

# Производство прутков из подшипниковой стали низкотемпературной прокаткой с отжигом в линии стана

При производстве продукции из подшипниковых сталей обычно требуется смягчающий сфероидизирующий отжиг, благодаря которому можно обеспечить достаточную стойкость режущего инструмента при холодной резке металлопродукции на пилах и ножницах. В данной статье описан процесс термомеханической прокатки прутков с отжигом в линии прокатного стана, в результате которого можно получить необходимые для дальнейшей обработки микроструктуру и свойства стали без какой-либо дополнительной промежуточной обработки. Такой процесс низкотемпературной прокатки находит промышленное применение на стане ABS в Италии, где отжиг в линии стана вошел в обычную производственную практику.

## Введение

Возросшая в настоящее время потребность в подшипниках требует увеличения производства проката из подшипниковой стали. При этом первым и основным требованием, предъявляемым к производителям подшипниковой стали, является ее качество, в связи с чем максимальное внимание на металлургических заводах уделяют контролю и регулированию технологических параметров на протяжении всего производственного цикла — от шихты или скрапа до готовой продукции. Усилия, предпринимаемые в этом направлении, позволяют сократить расходы, так как ведут к уменьшению потерь, связанных с качеством продукции. Следующим шагом, направленным на сокращение суммарных производственных затрат, является получение такой продукции, которая не требует дополнительной термической обработки перед началом технологического процесса изготовления деталей подшипников. Обычно для этого применяется такой вид термообработки, как смягчающий сфероидизирующий отжиг, который делает возможными операции холодной резки металлопродукции на пилах и ножницах без существенного снижения стойкости режущего инструмента и сокращения срока службы оборудования.

Начиная с 1980 г. были выполнены разнообразные исследования процессов вытяжки или холодной высадки заготовок из низколегированных сталей, полученных в ходе термомеханической прокатки. В других исследованиях, проведенных с высокоуглеродистыми и подшипниковыми сталями, рассматривали возможность прокатки в диапазоне температур, близком к критическому, когда аустенит уже начинает превращение в перлит. Такая технология прокатки не нашла широкого распространения в промышленных условиях; она требует применения специализированных прокатных станов с крупногабаритными рабочими клетями,

рассчитанными на большие усилия прокатки.

## Промышленные исследования стана компании ABS

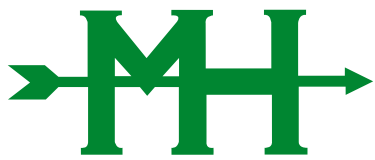
Некоторое время назад были выполнены исследования процесса термомеханической прокатки с термообработкой в линии прокатного стана. В ходе этого технологического процесса получают требуемую микроструктуру отожженной стали, делающую возможной ее дальнейшую обработку, например резку на пилах или ножницах без какой-либо промежуточной термической обработки. Все эксперименты были проведены в Италии на промышленном стане фирмы ABS (рис. 1) и в лабораториях фирмы Danieli. Такая технология используется в промышленных масштабах на заводе фирмы ABS, где отжиг в линии стана, а также закалка и отпуск являются частью обычного технологического процесса (рис. 2).

Завод ABS-Luna имеет проектную производительность 500 тыс. т/год проката из специальных сталей, рассчитанную, исходя из номинальной часовой производительности 90 т/ч. Сортамент стана включает круглые прутки диаметром 20–100 мм, квадратные со стороной 40–100 мм, а также круглую сталь диаметром 15–50 мм в бунтах нормальной массы из разнообразных марок стали для машиностроения и автомобильной промышленности. Заготовкой служат непрерывнолитые блюмы сечением 200×160 мм. Работу стана на уровне полной проектной производительности обеспечивает двухручьева МНЛЗ с высокой скоростью разлива.

Прокатный стан состоит из 17 компактных бесстанинных клетей, расположенных по непрерывной схеме с чередованием горизонтальных и вертикальных клетей. Клетки зафиксированы в устройстве для быстрой переделки, что позволяет перейти на прокатку профиля другого размера менее чем за 5 мин. Два робота обеспечива-

Франческо Тоски, ст. технолог, фирма **Danieli & C.**, Буттрио, Италия

Контакт: [www.danieli.com](http://www.danieli.com)  
E-mail: [info@danieli.com](mailto:info@danieli.com)



... 150 years!

# Разделяй и властвуй!



Мы сильны в «ноу-хау»,  
проектировании, инжиниринге  
и обслуживании наших систем.  
Обращайтесь к нам.



**DANIELI MORGÅRDSHAMMAR**

Morgårdshammar AB  
SE-777 82 SMEDJEBACKEN, Sweden

Phone: +46 240 668500

Fax: +46 240 668501

E-mail: [mh@morgardshammar.se](mailto:mh@morgardshammar.se)

[www.morgardshammar.se](http://www.morgardshammar.se)



Branch Office:

Morgårdshammar AB  
Sales office Krefeld

P.O. Box 101552

D-47715 KREFELD, Germany

Phone: +49 2151 81290

Fax: +49 2151 611795

E-mail: [office@mh-guides.de](mailto:office@mh-guides.de)

[www.mh-guides.com](http://www.mh-guides.com)





ют автоматизированную связь между прокатным станом и вальцетокарной мастерской, где находятся сменные клети, собранные и подготовленные к прокатке.

Для получения продукции с высоким качеством поверхности стан оборудован пятью устройствами для удаления окалины. Первый окалиноремонтный блок ротационного типа размещен на входе в стан. Получение готовых круглых профилей с допусками на размеры, не превышающими 1/8 DIN 1013, достигается благодаря применению пятиклетевого блока редуцирующих и калибровочных клетей Kocks-Danieli RSB (Reducing Sizing Block), а также двух измерительных узлов для автоматизированного контроля профиля и размеров проката. Перед блоком RSB размещается участок охлаждения, гарантирующий получение требуемого уровня температуры и ее равномерное распределение перед последними проходами прокатки.

### Технология низкотемпературной прокатки

Низкотемпературная прокатка (LTR — low temperature rolling) длиномерных профилей означает, что температура конца прокатки находится в диапазоне 700–820 °С. Еще важнее добиться равномерного распределения температуры по длине прокатываемого профиля, чтобы избежать неравномерности внутренней структуры из-за различной температуры конца прокатки.

Технология LTR применяется для получения проката с мелкозернистой структурой на участке заключительной термообработки в линии стана. Температура прокатки является одним из трех основных параметров процесса горячей деформации, влияющих на все стадии измельчения зерна. Регулирование процессов роста и измельчения зерен служит инструментом, с помощью которого в процессе низкотемпературной прокатки воздействуют на характер кривой изотермического превращения (позицию термокинетических диаграмм), изменяя протяженность границ зерен и, соответственно, центры кристаллизации. В частности, температура служит параметром, оказывающим влияние

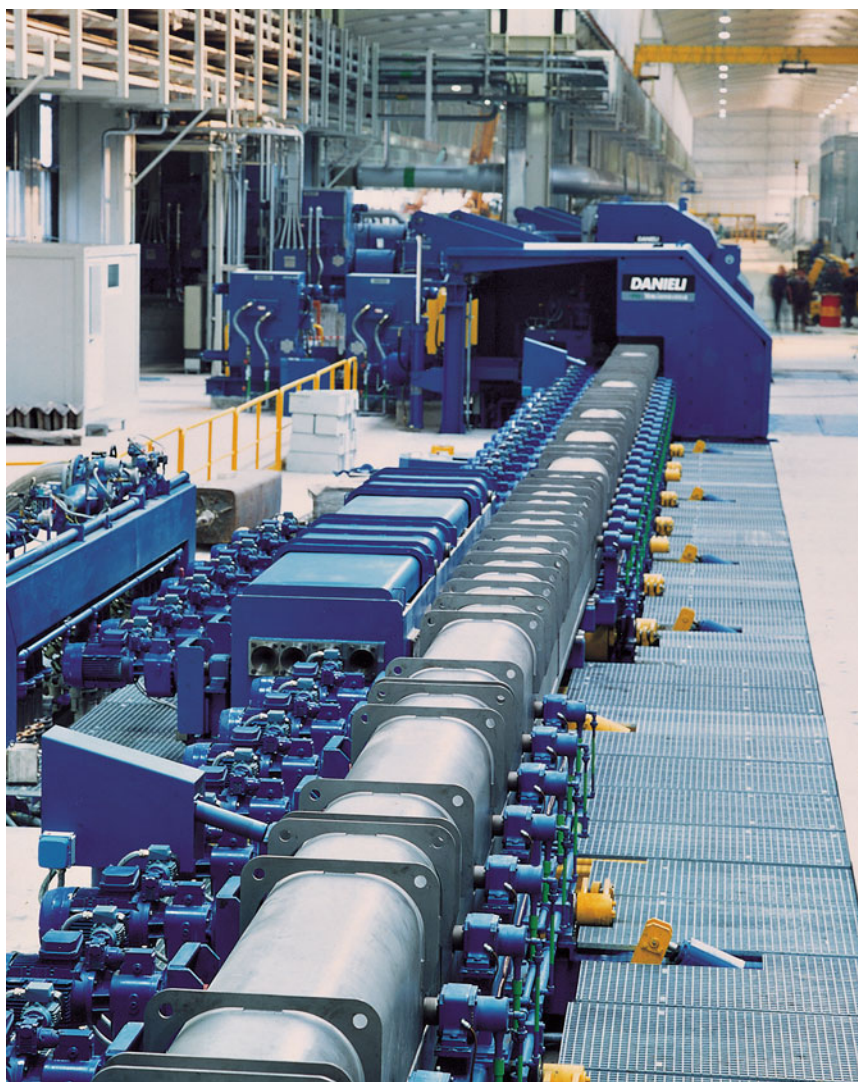


Рис. 1. Участок охлаждения проката при низкотемпературной прокатке

на термодинамический аспект всего технологического процесса LTR

Процесс измельчения зерен может быть ограничен на разных стадиях, даже если стадии его протекают одновременно. При деформации исходных зерен проявляется тенденция к повышению плотности дислокаций; при этом становится возможным формирование новых границ зерен и образование новых центров кристаллизации. Процессы разрушения границ зерен и формирования новых границ тесно связаны с текущей температурой деформации; формирование новых зерен является термодинамическим процессом, как и процесс роста зерен. На различных стадиях происходят процессы возврата, статической и динамической рекристаллизации, которые оказывают влияние на диаграмму напряжений пластического течения. Наконец, при росте зерен проявляется тенденция минимизации

энергии на границах зерен. В соответствии с описанными в литературе различными теоретическими моделями процесса при заданном химическом составе критическая температура определяет границу между условиями измельчения зерен и получением полностью рекристаллизованной микроструктуры с выросшими зернами. По мере уменьшения содержания углерода этот эффект проявляется все более явно, и легко можно добиться степени измельчения зерен более 40 % для таких марок стали, как 16MnCr.

В практических процессах очень важно поддерживать по всему поперечному сечению прокатываемого профиля температуру, близкую к заданной. В частности, такая ситуация, при которой температура одной части профиля, например его поверхности, ниже критической, а температура сердцевины выше критической, может привести к неоднородности

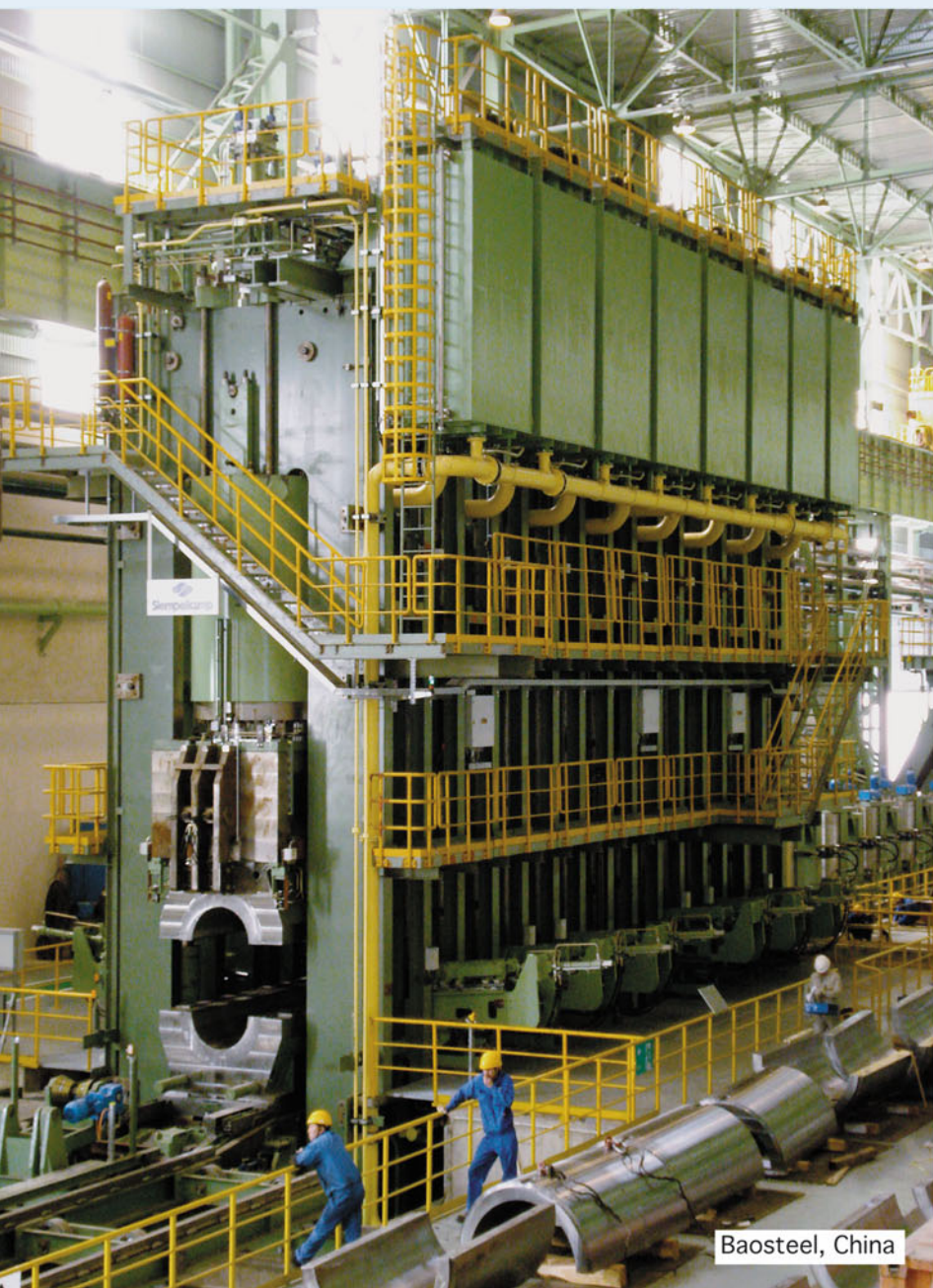




# Siempelkamp

Maschinen- und Anlagenbau

## Надежные, прочные и точные Трубоформовочные прессы фирмы Siempelkamp

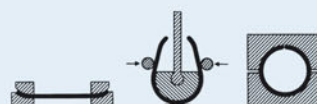


Baosteel, China

Преимущества трубоформовочных прессов фирмы Siempelkamp в первом приближении:

- Гибка — U формовка — O формовка с усилием до 720 МН
- Автоматический контроль параллельности независимо от длины трубы
- Интегрированные транспортирующие системы
- Очень высокая точность формовки
- Формовка инновационных материалов
- Технология с подтвержденным обслуживанием от изготовителя

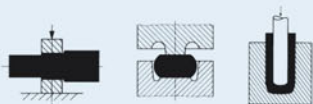
Полная программа работы трубоформовочных прессов:



[www.siempelkamp.com](http://www.siempelkamp.com)

Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau  
 Archangelsky per., dom 1  
 101990 Moscow, Russia  
 Tel.: +7 495/660 34 87  
 Fax: +7 495/660 34 79  
 E-mail: [tatjana.henske@siempelkamp.com](mailto:tatjana.henske@siempelkamp.com)

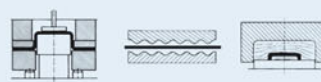
### Программа формовки металла фирмы Siempelkamp



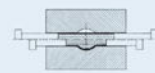
Ковка



Формовка толстого листа



Формовка листового металла



Гидроформовка

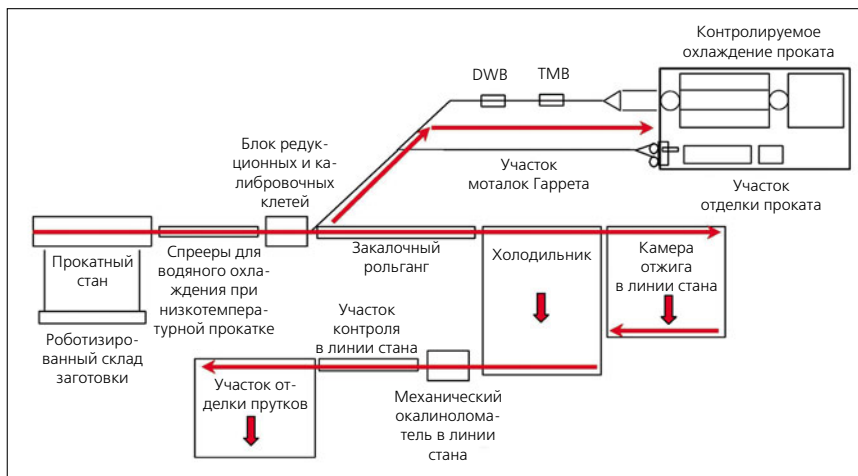


Рис. 2. Общая планировка прокатного цеха на заводе ABS-Luna

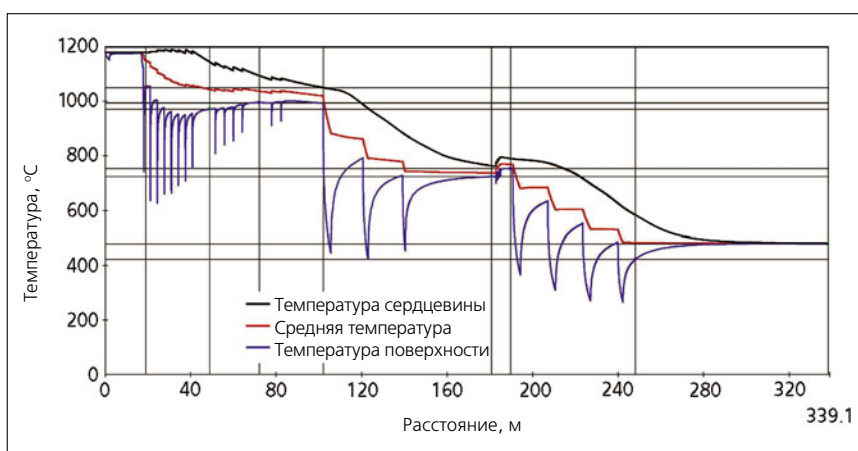


Рис. 3. Диаграмма изменения температуры в процессе прокатки круглого прутка diam. 32 мм из стали AISI 52100

окончательной структуры металла с точки зрения размеров зерен и фазового состава.

Рис. 3 иллюстрирует схему охлаждения, примененную в ходе экспериментальной прокатки профиля одного из размеров. Из диаграммы следует, что минимальная температура поверхности никогда не превышала температуру мартенситного превращения. Минимальная температура поверхности, подвергаемой водяному охлаждению, принята равной 400 °С, а перепад температур между поверхностью и сердцевиной профиля на входе в блок RSB составляет 30 °С (максимальный перепад температур 50 °С). Более интенсивное спреерное охлаждение может привести к образованию слоя с закаленной и отпущенной структурой, который повлияет на качество готового проката. Неконтролируемая разность температур между поверхностью и сердцевиной профиля обуславливает появление неравномерной зернистой микроструктуры,

вследствие которой после окончательной термообработки возможно получение нежелательных механических свойств.

### Система прямой закалки и камера отжига в линии стана

За прокатным станом располагается участок прямой закалки (DQS — Direct Quenching System) длиной 90 м, который используется как для закалки, так и для контролируемого охлаждения круглых профилей перед завершающей термообработкой, для которой установлена камера отжига в линии стана (ONA — on-line annealing chamber) или перед охлаждением проката на холодильнике обычной конструкции. Система прямой закалки имеет модульную структуру: она составлена из девяти секций длиной по 10 м каждая с шестью охлаждающими узлами, давление воды в которых имеет независимую регулировку. Для охлаждения с максимальной ско-

ростью, например при закалке коррозионностойких сталей, все секции работают с высоким давлением охлаждающей воды. При таком режиме, а также благодаря специальной конструкции сопел спреерного охлаждения можно подвергать обработке прутки диаметром до 100 мм.

Камера отжига в линии стана, расположенная за стеллажом холодильника, состоит из печи с газовым нагревом, через которую прутки перемещаются для завершения термообработки, начатой в линии стана (замедленное охлаждение, смягчающий отжиг, сфероидизирующий отжиг, отпуск). Оптимизация работы горелок и использование вентиляторов для достижения заданной температуры и ее равномерного распределения по внутрипечному пространству обеспечивает полное исключение обезуглероживания и позволяет получить однородные свойства по длине прутка и во всех прутках прокатываемой партии.

После резки на мерные длины, инспекции в линии стана и обработки следует важный завершающий этап непрерывного технологического процесса. В линии отделки прутков установлена машина дробеструйной очистки, четыре отрезных станка с абразивными дисками, установка неразрушающего контроля, машина для зачистки заусенцев, пакетирующая машина, машина для обвязки пакетов, склад пакетов готовой продукции.

Перемещение прутков через камеру отжига в линии стана производится посредством системы шагающих балок. Шагающие балки изготовлены из специальных суперсплавов. Они не оборудованы системой водяного охлаждения, что позволяет избежать холодных отпечатков на поверхности проката. Предусмотрен специальный механизм для вращения прутков в процессе их обработки.

Рациональное расположение горелок и использование специальных мощных вентиляторов обеспечивает довольно равномерное распределение температуры в камере отжига. Это приводит к высокой гомогенности окончательной структуры металла и позволяет получать требуемые механические свойства проката. Тепловая мощность горелок в каждой зоне камеры регулируется в зависимости от показаний термопар, включенных в



# 100 лет



## Бесшовные сварные Фланцы, кольца и бурты

из стали, специальной стали и цветных металлов с актом приёмочного испытания, изготовленные по признанной и контролируемой Объединением технадзора (TÜV) технологии производства фирмой Flanschenfabrik Hüttental, Германия





Бесшовные сварные фланцы и кольца фирмы FFH, применяемые в изготовлении автомобилей и рельсовых транспортных средств, ветросиловых установок, строительных машин и трубопроводов для транспортировки воды и газа, наряду с другими компонентами отвечают за надежность и безопасность эксплуатации данного оборудования. Требуемые стандарты безопасности гарантируются соответствующими актами приемочных испытаний.



**Flanschenfabrik Hüttental GmbH**

Einheitsstraße 12 • D-57076 Siegen

Tel. +49 (0) 2 71 / 7 60 35 • Fax +49 (0) 2 71 / 7 67 56 • [www.ffh-flansche.com](http://www.ffh-flansche.com) • [huetttentaler@t-online.de](mailto:huetttentaler@t-online.de)

с 1909





# ПЕЧИ CAN-ENG

Испытанная технология производства труб и прутков



**Закалка с последующим отпуском**  
**Непрерывный отжиг труб**  
**Непрерывный нормализационный отжиг труб**  
**Термообработка партии**

Системы Can-Eng снижают затраты труда и себестоимость, а также улучшают сроки поставок и качество. Чтобы получить дополнительную информацию о технических параметрах, конструкции и производственных возможностях компании Can-Eng Furnaces, зайдите на веб-сайт [www.can-eng.com](http://www.can-eng.com) или свяжитесь с Майком Клауком по эл. почте: [mklauck@can-eng.com](mailto:mklauck@can-eng.com)

**МЫ СЛУШАЕМ. МЫ ПОНИМАЕМ.**  
**МЫ ПРИМЕНЯЕМ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ.**  
**МЫ СТРОИМ.**



**ПОСЕТИТЕ СТЕНД 7-6 В09 КОМПАНИИ CAN-ENG FURNACES В ВЫСТАВОЧНОМ ЗАЛЕ METALLURGY LITMASH HALL 7 В ПЕРИОД С 12 ПО 15 МАЯ 2009 Г.**



P.O. Box 235, Niagara Falls, New York 14302-0235 | [www.can-eng.com](http://www.can-eng.com) | Тел.: +1 289.292.2086 | Факс: +1 905.356.1817

## PROFILEMASTER® – Системы Измерения Профилей

Более 50 лет опыта работы и свыше 230 измерительных систем для станов горячей прокатки предприятий черной металлургии – от пионерных систем измерения, встроенных в технологические линии, и современных технологий на базе лазерной триангуляции и полупроводниковой зарядовой камеры (ПЗС-камеры) до высокоточных и экономичных систем измерения профилей.

**Любой профиль – Любое сечение**  
**До 1200 °C**

Получите полный контроль над процессом и высокую производительность

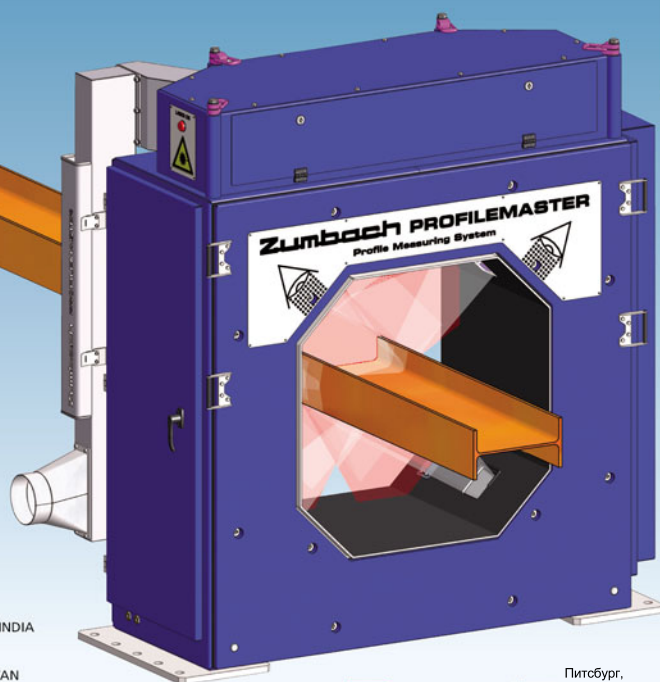
- Стандартное поле измерения = 300 мм, возможно его расширение по специальному запросу
- Изображение сечения изделия и соответствующих размеров в режиме реального времени
- Короткий срок окупаемости благодаря быстрой настройке стана и снижению отходов в скрап
- Архивирование и анализ статистических и фактических данных
- Абсолютно стабильное считывание результатов, отсутствие необходимости в повторной калибровке
- Легко осуществляемое и минимальное по объему техническое обслуживание за счет многоступенчатой системы защиты
- Специальные версии для холодных процессов и линий контроля качества

[www.zumbach.com](http://www.zumbach.com)

Глобальная клиентская служба и офисы продаж:

Zumbach Electronic AG – SWITZERLAND (H.Q.)  
Zumbach Electrónica Argentina S.R.L. – ARGENTINA  
Zumbach Electronic S.A. – BELGIUM  
Zumbach do Brasil Ltda – BRAZIL  
Zumbach Electronic Co., Ltd. – CHINA P.R.  
Zumbach Bureau France – FRANCE  
Zumbach Electronic GmbH – GERMANY

Zumbach Electronic India Pvt. Ltd. – INDIA  
Zumbach Electronic Srl – ITALY  
Zumbach Electrónica S.L. – SPAIN  
Zumbach Electronics Far East – TAIWAN  
Zumbach Electronics Ltd. – UK  
Zumbach Electronics Corp. – USA  
И еще более 40 агентств



Посетите наш стенд: Москва, Россия, 12-15 мая 2009 г.

Питсбург, Пенсильвания, США, 4-6 мая 2009 г., стенд № 1211

PROFILMETER



систему регулирования с обратной связью. Основные характеристики камеры приведены в **табл. 1**.

Ширина, м	11
Длина, м	54
Длина прутков (макс.), м	48
Число отверстий для горелок	80
Диаметр прутков, мм	20–100
Температура, °С	400–850
Время выдержки, мин	40

**Таблица 1. Конструктивные и технологические характеристики камеры отжига в линии стана**

Так как камера отжига в линии стана имеет модульную конструкцию с длиной базового модуля 25 м, то можно сооружать такие камеры длиной 25, 50 и 75 м, достигая производительности при непрерывном отжиге 120 т/ч при изотермическом отжиге хромистых и хромомолибденовых марок стали. Камера отжига в линии стана ABS-Luna имеет общую длину 50 м и производительность 90 т/ч, что соответствует номинальной производительности прокатного стана. Контроль температуры внутрипечной атмосферы осуществляется в девяти зонах по длине печи и двух поперечных зонах. Все девять зон оборудованы сдвоенными горелками и нагнетающими вентиляторами. Система подачи воздуха позволяет подавать его в двух противоположных направлениях: можно подавать горячий воздух или ко входу в камеру, или же повышать температуру прутков с его помощью в середине камеры. В результате удастся получать необходимый градиент температуры для каждого конкретного режима термообработки.

## Результаты промышленного опробования процесса термомеханической обработки

Целью исследования было получение микроструктуры, пригодной для проведения последующих операций деформирования. Для высокоуглеродистых хромистых марок стали характерна высокая твердость горячекатаных профилей (превышающая 320 НВ), что затрудняет последующие операции, например холодную резку на ножницах или пилах. Принимая во внимание, что прочность перлитной

структуры зависит главным образом от расстояния между пластинчатыми структурами феррита и карбидов, следует признать, что единственной возможностью снижения твердости прутков в состоянии после прокатки является увеличение расстояния между элементами пластинчатой структуры.

Эту задачу можно решить двумя способами. Можно увеличивать зарождение центров кристаллизации, измельчая аустенитную структуру, в результате чего фазовое превращение начнется при более высокой температуре и произойдет за более короткое время. Можно также уменьшать скорость охлаждения путем выдержки металла при более высокой температуре; при этом создается возможность увеличения расстояния между сегментами пластинчатой структуры. Применение одного или обоих способов позволяет снизить твердость и улучшить исходные условия для последующей холодной резки на ножницах или пилах. К сожалению, требования к глубине закаленного слоя на готовой продукции в значительной степени зависят от предшествовавшей микроструктуры. В связи с этим возникает необходимость в разработке технологии, которая позволила бы снизить твердость, но не влияла бы на окончательные свойства продукции.

Исследования проводили при прокатке стали AISI 52100, одной из наиболее распространенных марок подшипниковых сталей. Эту сталь, содержащую 1 % углерода и 1,5 % хрома, обычно поставляют в состоянии после сфероидизирующего или смягчающего отжига. Структура, полученная после сфероидизирующего отжига, оптимально подходит для операций сверления и механической обработки. Полностью ферритная структура с включениями сфероидизированного графита является наиболее пластичной структурой для такой группы сталей. Подобная структура гарантирует получение необходимой твердости и усталостной прочности после заключительной заковки деталей подшипников.

Высокая пластичность обусловлена наличием в микроструктуре ферритной матрицы и дисперсных карбидов. Рекомендуемая твердость после такой термообработки составляет 200 НВ. При поставке проката в состоянии после смягчающего отжига с

твердостью выше 200 НВ невозможна резка на ножницах без растрескивания и без снижения стойкости режущего инструмента. Процесс сфероидизирующего отжига является длительным и более дорогостоящим, что объясняется рядом причин, например следующими:

- длительным суммарным временем цикла;
- значительными потерями времени, связанными с транспортированием проката;
- потерями металла при окалинообразовании;
- обезуглероживанием поверхностного слоя;
- необходимостью правки металла после отжига.

Длительность типичного цикла составляет более 22 ч, считая время от загрузки печи до ее разгрузки.

Лабораторные исследования, выполненные многими исследователями, показали, что сформированный в изотермических условиях непреработанный перлит или бейнит приводит к более быстрой и равномерной сфероидизации карбидов в процессе отжига. Хорошо известно, что в процессе отжига определяющими являются два параметра: скорость диффузии и ее траектория. Для сокращения продолжительности отжига желательнее создать структуру, уменьшающую траектории диффузии и тем самым повышающую склонность карбидов к сфероидизации. Такие структуры являются наиболее мелкозернистыми среди структур, которые могут быть получены при быстром охлаждении или при изотермическом низкотемпературном превращении. Исходя из диаграммы изотермического превращения для стали AISI 52100, можно отметить, что в температурном интервале 450–500 °С может быть получена более тонкая структура верхнего бейнита, в которой формируются мелкие включения сфероидизированного графита.

## Исследования и их результаты

Основной целью производственных экспериментов было завершение технологического процесса прокатки, включая охлаждение и отжиг, без промежуточного складирования материала. Это позволяет снизить расходы на



# КЕВО

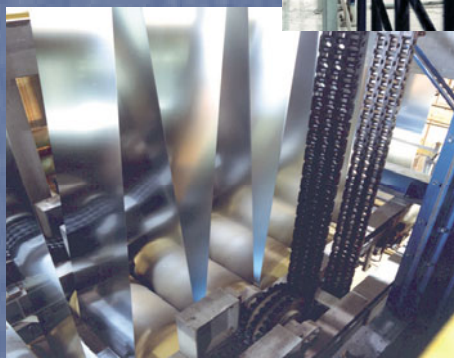
## Ваш партнер в стальной промышленности

Специальные средства  
для обработки  
металлических  
поверхностей



Коррозионные  
ингибиторы для  
соляной и  
серной кислоты

### ADACID



Средства для  
пассивирования  
и нейтрализации

### KEVOCOR NEUTRACID



Средства для  
обезжиривания

### KEBOSOL KEBOCLEAN

# КЭВО

Keller & Bohacek GmbH & Co. KG  
Postfach 33 02 60

D-40435 Düsseldorf (Германия)

Тел.: +49(0)211/9653-0 или -118

Факс: +49(0)211/65 52 02

E-mail: [info@kebo.de](mailto:info@kebo.de)

Интернет: <http://www.kebo.de>

Мы говорим по-русски



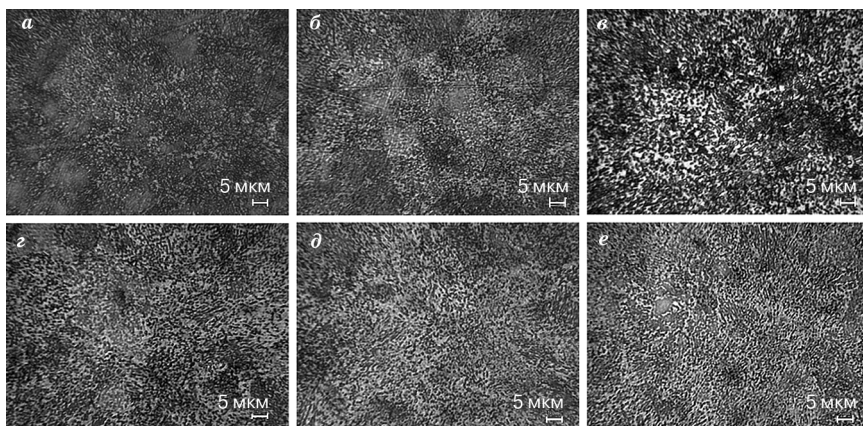


Рис. 4. Микроструктура готового проката

№ образца	Температура на входе в блок RSB, °С	Температура на холодильнике, °С	Твердость, HRC	Размер зерна (по ASTM)
1	960	900	38	8
2	820	750	38	8
3	750	720	40	9
4	820	670	44	8

Таблица 2. Температура прокатки и твердость готового проката, полученные в ходе экспериментов

термообработку и сократить путь металла от печи до заказчиков.

Как показано на рис. 2, в технологическом процессе можно выделить следующие основные стадии:

- нагрев до 1180 °С с целью растворения всех карбидов;
- понижение температуры до 720 °С на входе в блок редуционно-калибровочных клетей, способствующее получению более тонкой аустенитной структуры перед началом завершающей стадии фазового превращения;
- охлаждение прутков с максимальной возможной скоростью после завершения прокатки, чтобы избежать наличия остаточного аустенита и мартенсита на поверхности профиля в интервале температур 450–500 °С;
- подача проката в камеру отжига, встроенную в линию стана, для завершения фазового превращения в изотермических условиях;
- выдержка проката в камере для отжига, встроенной в линию стана, для завершения процесса сфероидизирующего отжига при оптимизированной температуре.

В первых экспериментах непрерывнолитые блюмы из стали марки AISI 52100 с размерами поперечного сечения 200×160 мм, охлажденные до комнатной температуры, загружали в холодном состоянии в печь с шагающими балками. Затем эти блюмы

прокатывали при различных температурных условиях, чтобы оценить влияние температуры конца прокатки на размер зерна перед фазовым превращением и после превращения перлита.

Условия прокатки обобщены и представлены в табл. 2. Из этих данных и результатов исследования микроструктуры следует, что различие в размерах зерна становится заметным только тогда, когда температура конца прокатки становится ниже 720 °С. В этих случаях зернистая микроструктура становится заметно более тонкой. Что касается твердости, то металл, прокатанный при пониженной температуре и с воздушным охлаждением на холодильнике, имеет более высокую твердость, вероятно, благодаря более тонкой перлитной структуре. Учитывая, что заданная температура на входе в камеру отжига, встроенную в линию стана, составляет 450–500 °С, а более тонкая зернистая микроструктура способствует получению тонкой бейнитной структуры, такая температура была принята в качестве нормативной для конца прокатки в блоке RSB.

Для образцов № 4 был проведен дополнительный эксперимент, в ходе которого металл при промежуточной температуре конца прокатки в блоке RSB подвергали быстрому охлажде-

нию в системе прямой закалки перед подачей на холодильник. Такой вариант позволял получить более тонкую микроструктуру и более высокие показатели твердости.

## Моделирование микроструктурного превращения

Перед началом проведения экспериментов было необходимо располагать информацией о влиянии основных параметров на ход процесса прокатки (температура прокатки и степень деформации). Компьютерное моделирование процесса прокатки позволило установить долю рекристаллизованных фракций и величину остаточных напряжений после обжата в каждой прокатной клетке.

Установив требуемую температуру прокатки, можно оптимизировать начальную температуру сфероидизирующего отжига и длительность термообработки. Расчеты позволяют определить конец фазового превращения и начало процесса сфероидизирующего отжига. Если температура на входе в камеру отжига в линии стана находится в пределах 450–500 °С, то бейнитное превращение завершается в течение 6–10 мин. В это время температура проката повышается и становится равной температуре в камере отжига. В этом процессе вентиляторы, обеспечивающие конвекцию печной атмосферы, направлены против часовой стрелки, в результате чего температура на входе в камеру отжига оказывается на 50 °С ниже заданной температуры отжига.

В ходе экспериментов было довольно трудно определить, состоит ли структура, сформировавшаяся перед началом отжига, из бейнита или из мелкозернистого перлита. Единственным путем решения этой задачи был анализ окончательной структуры и попытка выявить остаточные пластинчатые карбиды, свидетельствующие о предшествовавшей грубой перлитной структуре. Однако такая методика не может считаться рекомендуемой, так как уровень температуры на входе в камеру отжига настолько низкий, что может привести в худшем случае к образованию структуры неразложившегося перлита.





Мощь промышленности  
базируется на инновациях

Ingeteam находит  
инновационные решения

Ingeteam прислушивается к нуждам заказчиков и всего общества, ищет наиболее эффективные решения в области технологических инноваций.

[www.ingeteam.com](http://www.ingeteam.com)

В промышленных отраслях мы активно занимаемся машиностроением, проектированием электротехнических устройств и автоматизацией, предлагая индивидуальные решения и разработки для конкретных нужд каждого предприятия.

Наш инженерно-технический опыт находит применение в исследованиях, разработках, производстве и сбыте продукции и услуг в тех областях, где выполняется крупномасштабный обмен энергией, таких как энергетика, металлургическая промышленность, морской сектор и сектор железнодорожного тягового транспорта.

Энергетика - **Промышленность** - Морской сектор - Тяговый транспорт - Базовые технологии - Услуги

**Ingeteam**

## Результаты экспериментов

В ходе экспериментов были испытаны различные режимы термообработки. Основной целью было получение приемлемой сфероидизированной структуры с твердостью менее 200 НВ и равномерно распределенными карбидами без остаточной ламинарной составляющей структуры в форме пластинчатых карбидов. Круглую сталь диаметром 32 мм прокатывали со скоростью 4,2 м/с, температура на входе в блок RSB равнялась 720 °С. Прокатку вели с суммарным коэффициентом вытяжки 1,62, средняя скорость деформации в блоке RSB составляла 25 с<sup>-1</sup>. Параметры процесса отжига в линии стана приведены в **табл. 3**.

№ эксперимента	Заданная температура в камере отжига, °С	Равновесное время, с	Время выдержки, мин	Температура в камере отжига в линии стана, °С		Окончательная твердость, НВ	Степень сфероидизации, %
				Вход	Выход		
1	780	680	240	680	400	250	>60
2	780	800	240	570	400	230	>70
3	740	800	360	570	400	200	>90
4	740	880	120	500	400	230	>80
5	740	880	240	500	400	210	>80
6	720	940	120	450	400	210	>80
7	720	940	60	450	400	220	>80

**Таблица 3.** Параметры термообработки и полученные свойства образцов

Было проанализировано влияние степени и скорости деформации на формирование микроструктуры. Для всего сортамента легированных марок стали можно определить температурный интервал и суммарную деформацию в чистовых клетях, гарантирующие значительное измельчение зерен гамма-фазы. Применительно к углеродистым сталям, С—Mn-сталям и С—Cr-сталям оптимальным является температурный интервал 720–800 °С, причем температура в этом интервале тем выше, чем меньше содержание углерода.

Необходима степень деформации площади поперечного сечения не менее 25 %. Разумеется, скорость деформации влияет как на процесс рекристаллизации, так и на повышение температуры. При более высоких ско-

ростях прокатки и соответственно более высоких скоростях деформации степень деформации ограничена максимальным числом проходов при прокатке.

Что касается рекомендаций по выбору заданной температуры камеры отжига в линии стана, то были учтены различные соображения. Очевидно, что основной целью является сокращение до минимума времени обработки, необходимого для получения требуемой микроструктуры. Для подшипниковых хромистых сталей повышение температуры отжига не всегда гарантирует сокращение продолжительности термообработки, так как может сформироваться более грубая структура карбидов, а в микроструктуре готового проката может наблю-

даться неравномерное распределение карбидов. Важно, чтобы на начальной стадии процесса отжига имелось много участков зарождения центров кристаллизации, и карбиды имели возможность формироваться на небольших, но многочисленных участках.

Микрофотографии на **рис. 4** наглядно иллюстрируют тот факт, что лучшая структура получается на образцах, загруженных в камеру отжига, встроенную в линию стана, в промежуточном интервале температур, и что заданная температура камеры отжига не оказывает значительного влияния на время выдержки в исследованном диапазоне. В эксперименте № 4 были получены наилучшие результаты, в то время как результаты эксперимента № 7, проведенного при более низкой температуре и мини-

мальном времени выдержки, явно свидетельствуют о том, что снижение температуры термообработки ведет к образованию более тонкой микроструктуры, которая легче поддается сфероидизации.

Во всех экспериментах твердость образцов в состоянии после прокатки составляла 40–42 HRC. Твердость готовой продукции, полученной в разных экспериментах (измеренная по шкале НВ), не изменяется в каких-то значительных пределах; это можно объяснить тем, что степень сфероидизации почти всех исследованных образцов превышала 80 % (кроме некоторых случаев, когда преобразованная структура была недостаточно измельчена). В **табл. 3** просуммированы показатели твердости образцов, полученных по различным режимам термообработки.

## Выводы

Разработаны технологические параметры для проведения сфероидизирующего отжига при прокатке стали марки AISI 52100 непосредственно в линии прокатного стана. Оптимизированы температура окончания прокатки, температура начала изотермического превращения, температура и продолжительность отжига. Критериями оптимизации являются получение микроструктуры со степенью сфероидизации более 80 % и твердостью готового проката менее 220 НВ. Промышленное использование участка отжига, встроенного в линию стана, для проведения изотермического отжига и отпуска позволило провести весь цикл термообработки за 2 ч и получить удовлетворительные результаты с точки зрения твердости и распределения карбидов.

Установка камеры отжига, встроенной в линию стана и выступающей в роли отжигательной печи, вошла в повседневную практику при прокатке всех марок стали, требующих изотермического отжига и отпуска. Эта технология может быть использована в тех случаях, когда одной из основных задач является повышение производительности. ■