

УДК 621.771.06-114

Проектирование индуктора и моделирование процесса индукционного нагрева для литейно-прокатного комплекса универсального режима прокатки

Дмитрий Александрович Чернов

Студент 6 курса, специалитет,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.В. Мунтин,
кандидат технических наук, заместитель директора по научно-исследовательской
деятельности ОАО «ВМЗ», доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Концепция универсального ЛПК. Необходимость промежуточного нагрева.

Производственные линии литейно-прокатных комплексов имеют ряд недостатков и преимуществ относительно друг друга. Это послужило идеей новой концепции отливки тонких слабов и их прокатки, способную объединить в производственной линии все достоинства освоенных ранее различных конфигураций и исключить ограничения, присущие каждой из них. Изображена на рис. 1. К данному поколению относят предложение компании Danieli по реализации универсального ЛПК (DUE – Danieli Universal Endless). Предложенные технические решения позволят выбирать между бесконечным режимом и штучным или полубесконечным, а также производить как сверхтонкие полосы (от 0,8 мм), так и полосы большей толщины (6...12 мм).

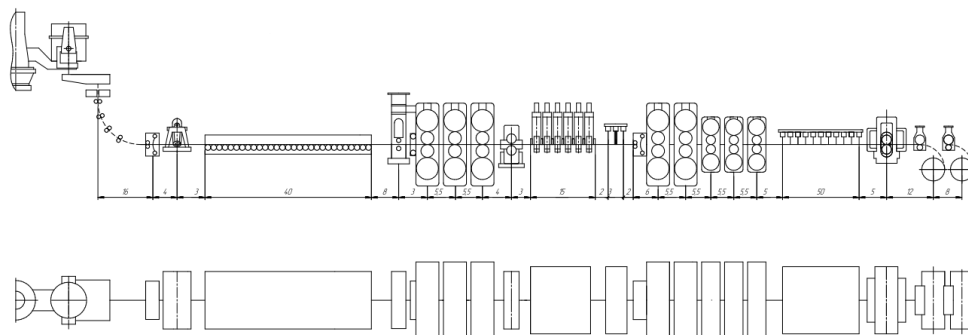


Рис. 1. Универсальная схема ЛПК

Одним из важнейших и оказывающих влияние на качество и сортамент готовой продукции участков данной схемы является нагрев полосы на промежуточном рольганге между черновыми и чистовыми клетями.

Стабилизация температуры на входе в чистовую группу стана исключает ускорение при прокатке и позволяет получить постоянные физико-механические свойства по длине полосы. Появляется возможность поддерживать с высокой точностью толщину конечного продукта по длине. Равномерное температурное поле по ширине полосы улучшает условия эксплуатации валков прокатного стана и уменьшает неравномерность износа валков и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации.

За время транспортировки полоса подката теряет среднюю температуру, дополнительно подсыхают кромки, а также образуется температурный перепад по длине полосы. По этим причинам в технологическом процессе должен быть предусмотрен подогрев полосы подката.

Индукционный способ нагрева подходит как для одновременного повышения общего уровня температуры, так и для подогрева кромок и выравнивания температуры по ширине, компенсации температурного градиента по длине полосы, обеспечения стабилизации температуры на входе в чистовую клеть. Подъем общего уровня температуры полосы перед входом в чистовые клетки прокатного стана обычно осуществляется в овальных неразъемных индукторах с продольным магнитным полем.

Основные преимущества внедрения индуктора в линию прокатки:

- 1) Индукционный нагрев устраняет проблему качества, связанную с открытым пламенем, нагревом горелки и аналогичными методами.
- 2) Максимизирует производительность, поскольку тепло вырабатывается непосредственно и мгновенно внутри заготовки.
- 3) Улучшенное качество продукта благодаря отсутствию контакта с деталями, которые должны быть нагреты прямым пламенем.
- 4) Экологичность.
- 5) Снижение потребления энергии, потому что это энергоэффективный процесс, который преобразует большую часть энергии в полезное тепло.
- 6) Уменьшение времени нагрева, соответственно уменьшение образования окалины.
- 7) Модульность и независимый контроль мощности каждого силового инвертора.
- 8) Контролируемое повышение температуры сляба и гибкое регулирование входной температуры в процессе прокатки на оптимальном уровне, что позволяет выполнять специальные процессы, такие как прокатка тонких и особо тонких полос.

Моделирование индукционного нагрева

Основная цель моделирования индукционного нагрева заключалась в анализе теоретических данных, оценке эффективности и получении геометрических параметров индуктора.

Поставленные задачи:

- 1) Смоделировать процесс индукционного нагрева полосы в индукционной нагревательной печи литейно-прокатного комплекса.
- 2) Подобрать оптимальные геометрические параметры индуктора, а также физические параметры установки.
- 3) Произвести оценку и анализ полученных параметров.

Для моделирования процесса индукционного нагрева полосы перед чистовой группой использовалось промышленное программное обеспечение ELTA 7.0, разработанная компанией New Solution Group совместно с Fluxtrol, студенческую версию которой предоставил разработчик.

Использовались следующие входные параметры. Заготовка – углеродистая стальная полоса марки Сталь 45. Толщина заготовки 40 мм, ширина 1800 мм, длина 900 мм. Начальная температура 900 °С. Вес сляба – 492 кг. Скорость движения полосы – 0,25 м/с².

Для оптимизации нагрева использовалось одномерное моделирование. Линия нагрева содержит восемь индукторов с одинаковым числом витков и термоизоляцией. Таким образом, каждый индуктор полоса преодолевает за 4 секунды, а каждый промежуток между индукторами за 2 секунды, так как его длина из конструктивных соображений в 2 раза меньше ширины индуктора и составляет 450 мм.

Исходя из длины индуктора выбирались параметры нагревательного элемента и его поперечного сечения. Размеры окна были выбраны исходя из максимальных размеров сляба по толщине и ширине. Число оборотов выбрано исходя из ширины индуктора. Значение удельного сопротивления по умолчанию соответствует меди при температуре около 50 °С. Коэффициент излучения внутренней поверхности катушки по умолчанию предоставляется значение 0,7.

Было обнаружено, что для каждого последующего индуктора следует уменьшать частоту (до 100 Гц), чтобы компенсировать разницу температур поверхности и центра, а также не перегреть кромки и получить равномерный нагрев.

Итоговое время нагрева до требуемых температур сляба при бесконечном режиме прокатки составило 48 секунд, что уменьшает габариты участка нагрева и значительно сокращает время равномерного нагрева полосы.

В результате моделирования индукционного нагрева получились графики и цветовые карты, по которым проводился анализ модели.

На рис. 2 показано изменение температур в центре сляба, на его поверхности, температура по средней линии и перепад температур «поверхность - центр».

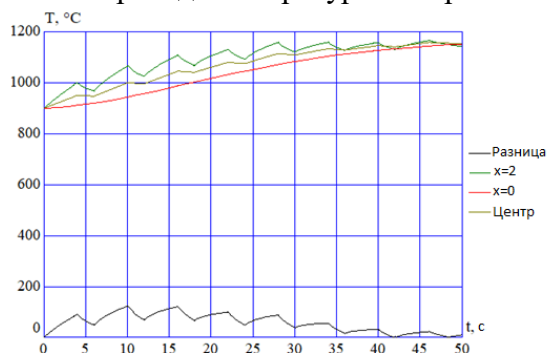


Рис. 2. Изменение температур по толщине

Опция 2D позволила рассчитывать и визуализировать следующие цветовые карты температуры, плотности теплового потока и напряженности магнитного поля по всему сечению сляба для любого момента времени.

С помощью перебора данных, изменений частоты, получился график распределения температуры толщины сляба по времени, представленный на рис. 3, температура после нагрева в восьмом индукторе равномерно распределяется по толщине.

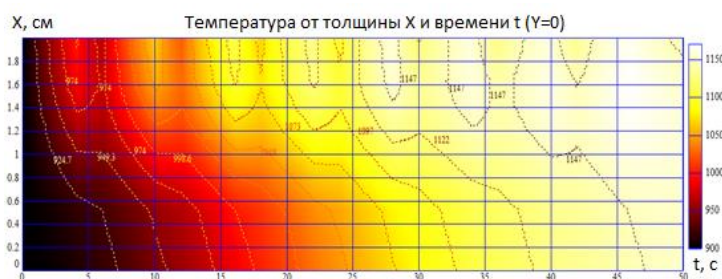


Рис. 3. Распределение температуры от толщины и времени

Обнаружено, что проблемной является концевая зона, она немного недогрета из-за краевого эффекта, это видно из рис. 4.

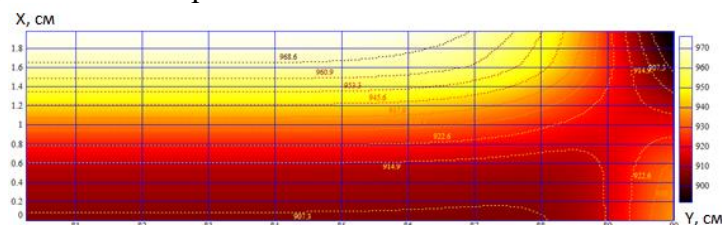


Рис. 4. Изменение температуры в зависимости от толщины и длины

Программное обеспечение позволило получить все необходимые параметры:

- 1) Температурные зависимости.
- 2) Зависимости плотности теплового потока от времени и толщины.

- 3) Зависимости напряженности поля в зависимости от времени (на любом радиусе) и толщины.
- 4) КПД.
- 5) Кривые полной удельной мощности (абсолютной).
- 6) Кривые зависимости удельной мощности от толщины и ширины.

Выводы

На основе полученной модели, а также построенных графиков и цветовых карт распределения температур, был сделан ряд выводов:

- 1) Индукционный нагрев обеспечивает равномерный уровень температуры между черновыми и чистовыми клетями прокатного стана, что позволяет значительно уменьшить относительную толщину.
- 2) Высокий уровень температуры позволяет достичь соответственно высокой степени деформации.
- 3) Уменьшается время нагрева до 48 с.
- 4) Микроструктура отливки полностью устраняется путем перекристаллизации, что приводит к однородной микроструктуре с листами толщиной до 50 мм.

Литература

1. *D. Wohlfahrt, R. Jürgens.* Information Technology And Electrical Engineering - Devices And Systems, Materials And Technologies For The Future. 2009. – С. 2-10.
2. *V. Nemkov, V. Bukanin, A. Zenkov, A. Ivanov.* Simulation of Induction Heating of Slabs using ELTA 6.0. Hannover, Germany. 2012. – С. 2-4.
3. *H. Emile.* Industrial Solutions for Inductive Heating of Steels. 2013. – С. 17-35.
4. *H. Schülbe, A. Nikanorov, B. Nacke.* Development and Investigation of Flexible Transverse Flux Heaters. 2008. – С. 2-17.
5. *David P., Mehdi F.* Inductance modeling and extraction in EMC applications. 2009. – С. 37-54.
6. *Демидович В.Б., Никитин Б.М., Иванов В.Н.* Энергосберегающие технологии индукционного нагрева. – М.: Мир техники и технологий, 2010. – С. 20-24.
7. *Мунтин А.В.* Передовые технологии совмещённого процесса непрерывного литья тонких слябов и горячей прокатки полосы // *Металлург.* – 2018. – №9. – С. 43-51.