

УДК 621.771

И.П. Мазур д.т.н., проф.

Липецкий государственный технический университет (г. Липецк, Россия)

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС

Рассмотрен опыт внедрения системы контроля качества поверхности горячекатаного проката на непрерывном широкополосном стане 2000 и использования результатов определения и идентификации дефектов поверхности в совершенствовании технологии производства листовой стали.

The Successful Implementation of a Strips' Surface Automatic Inspecting System in the Hot Strip Mill 2000 is under consideration. The Results of Surface Defects Detection and Identification are used in the Improving of the Hot Steel Strips Manufacturing Technology.

Качество выпускаемой продукции определяет конкурентоспособность производителя на мировом рынке. Современные представления о качестве продукции основаны на принципе наиболее полного удовлетворения требований и рекомендаций потребителя. Его можно определить как совокупность свойств изделия, необходимых для использования в соответствии с назначением [1]. Для проката такими свойствами, в первую очередь, выступают механические свойства, геометрические характеристики полосы и планшетность. На сегодняшнем уровне развития прокатного производства основные производители металлопродукции гарантируют и документируют потребителю эти показатели качества. Это достигается внедрением автоматизированных систем управления и контроля технологическим процессом [2].

Отдельной позицией качества выступает состояние поверхности проката. Наиболее массовое применение контроля поверхности осуществляется на завершающих переделах производства металлопродукции (после холодной прокатки, травления, отжига, нанесения покрытий и т.д.). Это исключает поставку потребителю продукции, не отвечающей его требованиям. Однако, чем глубже передел на котором обнаружены такие несоответствия, тем выше потери от брака, и поэтому логично внедрение систем контроля на всех переделах.

Продукции станов горячей прокатки, которая может быть и товарной продукцией и подкатом, свойственно наличие поверхностных дефектов как сталеплавильного, так и прокатного происхождения. Причем по внешним признакам на готовой продукции не всегда представляется возможным точно их идентифицировать. Основные методы, применяемые для обнаружения и изучения дефектов поверхности листовой стали, визуальные – использующие внешний осмотр без или с применением специальных систем [3]. Однако, скорость полосы, её температура и окисление поверхности затрудняют проведение инспекций. По этой причине, рулоны на предмет наличия дефектов проверяются, как правило, после остывания. Тем самым увеличивается объем несоответствующей продукции, особенно когда дефект имеет прокатное происхождение (например, периодический отпечаток от рабочего вала).

Система контроля качества поверхности листового проката

Несмотря на большую потребность предприятий черной металлургии в системах автоматического осмотра и идентификации поверхностных дефектов, в настоящее время, имеется лишь ограниченное число разработчиков таких систем (CODNEX, MATRA, PARSYTEC, SIEMENS-VAI и др.). Это объясняется тем, что системы, пригодные для стального проката намного дороже систем, контролирующих более простые для осмотра поверхности (пленка, бумага, фольга), поскольку поверхность стали сильно структурирована и имеет разнообразные дефекты, что требует специальных подходов для обнаружения и классификации дефектов [4-6].

Существенный прорыв в разработке и внедрении систем автоматического контроля поверхности произошел благодаря созданию высокопроизводительных компьютеров и цифровых видеокамер высокого разрешения, позволивших получать и обрабатывать изображение поверхности движущейся полосы в реальном режиме времени. Тогда и получили развитие два направления систем, основанных на получении первичного изображения от строчных видеокамер, регистрирующие изображение поверхности с разверткой строки за строкой, и матричных, фиксирующих изображение площади поверхности. Дискуссия о преимуществах той или иной системы, имеющая быть в различных изданиях, не всегда конструктивна по причине однобокости рассмотрения. Она в основном связана именно с первичной обработкой изображения, полученного с камер, и является актуальной для разработчиков ПО. По мере развития и совершенствования алгоритмов обработки изображения, внедрения компьютеров, обладающих высокой скоростью обработки данных, это теряет важность, и актуальными становятся критерии, ради которых эти системы внедряются на металлургических предприятиях. А именно, правильность обнаружения и классификации дефектов, их минимальный размер и возможность использования этих результатов в дальнейших технологических переделах.

Контроль поверхности горячекатаного проката на НПС 2000

В 2003 году на непрерывном стане горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК» впервые в отечественной практике была смонтирована система, которая обеспечивает 100 % контроль поверхности проката (верхней и нижней стороны), автоматически обнаруживает и классифицирует дефекты полосы в режиме реального времени. В реализации проекта кроме ОАО «НЛМК» участвовали SYTCO AG, SIEMENS-VAI и Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ).

Система контроля качества поверхности (СККП) включает в себя две цифровые строчные видеокамеры для съемки верхней и нижней поверхности полосы, блок освещения верхней и нижней поверхностей полосы, компьютерное оборудование (рис. 1). Разрешающая способность цифровых видеокамер составляет 0,51,0 мм по ширине и длине полосы соответственно, что и определяет минимальный размер фиксируемого поверхностного дефекта. Графическое изображение верхней и нижней поверхностей полосы принимается видеокамерами и передается в компьютерную часть системы. Обработка изображения дефектов поверхности происходит в четыре основных этапа – предварительная корректировка изображения, определение, сегментация и классификация.

Получив от видеокамер первичное изображение поверхности, система корректирует общий фон, который должен быть всегда постоянным по времени для правильной классификации дефектов. К полученному изображению применяются параллельно несколько алгоритмов определения дефектов (для вертикального, горизонтального и диагонального контраста, тонких и протяженных, темных или светлых дефектов). Затем, происходит морфологическое группирование полученных признаков для получения информации, требуемой на этапе классификации.

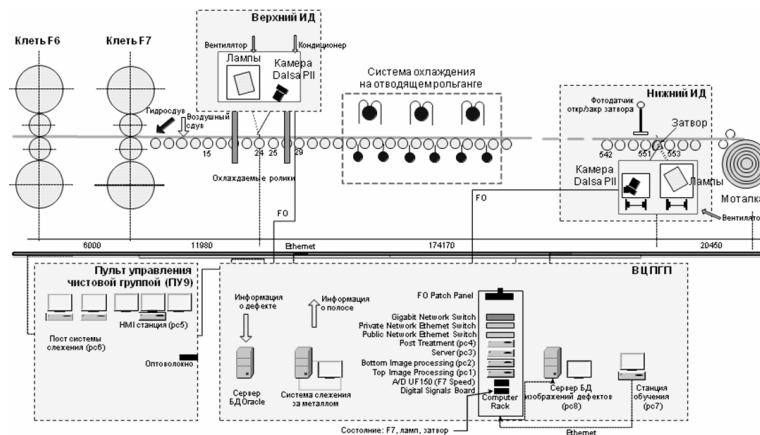


Рис. 1. Размещение оборудования СККП

Для классификации дефектов в данной системе контроля качества поверхности реализован метод, основанный на методе классификационных сфер. В основе метода сравнение найденных недостатков поверхности с образцами дефектов из существующей базы данных, на которой основана классификация. Для автоматической классификации дефекта требуется иметь в базе данных не менее 20-40 образцов аналогических дефектов.

После классификации изображения и результаты обработки передаются на пост управления, информируя оператора стана о состоянии поверхности проката, а также записываются в базу данных для последующего анализа качества проката.

Основные трудности, возникшие на этапе освоения СККП на НШСП 2000, состояли в настройке системы для определения дефектов на текущем сорimente стана, а также в «обучении» системы классифицировать найденные дефекты. Обучение заключалось в накоплении образов дефектов в базе данных (база «знаний дефектов»).

Мероприятия по настройке системы контроля качества поверхности для получения максимума определения поверхностных дефектов состояли из четырех этапов:

- разбиение сортамента сталей, прокатываемых на стане, на группы по внешнему виду поверхности проката;
- снижение количества воды на верхней поверхности проката;
- определение в системе пороговых значений контрастности определения дефектов для групп, выделенных в сорimente сталей;
- создание классификационных файлов.

Так как поверхности стальных полос отличны по внешнему виду (например, марки трансформаторной стали имеют, в основном, однородную серую поверхность, а динамной и углеродистой более темную и неоднородную), то после непродолжительной эксплуатации системы весь сортамент стана 2000 был разделен на 5 групп по внешнему виду поверхности:

- группа 1 – прокат 10ЮА, 20 и трансформаторных марок;
- группа 2 – прокат 08Ю, DC04 и Ст3сп;
- группа 3 – прокат динамных и легированных марок;
- группа 4 – прокат S355J2G3, Ст5сп, 09Г2С и А36;
- группа 5 – прокат с рифлением,

и для каждой группы были определены пороговые значения контрастности и построены классификационные сферы [7].

Еще одной проблемой для определения поверхностных дефектов на верхней стороне проката явилось наличие на ней капель воды, а также присутствие водяных брызг и пара между полосой и верхней видеокамерой. При наличии 4-5 тыс. изображений воды на одной полосе, даже при высоком проценте классификации (98-99 %), не менее чем 50-100 изображений воды будут классифицированы как «дефект». Для удаления воды была изменена конструкция водяного охлаждения роликов роллганга, смонтированных в зоне измерительных домиков, и дополнительно к штатному гидросуду установлен после 5 ролика еще один гидросуд, предназначенный для

удаления водяных капель с поверхности полос шириной более 1200 мм, а после 7 ролика воздушный сдвиг для проката шириной 900-1200 мм.

В результате настройки СККП на определение поверхностных дефектов проката и устранения негативного влияния брызг воды на обнаружение стало возможным перейти к следующему этапу – обучению системы для автоматической классификации дефектов. И хотя для этого возможно было использование базы знаний стандартных изображений дефектов, полученных на разных металлургических предприятиях, этап настройки СККП на автоматическую классификацию осуществлялся в ручном режиме. Это более трудоемкий метод настройки, связанный с простоями агрегатов, но эффективный, так как за счет визуального осмотра увеличивается точность классификации неизвестных дефектов. Осмотр рулонов, содержащих дефекты неизвестного типа, осуществлялся на агрегатах резки и линиях подготовки горячекатаных рулонов. Здесь проводилась идентификация дефектов экспертами УТК, их документирование и цифровое фотографирование. При необходимости проводился комплекс металлографических исследований. Последовательность выполнения мероприятий по этому этапу представлена на рис. 2.



Рис. 2. Обучения СККП для автоматической классификации дефектов

Первоначальное обучение СККП для автоматической классификации дефектов проводилось с декабря 2003 г. по май 2004 г. Всего за это время было осмотрено около 120 рулонов с дефектами и в базу знаний внесено более 1000 изображений дефектов. После накопления определенного опыта работы с изображениями дефектов, получаемых из системы, стало возможным производить обучение системы без проведения трудоемкого визуального осмотра рулонов или прибегать к нему в исключительных случаях. Этому способствовал разработанный ЛПТУ каталог цифровых изображений дефектов. Основой этого каталога стала накапливаемая база знаний СККП и цифровые изображения дефектов, обнаруженных в результате визуального осмотра и идентификации поверхностных дефектов горячего проката.

Когда объем обученных изображений дефектов стал достаточным, совместно с участием фирм SYTSCO AG и SIEMENS-VAI были проведены гарантийные испытания (июнь 2004 г.). Для этого были отобраны рулоны с поверхностными дефектами, обнаруженными системой. Отобранные рулоны осматривались по методике, аналогичной методике, используемой для обучения СККП автоматической классификации. Дефекты регистрировались вручную на агрегатах подготовки горячекатаных рулонов. Фиксировались координата дефекта от заднего конца рулона, размеры дефекта, определялся его класс и интенсивность. Далее, по результатам ручного и автоматизированного определения дефектов поверхности горячекатаного проката вычислялся процент определения

P_O и процент классификации P_K :

$$P_O = \frac{D_O}{D_{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad P_K = \frac{D_K}{D_O} \cdot 100\%,$$

где D_O – число дефектов данного класса, одновременно обнаруженных как системой в автоматическом режиме, так и экспертом при визуальном осмотре на всех отобранных для испытаний рулонах; D_{Σ} – суммарное число дефектов данного класса, обнаруженных экспертом при визуальном осмотре на всех отобранных для испытаний рулонах; D_K – число дефектов данного класса, одновременно обнаруженных как системой в автоматическом режиме, так и экспертом при визуальном осмотре на всех отобранных для испытаний рулонах и при этом правильно классифицированных системой (как данный класс). При вычислении процента определения дефектов учитывались только те дефекты, которые являются дефектами с точки зрения эксперта, а класс дефекта, назначенный для них системой в автоматическом режиме, во внимание не принимался. Всего в ходе гарантийных испытаний было осмотрено 16 рулонов.

Анализ полученных результатов показал, что основными дефектами поверхности горячекатаных полос являются плены (слиточные и строчечные), а также раковины и вкат. Процент определения и классификации для этих дефектов составил 100 % и 94,2 %, 95 % и 95 %, соответственно. Уровень обнаружения псевдодефектов (капли

воды, «недефекты») составил 99 %, а классификации 98,3 %. Средний процент для отобранной партии определения дефектов равен 99,7 % при классификации в 97,3 %. Тем самым, были подтверждены гарантийные показатели и СККП была принята в промышленную эксплуатацию.

Использование результатов обнаружения и классификации дефектов

После проведения гарантийных испытаний работы по идентификации дефектов горячекатаного проката и расширению базы знаний СККП были продолжены. В течение года в базу знаний было добавлено свыше 10 тысяч изображений дефектов. Среди них 1532 изображения воды, 1447 – плен слиточных, 884 – окалина вторичная, 526 – вкатов, 394 – плен строчечных, а также изображения трещин (продольных и поперечных), рисок, отпечатков, складок, рванин кромоочных и других дефектов, выявленных на поверхности горячего проката.

Высокий процент обнаружения и классификации поверхностных дефектов на горячем прокате, сформированный объем базы знаний и каталога цифровых изображений дефектов создали объективную основу для реализации задач, связанных с использованием результатов, полученных от СККП. В ЛГТУ было разработано программное обеспечение, выполненное в виде отдельных приложений [7-9]:

- цифровой каталог изображений дефектов;
- модуль обработки периодических дефектов;
- модуль сертификации горячекатаных рулонов;
- модуль слежения за критическими дефектами при подготовке к холодной прокатке на станах 1400 и 2030;
- модуль визуализации и анализа возникновения дефектов поверхности и др.

Функционирование указанных модулей основано на понятии «критичность» дефекта. Для станов холодной прокатки критичность определяется вероятностью аварийной остановки стана из-за порыва полосы по поверхностному дефекту. На основании экспериментальных данных по обрывности полос, полученных на станах 2030 и 1400, разработан алгоритм присвоения кода критичности (от 0 до 7) в зависимости от марки стали, типа дефекта, его расположения (кромка, центр подката) и линейных размеров. При обработке рулонов на агрегатах подготовки (перед станом холодной прокатки) по информации о дефектах, имеющихся на полосе и их кодах критичности, принимается решение о дальнейшей обработке рулона (изменение статуса «критический/некритический», вырезка дефекта, снижение скорости прокатки на проблемных участках и др.) или изменяется его назначение.

Для стана горячей прокатки критичными являются периодические дефекты – отпечатки. Алгоритм для анализа отпечатков основан на сравнении координат по длине полосы (с учетом вытяжки металла) повторяющихся дефектов одного класса с одинаковыми координатами по ширине. При их совпадении выдается периодическая последовательность из дефектов с конкретным значением периода и возможная причина их формирования. Приложение внедрено на посту управления чистовой группой стана 2000 и информирует оператора об обнаружении критических дефектов для принятия решения о целесообразности остановки стана и устранения причины их образования. Эта информация также используется при аттестации горячекатаного проката.

Модуль визуализации дефектов поверхности горячекатаных полос с привязкой к идентификатору рулона предназначен для анализа возникновения дефектов в зависимости от плавки, партии, марки металла, режимов его прокатки и т.д. (рис. 4). Алгоритм, реализованный в модуле, позволяет осуществлять анализ формирования поверхностных дефектов в режиме on-line для полос, прокатываемых на стане 2000, и в режиме off-line по архивным данным прокатанных полос. Это позволяет своевременно выявлять закономерности распределения дефектов, находить причины возникновения, предлагать меры по их устранению, тем самым уменьшить потери от брака и несоответствующей продукции. Вот некоторые результаты внедрения СККП:

- использование системы контроля качества поверхности с дополнительными приложениями привело по сравнению с 2003 г. к снижению простоев стана 2030 на 14,4 % в 2004 г., на 31,2 % в 2005 г.;
- контроль с применением СККП в апреле – августе 2009 года горячекатаной стали марки St24, поставляемой европейскому заказчику, позволил контролерами УТК при аттестации продукции снять с отгрузки и перевести в несоответствующую продукцию 112 рулонов, что составило 3,0% от отгружаемых 74 тыс. тонн.

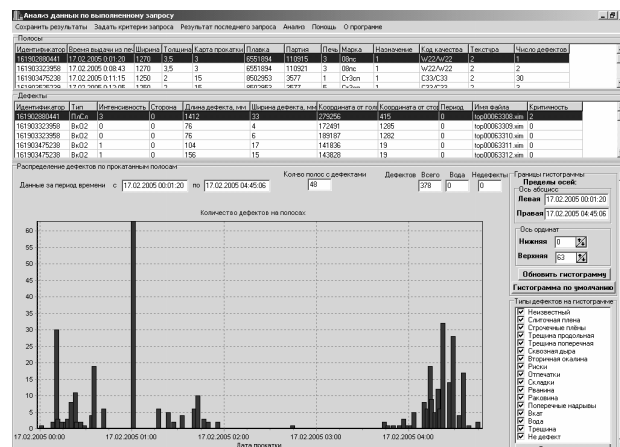


Рис. 3. Визуализация приложения по анализу возникновения дефектов

Рассмотренные пользовательские приложения установлены дополнительно к программному обеспечению, поставленному разработчиком СККП, на рабочие станции технологов различных служб, включенных в информационную сеть комбината. В их числе инженерный центр, кислородно-конверторные цеха, листопрокатные производства, структуры сбыта и др.

Заключение

Диагностирование дефектов поверхности в прокатном производстве является сложным и многофакторным процессом. Опыт внедрения системы контроля качества поверхности на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки, а также её последующее использование показали, что автоматическое обнаружение и классификация поверхностных дефектов в сквозной технологии производства листового проката позволяет:

- гарантировать обеспечение требований потребителей по качеству поверхности проката с предоставлением электронного паспорта;
- обеспечить 100 % контроль поверхности всех полос, прокатываемых на стане, для выявления дефектов разлики и горячей прокатки;
- обеспечить автоматизированные системы последующих переделов информацией о дефектах поверхности горячего проката;
- осуществлять слежение за качеством поверхности в смежных переделах;
- проводить аудит существующих технологий производства проката и разрабатывать мероприятия по их совершенствованию.

Управление технологией смежных с горячей прокаткой переделов с использованием результатов, полученных системой контроля качества поверхности, открывает хорошие перспективы по сокращению несоответствующей продукции и повышению эффективности производства.

Список литературы

1. Бережная Г.А., Салганик В.М., Песин А.М. Разработка и использование сбалансированной системы показателей для улучшения качества продукции // Производство проката. 2007. № 12. С. 34-38.
2. Igor P. Mazur. Improvement of Consumer Qualities and Stability of the Technological Process of Hot Rolled Stock Production // Materials Science Forum Vols. 575-578. Trans Tech Publications, Switzerland. 2008/Apr/08, pp 379-384.
3. Новокшенова С.М., Виноград М.И. Дефекты стали. – М.: Металлургия, 1984. – 199с.
4. Штольценберг М., Грубер К., Хенкенмайер Х., Йонкур К. Системы осмотра поверхности листовой стали: Результаты исследований // Черные металлы. 2002. № 12. С. 40-48.
5. Лемон С. Автоматический осмотр поверхности полосы для обеспечения сплошного контроля качества в линии // Черные металлы. 2003. № 4. С.49-54.
6. Байндорф Й., Анстотс Т., Эберле А., Эрнстпуч Л., Хольцхаузер Й.-Ф. Оптимизация технологического процесса и качества коррозионностойкой полосы на основе системы контроля поверхности // Черные металлы. 2005. № 3. С. 45-56.
7. Мазур И.П., Басуров А.В., Ненахов В.А., Тищенко Д.А. Развитие системы контроля качества поверхности горячекатаных полос стана 2000 // Авиакосмические технологии «АКТ-2004»: Труды 5-ой Международной науч.-техн. конф. Ч.П. – Воронеж: ВГТУ, 2004. С. 71-76.
8. Тищенко Д.А. Разработка алгоритмов контроля, режимов подготовки и эксплуатации рабочих валков чистовой группы НШСГП для обеспечения качества проката : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05. Защищена 26.10.06 г. в дис. совета Д 217.038.01. – М: ОАО «Институт Цветметобработка», 2006. – 22 с.
9. Мазур И.П. Информационное обеспечение производства горячекатаного проката / Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: Труды международной науч.-техн. конф. - СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2007. С.243-248.