геометрию профильной линии, а значения, которые принимает введенная координата, лежат в диапазоне от 0 до b , где b – ширина исходной заготовки или сумма длин всех элементов профильной линии. Таким образом, каждая точка профильной линии будет определяться единственным значением координаты s .

При формировании радиусных зон по первой схеме, длины всех элементов профильной линии остаются постоянными и, следовательно, координаты s точек сопряжения элементов

профильной линии остаются постоянными, в этом случае параметр F для всех внутренних точек равен 0.

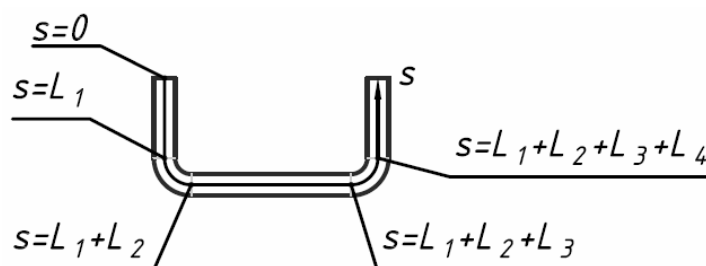


Рис. 5. Криволинейная система координат, связанная с профильной линией и координаты точек сопряжения элементов профильной линии

При формировании радиусных элементов по второй схеме, координата точки сопряжения первого и второго элемента профильной линии будет уменьшаться по мере увеличения угла подгибки, в этом случае параметр F равен -1. В симметричной части данного швеллера координата s точки сопряжения четвертого и пятого элементов профильной линии будет наоборот увеличиваться, в этом случае значение параметра F будет равно +1. Согласно третьей схеме формообразования, по мере увеличения угла подгибки координата s точки сопряжения второго и третьего элементов профильной линии будет увеличиваться, для этой точки параметр F равен +1, а точка сопряжения третьего и четвертого элементов профильной линии будет уменьшаться, для этой точки значение параметра F будет -1. Координаты точек сопряжения первого и второго, четвертого и пятого элементов в процессе формовки будут оставаться постоянными, поэтому для них значение параметра F равно 0.

При комбинировании второго и третьего способа формообразования, длины всех элементов профильной линии будут меняться в процессе формовки и, следовательно, будут меняться значения координат, точек сопряжения элементов профильной линии. При этом правило выбора знака параметра Fk остается прежним, если k -ая точка, по мере увеличения угла подгибки, будет смещаться в отрицательном направлении координаты s – знак параметра Fk будет отрицательным, в обратном случае положительным. Само значение параметра определяется долей увеличения длины радиусного участка за счет соответствующего смежного участка. В данном случае увеличение длины дуги радиусного элемента $i = 2$ будет происходить за счет одинакового уменьшения длин смежных $i = 1$ и $i = 3$ элементов, т.е. 50 % увеличения длины второго участка происходит за счет уменьшения длины первого элемента и еще 50 % за счет третьего.

Ниже приведена таблица со значениями вектора F для соответствующей схемы формовки и некоторых их комбинаций, описанных выше.

Таблица

Значения вектора F , характеризующего описанные режимы формовки

Режимы формовки					
Схема 1	Схема 2	Схема 3	Комбинация схем 2 и 3	Схемы 4,5	Схема 6
$F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$F = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$F = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$F = \begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.5 \\ -0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$	$F = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$	$F = \begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

Для шестой схемы формообразования параметр записан быть не может, т.к. по данной схеме профильная линия состоит только из одного элемента – дуги, по этому, не имеет точек сопряжения элементов линии, для которых и задается данный параметр.

Теперь, что бы сформировать матрицу системы нужно выполнить следующие действия. Задать на главной диагонали единичные значения

$$M_{i,i} = 1, \quad (15)$$

где: $i = 1 \dots m$.

Далее необходимо определить элементы, находящиеся на соседних местах

$$M_{i,i+1} = \begin{cases} -F_i, & \text{если } F_i < 0; \\ 0, & \text{если } F_i \geq 0; \end{cases} \quad (16)$$

$$M_{i+1,i} = \begin{cases} F_i, & \text{если } F_i > 0; \\ 0, & \text{если } F_i \leq 0, \end{cases} \quad (17)$$

здесь $i = 1 \dots (m-1)$.

Далее для системы линейных алгебраических уравнений необходимо получить вектор свободных членов b . Это можно сделать, выполнив два действия. Сначала нужно выполнить умножение полученной матрицы системы M на столбец длин элементов в последней клетки $L^{(n)}$:

$$b = ML^{(n)}. \quad (18)$$

Далее нужно скорректировать те значения полученного вектора b , которые отвечают приведенным ниже логическим условиям:

$$b_i = R_{i,j}A_{i,j}, \quad \text{если} \begin{cases} F_i > 0, \text{ при } i = 1 \dots (m-1); \\ F_{i-1} < 0, \text{ при } i = m; \\ F_{i-1} < 0, \text{ при } i = 2 \dots m. \end{cases} \quad (19)$$

Вектор свободных членов определяется по выражениям 18, 19 для каждой j -ой клетки, в то время как матрица M остается неизменной для всех клеток.

После этого система линейных алгебраических уравнений вида $Mx = b$ может быть решена для каждой клетки и в результате решения будут найдены неизвестные значения длин элементов профильной линии, которые необходимы для графического построения контура сечения заготовки в формирующих клетях, для последующего конструирования формирующих роликов.

Демонстрацию работы с программой, реализующей вычисления по предложенной методике, можно просмотреть по ссылке: <https://yadi.sk/i/6-M-isHvVAcS>.

Выводы

1. Предложенный в данной работе способ математического описания режима формообразования листовой заготовки при формовке в роликах, избавлен от недостатков аналогичного метода представленного ранее в работе [1].
2. Процедура вычислений по уравнениям (15), (16), (17), (18), (19) а так же решение СЛАУ может быть запрограммирована в прикладном математическом программном обеспечении, после чего для проведения расчетов для профиля, содержащего произвольное количество элементов профильной линии и произвольное количество фор-

мующих клеток, необходимо будет только ввести исходные данные и запустить выполнение программы. При этом необходимость вносить изменения в математические выражения исключается, что повышает удобство работы с программой и производительность труда.

Библиографический список

1. Расчет размеров профиля листовой заготовки в промежуточных переходах при формовке в роликах по заданным режимам / Поворов С.В. // Заготовительные производства в машиностроении 2016. №12. С. 27-32.
2. Теоретические основы процесса профилирования. Тришевский И.С., Докторов М.Е. М.: Металлургия, 1980. 288 с.

• INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH •

S.V.Povorov

Bauman Moscow State Technical University

A METHOD OF CALCULATING THE CROSS-SECTIONAL DIMENSIONS OF A SHEET BLANK IN THE INTERMEDIATE STAGES OF THE ROLLER FORMING PROCESS

Abstract. When designing passes for the production of shaped profiles from sheet blanks there is a need to draw the cross-section of the workpiece at the intermediate stages of forming. In this case, the cross-section dimensions are known for the final shape of the profile, and at the intermediate stages of forming the size values are not known, but they are determined by the method of forming, which was chosen by the engineer. Since the complexity of the geometric shape of the profile and the number of passes are often quite large, the actual question is the automation of the process of performing these calculations. One of the ways to automate the size calculation process is described in this article.

Keywords: roll forming, roll pass, system of linear algebraic equations.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Сергей Владимирович – начальник участка АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат».

Гаев Денис Викторович – заместитель начальника рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат».

Колыбанов Алексей Николаевич – студент кафедры технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский технический университет им. Г.И.Носова». Область исследования: листопрокатное производство. Тел.: +79097477759. E-mail: hitman47.hitman@yandex.ru.

Левандовский Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Область исследований: управление качеством сортопрокатных технологических систем. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Поворов Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования и технологии прокатки ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный технический университет)». Тел.: +79264332743. E-mail: avt76@yandex.ru.

Рожков Григорий Константинович – студент кафедры технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова».

Рубцов Виталий Юрьевич – мастер участка 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

Borisov Sergej Vladimirovich – supervising foreman of EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant.

Gaev Denis Viktorovich – deputy chief of rail and structural steel mill department of EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant.

Kolybanov Aleksey Nikolaevich – a student of «Technologies of Material Processing» Department at the State Educational Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov». Research themes: plate rolling. Phone: +79097477759. E-mail: hitman47.hitman@yandex.ru.

Levandovsky Sergey Anatol'evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Technologies of Material Processing» Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Research themes: quality control of section rolling technological systems. E-mail: levandovskiy@mail.ru.

Povorov Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Rolling equipment and technology» Department of Bauman Moscow State Technical University. Phone: +79264332743. E-mail: avt76@yandex.ru.

Rozhkov Grigory Konstantinovich – a student of «Technologies of Material Processing» Department at the State Educational Institution of Higher Professional Education «Magnitogorsk State Technical University named after G.I.Nosov».

Rubtsov Vitaly Yurievich – job foreman 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 – канд. 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: mikhail.rumyantsev54@bk.ru.

Филимонов Андрей Вячеславович – канд. техн. наук, главный инженер завода «Новые Промышленные Технологии» (Нижний Новгород). Область исследований: формовка полузамкнутых профилей. Тел.: +79093559242. E-mail: fwiumz@mail.ru.

Филимонов Сергей Вячеславович – докт. техн. наук, главный технолог ООО «Спецтехнология» (Ульяновск). Область исследований: моделирование и интенсификация формовки профилей с элементами жесткости. Тел.: +7422625120. E-mail: nomostaxis@list.ru.

Rumyantsev Mikhail Igorevich – Candidate 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: mikhail.rumyantsev54@bk.ru.

Filimonov Andrey Viacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer of Ltd Co «New Industrial Technologies» (city of Nizhny Novgorod). Research themes: semi-closed forming diagrams in roll-forming. Phone: +79093559242.

E-mail: fwiumz@mail.ru.

Filimonov Sergey Viacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, Chief Technologist of Ltd Co « Spetstechnology» (town of Ulyanovsk). Research themes: modeling and intensive roll-forming of profiles with rigidity elements. Phone: +7422625120.

E-mail: nomostaxis@list.ru.