

Эффективные решения при производстве полосы из электротехнической стали с ориентированным зерном

Перспективы рынка высококачественной полосы из электротехнической стали с ориентированным зерном оценивают как очень благоприятные. В комплексной технологии производства такой полосы реализуются сложные концепции обработки. Отдельные стадии технологического процесса требуют применения специальных линий для обработки полосы, чтобы получить требуемую текстуру металла и необходимые магнитные свойства готовой продукции. В данной статье рассмотрены технологические линии для производства и обработки такой полосы, сооруженные за последние несколько лет и удовлетворяющие указанные требования.

Введение

Рынок высококачественной электротехнической полосы непрерывно расширяется при высоком уровне цен. Процесс производства такой полосы очень сложен и требует использования нескольких, последовательно расположенных технологических линий. В зависимости от выбранной технологической схемы основными операциями являются отжиг и удаление окалина с поверхности горячекатаной полосы, холодная прокатка, первичная рекристаллизация с обезуглероживанием, вторичная рекристаллизация для получения окончательной ориентированной микроструктуры, очистка готового проката. Обычно технологический процесс завершается нанесением покрытия и термическим выравниванием свойств. На каждой операции должны быть выполнены особые требования, определяемые условиями получения готовой продукции с необходимой микроструктурой и магнитными свойствами.

За последние годы компания SMS Siemag построила несколько современных линий для обработки полосы из электротехнической стали с ориентированным зерном. Используемое в этих линиях механическое оборудование было специально приспособлено для удовлетворения специфических требований технологии производства электротехнических сталей, например, требований к хрупкости материала или к образованию шлама из окислов кремния в процессе травления, обусловленное высоким содержанием кремния в стали. Благодаря накопленному многолетнему опыту и тесным контактам с производителями электротехнической полосы компания SMS Siemag разработала совершенные технологические решения этих сложных задач. В этом плане можно отметить, что компания SMS Siemag на протяжении многих лет использовала новейшие «ноу-хау» в области производства всех марок электротехнической стали, включая новейшие технологии, благодаря кооперации с фирмой Dufenco.

Энергоэффективность использования электротехнической полосовой стали

Благодаря своим электрическим и магнитным свойствам полоса из электротехнической стали (иногда называемой также кремнистой сталью) широко используется в электромашиностроении, прежде всего для изготовления сердечников электрических машин. Требуемые свойства достигаются благодаря высокой степени чистоты стали и содержания легирующих элементов строго в заданных пределах (главным образом кремния и антикоррозионных присадок), а также в результате применения специальных технологических операций в ходе производственного процесса. Легирование кремнием повышает электрическое сопротивление стали, тем самым уменьшая индуцированные вихревые токи и потери в сердечнике. Использование электротехнической стали в электрических машинах способствует повышению энергетической эффективности и, как следствие, — экономии энергетических ресурсов.

Электротехническая сталь подразделяется на две группы: с неориентированным зерном (non-grain-oriented, NGO) и с ориентированным зерном (grain-oriented, GO). В электротехнической стальной полосе с неориентированным зерном текстура зерен феррита носит случайный характер, вследствие чего материал имеет преимущественно изотропные механические и магнитные свойства во всех направлениях. Поэтому полосы из электротехнической стали с неориентированным зерном используются главным образом во вращающихся деталях электрических машин, электродвигателей и генераторов с переменным направлением магнитного поля.

В полосе из электротехнической стали с ориентированным зерном кристаллы ориентированы вдоль направления холодной прокатки, в результате чего получается так называемая текстура Госса. Однородная ориентировка зерен создает в полосе из электротехнической стали предпочтительное направление,

Ханс-Георг Хартунг, Михаэль Хентжес, Вольфганг Пютген, Цесар Сассе, фирма **SMS Siemag AG**, Хильден, Германия; Марчелло Кандиотти, Джанкарло Ди Шино, фирма **Dufenco SA**, Терни, Италия

Контакт: www.sms-siemag.com
E-mail: strip.processing@sms-siemag.com

в котором намагничивание происходит легче. Благодаря высокой магнитной проницаемости и низким потерям в этом предпочтительном направлении (параллельном оси холодной прокатки) полоса из электротехнической стали с ориентированным зерном находит применение преимущественно в статических электрических машинах, например в трансформаторах.

Для получения таких специфических свойств необходимо в ходе технологического процесса контролировать особый характер роста зерен. После окончательного отжига в прокатанной стальной полосе зерна ориентированы вдоль оси прокатки с минимальными отклонениями. Электротехническая стальная полоса с ориентированным зерном по степени ориентировки зерен подразделяется на обычную и с высокой проницаемостью (табл. 1). В обычной электротехнической полосовой стали с ориентированным зерном (GO) максимальное отклонение от направления совершенной ориентированной структуры составляет 5–7 град, а в стали с высокой проницаемостью максимальное допустимое отклонение не более 3 град.

Растущая потребность в полосовой электротехнической стали с ориентированным зерном

Растущая потребность в полосе из электротехнической стали с ориентированным зерном GO связана в основном с ростом потребления электроэнергии. Повышение потребления электроэнергии, которую необходимо вырабатывать и транспортировать с максимальной возможной эффективностью, обуславливает растущий спрос на силовые и распределительные трансформаторы. Трансформаторы таких типов требуются, например, для расширения электрических сетей в Европе, США, Китае, Индии, России и других странах.

Для эффективных с точки зрения потребляемой энергии трансформаторов необходима электротехническая полосовая сталь с ориентированным зерном GO с весьма низкими потерями на перемагничивание. Для таких трансформаторов электротехническая сталь GO служит подходящим материалом благодаря ее экономичным энергетическим характеристикам.

Полосовая электротехническая сталь NGO (Si+Al обычно 1–3,5 %)	Полосовая электротехническая сталь GO (Si+Al обычно 3–3,5 %)
Полупродукт (NGO-SP)	Традиционная (CGO) или стандартная (RGO)
Готовая полоса (NGO-FP)	С высокой проницаемостью (Hi-B или HGO)

Таблица 1. Классификация полос из электротехнических сталей с неориентированным (NGO) и ориентированным (GO) зерном

Еще одна причина растущего спроса на подобные материалы связана с новыми, более мощными электрическими сетями, которые должны компенсировать оказывающие резкие сетевые колебания, вызываемые возрастающей выработкой циклической и рекуперативной электроэнергии ветровыми установками и фотоэлементами.

Рынок электротехнической стали GO определяется несколькими основными поставщиками. Барьеры для входа на этот рынок достаточно высоки из-за сложной технологии производства подобной продукции, поэтому в условиях непрерывно растущего спроса и с учетом структуры рынка на нее устанавливаются очень высокие цены. В то же время рынок электротехнической полосовой стали GO менее изменчив, чем рынок обычной стали, так как он в большей степени зависит от потребления и потенциальной экономии электроэнергии, и в меньшей степени — от цен на сталь, подверженных сильным колебаниям во время экономических циклов. Кроме того, не существует никаких недорогих материалов, которые могли бы заменить электротехническую полосовую сталь.

Цена электротехнической полосовой стали GO определяется ростом цен

на энергию и возрастающим энергопотреблением. В прошлом потребность в электротехнической стали возрастала параллельно росту потребления электроэнергии. Эксперты из Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) предсказывают, что мировое потребление электрической энергии к 2030 г. удвоится по сравнению с 2007 г. Как минимум, в такой же пропорции должна увеличиться и потребность в электротехнической полосовой стали GO (рис. 1). В 2007 г. общий объем продаж на рынке составил чуть меньше 2 млн. т и после этого продолжал расти. В то же время производственные мощности расширились значительно медленнее.

Различные варианты технологии

Существуют различные варианты технологии производства электротехнической полосовой стали GO. В зависимости от используемого варианта необходимо корректировать химический состав стали, соответственно регулировать параметры разлива и прокатки для получения заданных свойств.



Рис. 1. Мировое потребление электроэнергии и потребность в электротехнической полосовой стали GO (Источник: SMS Siemag и IEA)

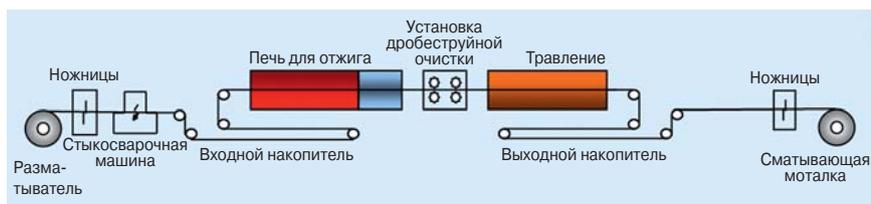


Рис. 2. Схема линии отжига и травления полосы из электротехнической стали с ориентированным зерном

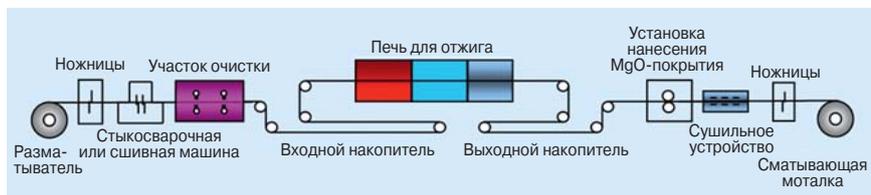


Рис. 3. Схема линии обезуглероживания и нанесения покрытий на полосу из электротехнической стали с ориентированным зерном

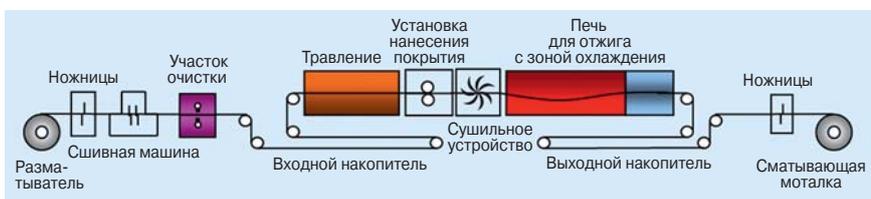


Рис. 4. Схема линии выравнивания свойств и нанесения покрытий на полосу из электротехнической стали с ориентированным зерном

Ингибиторы оказывают очень сильное влияние на рост зерен. В роли ингибиторов обычно выступают добавки нитрида алюминия (AlN) или сульфида марганца (MnS). Они предназначены для предотвращения роста зерен на стадии первичной рекристаллизации. Получаемая структура играет важную роль для гарантии того, что при вторичной

рекристаллизации будет получена заданная текстура (ориентировка зерен), от которой в значительной степени зависят физические свойства полосы, и в первую очередь — магнитные свойства.

Различные технологии характеризуются использованием ингибиторов в каждом конкретном варианте, а также температурой нагрева слэбов. После

непрерывной разливки слэбы необходимо нагреть до определенной температуры для растворения крупных сульфидов и нитридов.

По традиционной технологии производства обычной электротехнической полосовой стали GO в качестве ингибитора используют MnS, а слэбы подогревают до температуры около 1400 °С, при которой возможно формирование жидкого шлака. Традиционная технология производства электротехнической полосовой стали GO с высокой магнитной проницаемостью также предусматривает повторный нагрев слэбов до температуры примерно 1400 °С. В этом случае в качестве ингибиторов применяют смесь MnS и AlN.

В то же время, согласно так называемой русской технологии, в качестве ингибиторов применяют смесь AlN и CuS, а температура повторного нагрева находится в пределах 1250–1300 °С, что исключает образование жидкого шлака. Данная технология может быть использована для получения традиционной полосы из электротехнической стали GO.

Новая технология, получившая название «азотирование», позволяет получать полосу как обычного качества, так и с повышенной магнитной проницаемостью. При выплавке стали содержание алюминия и азота поддерживается в узких пределах. Непрерывнолитые слэбы подогревают до температуры примерно 1250 °С с целью растворения крупных включений, образующихся в процессе кристаллизации. Далее следует горячая, а затем холодная прокатка. Особенностью этой технологии является специальная операция — азотирование холоднокатаной полосы после обезуглероживания. При этом особым образом контролируется диффузия азота в поверхностные слои полосы. Во время последующего многочасового отжига азот равномерно распространяется и выделяется совместно с Al в виде AlN. Выпадающие мелкодисперсные частицы AlN выступают в роли ингибитора, регулируют процесс вторичной рекристаллизации и тем самым способствуют получению необходимой текстуры. Такая технология сочетает преимущества «русского» варианта (пониженную температуру подогрева слэбов) с возможностью получения электротехнической полосовой стали GO с высокой магнитной проницаемостью.

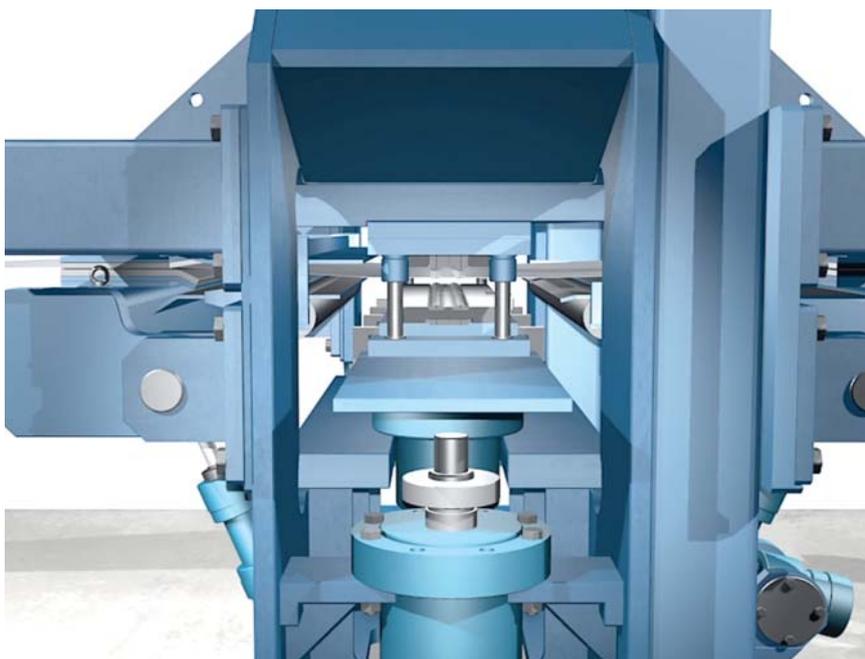


Рис. 5. Специальная машина для быстрого и надежного соединения концов высокопрочных полос

Концепции технологических линий

Для производства электротехнической полосовой стали GO, в зависимости от выбранного технологического варианта и требований к готовой продукции, используют различные технологические линии: от линий для выполнения подготовительных операций до линий для рекристаллизации, обезуглероживания и азотирования стали, включая установки для специальной обработки поверхности, например лазерной разметки. Конкретные технологические линии всегда приспособлены к соответствующим потребностям и грузопотокам, требованиям к качеству продукции и планировке цеха. Концепции технологических линий, которые наиболее часто используются в цехах по производству электротехнической полосовой стали GO, приведены ниже:

- линия отжига и травления производительностью до 500 тыс. т/год в зависимости от требуемого сортамента продукции (рис. 2);
- линия обезуглероживания и нанесения покрытия производительностью до 120 тыс. т/год (рис. 3);
- линия окончательного отжига и нанесения покрытия производительностью до 120 тыс. т/год (рис. 4).

Многочисленные примеры.

В 2004 г. компания Wuhan Iron & Steel Group Corporation, Китай, заказала линию промежуточного отжига, которая была введена в эксплуатацию в ноябре 2006 г. В декабре 2009 г., после успешных приемочных испытаний и подписания приемочного сертификата, компания Baoshan Iron & Steel Group, Китай, ввела в эксплуатацию четыре линии по изготовлению электротехнической полосовой стали GO. В настоящее время компания SMS Siemag устанавливает семь линий по обработке электротехнической полосовой стали GO для заказчиков из Азии. Еще восемь линий были сооружены в прошлые годы, например для компании ThyssenKrupp Electrical Steel.

Кроме того, компания SMS Siemag в прошлые годы установила несколько линий для производства электротехнической полосовой стали с неориентированным зерном. По одному контракту было заключено на сооружение линий отжига и нанесения покрытий в 2002 г. с фирмой Slovak U.S. Steel Kosice, а в 2005 г. — с фирмой Taiwanese China Steel Corporation.

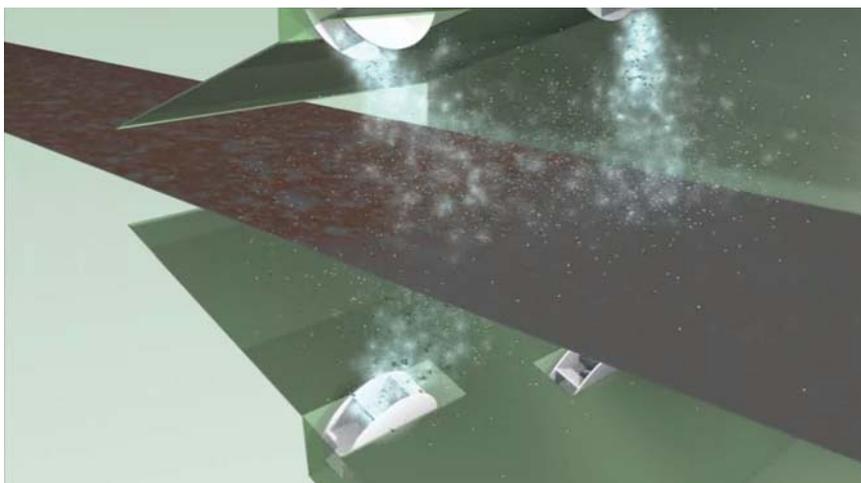


Рис. 6. Дробеструйная машина для механического удаления окалины



Рис. 7. Линия турбулентного кислотного травления



Рис. 8. Очищенная и обезуглероживанная полоса на сматывающей моталке

Конкретный пример: компания Baosteel

Для китайской компании Baosteel компания SMS Siemag поставила четыре линии для обработки электротехнической полосовой стали GO: линию отжига и травления, линию обезуглероживания, комбинированную линию промежуточного отжига и обезуглероживания, а также линию термического выравнивания свойств и нанесения изолирующего покрытия. Все компоненты линий были специально разработаны для удовлетворения особых требований к стальной продукции электротехнического назначения (рис. 5). Это позволяет производить на линии высококачественную готовую продукцию при высоком уровне экологической совместимости и высокой экономичности. Все четыре линии удовлетворяют жестким требованиям по уровню загрязнения воздушной среды, установленным европейскими стандартами. Загрязненная вода и использованные кислоты подвергаются регенерации, после чего значительная их часть повторно используется в технологиче-

ском процессе. Системы фильтров, установленные в линиях, гарантируют безаварийную работу.

В линии отжига и травления обрабатывают горячекатаные полосы толщиной 1,5–3 мм и шириной 750–1350 мм. Расчетная производительность линии составляет 360 тыс. т/год полосовой электротехнической стали с ориентированным и неориентированным зерном. Максимальная скорость обработки 55 м/мин, скорость на входе в линию и на выходе из нее 80 м/мин. Очистку поверхности полосы проводят в два этапа. Сначала с поверхности полосы удаляют окислы механическим способом в дробеструйной установке (рис. 6). При последующем травлении в ванне с турбулентно движущейся соляной кислотой с полосы удаляется вся оставшаяся окислы (рис. 7). Уникальной особенностью этой линии является специально разработанная схема удаления кремнистого шлама из циркуляционной системы. Кроме того, специальные устройства для подогрева кромок полосы позволяют минимизировать вероятность их растрескивания.

Листы с малыми внутренними напряжениями. Линии правки и резки на мерные длины.



Лазерная резка полос

Для дальнейшей лазерной резки уже разрезанных на мерные длины полос необходимо иметь листовой прокат с минимальными внутренними напряжениями. Компания ANDRITZ Sundwig с этой целью разработала и запатентовала специальные технические решения для высокоточных правильных машин, в которых можно использовать ролики четырех разных диаметров. Это дает возможность повысить технологическую гибкость всей линии резки на мерные длины с учетом различных значений толщины и прочности проката. Листы с малыми внутренними напряжениями могут быть получены из полос толщиной до 25 мм с прочностью 1800 Н/мм².

Высокоточный толстый лист

Эти технические решения также используются при правке толстого листа с использованием новинки — правильной машины с роликами двух различных диаметров. На машине осуществляется правка листов толщиной от 3 до 60 мм с малыми внутренними напряжениями при прочности до 2000 Н/мм². Экспертная система производит расчет настройки правильной машины с учетом толщины и ширины листа, предела текучести материала для обеспечения оптимальной пластической деформации и плоскостности проката.

ANDRITZ Sundwig GmbH
Stephanopeler Str. 22
58675 Hemer, Germany
Phone: +49 (0) 23 72 54 0
sundwig_welcome@andritz.com

ANDRITZ Sundwig GmbH
Europastr. 17
77933 Lahr, Germany
Phone: +49 (0) 78 21 99 49 0
sundwig_welcome@andritz.com

В линии обезуглероживания и комбинированной линии промежуточного отжига и обезуглероживания максимальная входная и выходная скорости равны 130 м/мин, а рабочая скорость 100 м/мин. Во время промежуточного отжига полоса имеет толщину 0,4–0,83 мм и проходит через печь со скоростью 70 м/мин. Толщина полосы при обезуглероживающем отжиге составляет 0,15–0,35 мм. Ширина полосы в обеих линиях 750–1270 мм. Производительность каждой линии примерно 90 тыс. т/год. Среди новшеств, примененных в этих линиях, следует отметить специальные устройства для нанесения MgO-покрытия, оборудованные сложными системами циркуляции. Линия промежуточного отжига и обезуглероживания также имеет встроенную установку для нанесения MgO-покрытия. Слой окиси магния предохраняет полосы от слипания во время длительной высокотемпературной обработки, а в комбинации со специальным изоляционным покрытием способствует возникновению внутренних напряжений, приводящих к улучшению магнитных свойств полосы.

Ширина полос, обрабатываемых в линии выравнивания свойств и нанесения покрытия, также находится в пределах 750–1270 мм, а толщина 0,15–0,35 мм. Скорость полосы на входе и выходе из линии составляет 170 м/мин, скорость обработки на участках линии 130 м/мин. Годовая производительность линии 106 тыс. т. В линии можно наносить прецизионные изоляционные покрытия.

Конкретный пример: компания Wuhan Iron and Steel Group

Для компании Wuhan Iron and Steel Group Corporation, Китай, компания SMS Siemag поставила линию проме-

жуточного отжига, в которой полосу, выходящую из стана холодной прокатки, подвергают очистке в щелочном растворе и обезуглероживанию в ходе термической обработки (рис. 8). Особенностью этой линии является горизонтальная печь, в которой полоса перемещается на двух уровнях по высоте. Таким образом, в этой печи можно одновременно обрабатывать две полосы. При этом состав оборудования входного и выходного участка печи, а также участка очистки удваивается. Печь установлена на опорной стальной раме, а остальное оборудование крепится под ней, на уровне пола цеха. В линии обрабатывается травленая холоднокатаная полоса из электротехнической стали с ориентированным зерном толщиной 0,5–0,9 мм и шириной 750–1050 мм. Максимальная скорость обработки составляет 50 м/мин, скорость на входе и выходе из линии — 80 м/мин; благодаря особой конструкции линии на ней можно достичь производительности 180 тыс. т/год.

Специальное оборудование для обработки электротехнической полосовой стали с ориентированным зерном

Отдельные компоненты линий по обработке электротехнической полосовой стали ГО спроектированы таким образом и с такой расчетной производительностью, что они взаимно дополняют друг друга и обеспечивают максимальную производительность линий в целом. Одним из примеров такого подхода служит приспособление системы турбулентного травления к особым условиям, возникающим вследствие образования шлама с оксидом кремния. Особая форма ванны и применение специализированного оборудования в циркуляционной системе позво-

ляют реализовать полную автоматизацию операции удаления шлама.

Покрытия, наносимые на электротехническую полосовую сталь ГО, оказывают значительное влияние на свойства готовой продукции. Специальное роликковое устройство для нанесения покрытия оборудовано прецизионной и полностью автоматизированной системой регулирования роликов. Высокое качество покрытия гарантировано благодаря строгому контролю температуры материала покрытия в циркуляционной системе.

Специальное устройство надежно соединяет концы полос из высокопрочной электротехнической стали во время кратковременной остановки. Образование дефектов на полосе предотвращается применением устройства для нагрева кромок. Специально подобранные диаметры направляющих роликов предотвращают воздействие механических нагрузок на полосу. Движущиеся тележки горизонтальных накопителей полосы (петлевых устройств) постоянно поддерживают полосу и тем самым предотвращают повреждения ее поверхности.

Выводы

Рыночные перспективы высококачественной электротехнической полосовой стали ГО оцениваются как очень благоприятные благодаря ее превосходным электрическим и магнитным свойствам и учитывая растущее потребление электроэнергии в мире. Отдельные операции сложных производственных процессов требуют применения различных технологических линий для обработки полосы, располагающих специализированным оборудованием. Такое оборудование незаменимо для получения требуемой текстуры и магнитных свойств готовой продукции при высоком уровне ее качества. ■