

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОКАЛИНЫ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ ПРОКАТНОГО СТАНА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ

Study of the scale behaviour in the finishing mill to improve the strip surface quality / D. Espinosa, G. Lannoo, J. Malbrancke et al. // La Revue de Metallurgie – CIT. 2009. № 11. С. 518–528. Англ., рез на фр.

Исследовательская работа была нацелена на изучение поведения оксида в очаге деформации первых клетей, в особенности растрескивания окалины при горячей прокатке, что ведет к образованию дефектов типа вкатанной окалины. С этой целью был использован опытный прокатный агрегат в исследовательском центре CRM, Бельгия.

Этот агрегат для горячей прокатки позволяет вести непрерывную прокатку малоразмерных рулонов (максимальный диаметр 1700 мм, максимальная ширина полосы 200 мм, толщина 2–4 мм) в условиях, близких к условиям промышленной горячей прокатки (рис. 1). Печной размотчик имеет контролируруемую инертную среду под давлением несколько выше атмосферного, что позволяет избежать окисления при нагреве. На выходе из печи установлено устройство индукционного нагрева, которое служит для поддержания и изменения температуры. Расстояние между размотчиком и прокатной клетью во время эксперимента остается постоянным. При данной скорости полосы температура на выходе из индуктора, и расстояние от устройства нагрева до прокатной клетки определяют температуру деформации полосы и толщину оксидной пленки на входе в валки (первичная окалина). Полоса деформируется в первой клетке. Сразу после выхода из раствора валков она подвергается быстрому охлаждению в закалочном устройстве WPC, и таким образом эволюция окалины “замораживается”. Валки второй клетки во время эксперимента остаются раскрытыми. Во время короткой остановки во время эксперимента за второй клетью отбираются образцы полосы. Следует отметить,

что температура полосы в этот момент ниже 150 °С, что исключает дальнейшую эволюцию окалины.

Исследования проводили на стали общего назначения марки ELC — горячекатаной травленной полосе толщиной 2,27 мм. Прокатные валки изготовлены из стали HSS. Очевидно, что во время эксперимента окалина может расти в нескольких местах. Ту окалину, которая образовалась за время пребывания полосы между размотчиком и первой прокатной клетью, авторы рассматривали как первичную. Вторичная окалина образуется тогда, когда первичная разрушена перед входом в валки или непосредственно в валках. После выхода из валков возможен рост третичной окалины.

В экспериментах оценивали влияние на окалину температуры деформации, относительного обжатия, исходной толщины окалины, скорости прокатки, смазки, охлаждения поверхности, влажности, износа рабочих валков (табл. 1 и 2). Толщину окалины определяли на основе анализа изображений по меньшей мере в четырех сечениях каждого образца и путем пересчета в толщину измеренного изменения массы при травлении.

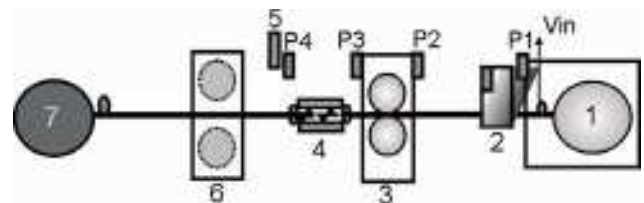


Рис. 1. Схема агрегата горячей прокатки:
 1 — размотчик; 2 — индуктор; 3 — клеть 1;
 4 — устройство водяного охлаждения (закалки);
 5 — лазерный измеритель скорости на выходе из клетки; 6 — клеть 2; 7 — моталка

ТАБЛИЦА 1. УСЛОВИЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ОПЫТНОМ АГРЕГАТЕ

Параметры	Специальные условия
Температура нагрева, °С: 900, 950, 1050	Базовый режим Смазка Регулирование температуры деформации Регулирование скорости прокатки
Относительное обжатие, %: 10, 30, 50	RH 100 % (65, 55, 25) DP °С Регулирование влажности Применение камеры OLM (микроскопии в реальном времени)
Скорость прокатки, м/с: 0,2; 0,05	Износ рабочих валков

ТАБЛИЦА 2. ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ОДИНАКОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗНОЙ ОЦЕНОЧНОЙ ТОЛЩИНЕ ОКАЛИНЫ

Образец	Толщина окалины, мкм	Обжатие R, %	Температура деформации, °С	Оценочная толщина окалины на входе, мкм
V1050-013-30	21,04	32,56	829	27,89
V950-013-30	16,62	31,29	829	21,84
V900-028-030	7,87	31,99	828	10,39
R900-02-30	9,32	32,8	804	14,3
V950-01-30	18,51	30,11	785	24,32

Измерение толщины окалины дало сходные результаты во всех экспериментах, где не задавали особых условий, таких как смазка, охлаждение поверхности и др. На рис. 2 показан результат оценки изменения толщины окалины при прокатке со скоростями 0,2 и 0,05 м/с и разных температурах. Толщина окалины уменьшается при снижении температуры нагрева под прокатку/температуры входа в валки, при повышении скорости прокатки и относительного обжатия.

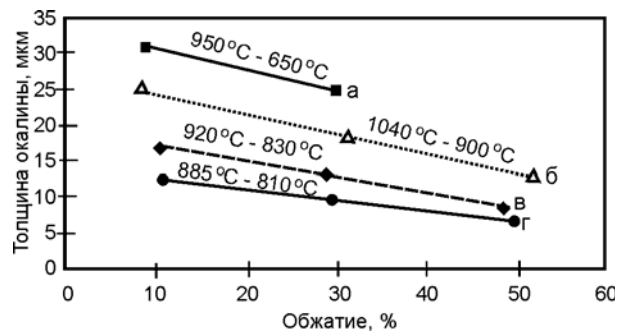


Рис. 2. Зависимость толщины окалины от обжатия при изменении температуры металла на выходе из индуктора (первая цифра у кривых); температуры на входе металла в валки (вторая цифра у кривых) и скорости прокатки (а — 0,05 м/с, б, в, г — 0,2 м/с)

Результаты испытаний отражают явную зависимость роста оксидного слоя и изменения температуры от времени перемещения полосы до входа в валки. Толщина окалины продолжает расти при всех температурах и в течение продолжительного времени. При температуре нагрева 900 °С спустя 33 с температура составляет 690 °С, и в это время окисление полосы все еще продолжается.

Определили шероховатость поверхности контакта сталь/окалина после деформации в валках путем анализа изображения поперечного сечения и прямым измерением шероховатости после травления образца. При анализе изображения полученную картину конвертировали в черно-белое изображение и по разнице окраски строили линию профиля. Координаты линии экспортировали в файл Excel и подвергли анализу. Вычисляли среднюю высоту Ra микронервно-

стей, максимальную высоту Ru и площадь под кривой.

Обжатие полосы сильно влияет на шероховатость поверхности контакта. Как показано на рис. 3, шероховатость увеличивается с увеличением обжатия. Влияние температуры деформации выражено слабее, но все же присутствует: шероховатость увеличивается при повышении температуры

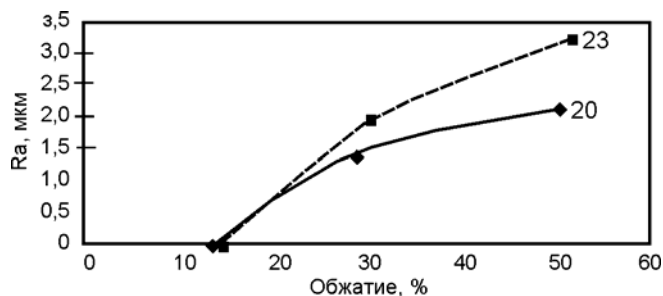


Рис. 3. Шероховатость поверхности контакта (Ra) при температуре деформации 900 °С (◆) и 950 °С (■). Цифры у кривых — толщина окалины

Шероховатость поверхности сильно зависит от пластичности окалины и основного металла при обжатии во время прокатки — при пластичной окалине возможна достаточно гладкая поверхность контакта, но если окалина при прокатке разрушается, то формируется шероховатая поверхность. Пластичность окалины зависит от ее химического состава, толщины и температуры образования. При образовании окалины в диапазоне температур 700–900 °С она состоит более чем на 90 % из пластичного вюститита, а при температуре выше 900 °С увеличивается количество твердого гематита.

Анализ растрескивания проводили по трем признакам: расстояние между трещинами, раскрытие трещин и выдавливание стали через трещины. Пользуясь методом точечного подсчета на поверхности и на изображениях поперечного сечения, измерили расстояния между трещинами в окалине на полосе при прокатке на разных режимах. Видно, что с увеличением толщины окалины на входе расстояние между трещинами увеличивается; расстояние между

трещинами сильнее зависит от исходной толщины окалины, чем от температуры деформации.

Трещины раскрыты сильнее при малых обжатиях полосы. При более высоких обжатиях ширина трещин в окалине меньше. При 30 %-ном обжатии растрескивание окалины выглядит таким же, как и при малом обжатии, то есть интенсивность образования трещин сохраняется, но, как можно наблюдать в поперечном сечении, трещины остаются закрытыми. При 50 %-ном обжатии трещины на поверхности вообще не просматриваются, а в поперечном сечении видно, что трещины закрыты, и виден также значительный наклон трещин.

Трещины, образованные до входа в валки под действием натяжения, в дальнейшем при прокатке

раскрываются в результате значительной вытяжки полосы; эти трещины способствуют вытеснению неокисленного металла, что приводит к увеличению шероховатости контактной поверхности. Тем не менее, на поверхности окалины нагрузки, которые развиваются в результате трения между валками и окалиной в очаге деформации в валках, превышают предел текучести окалины, при этом “зерна” оксида деформируются, трещины закрываются, и поверхность выглядит гладкой (рис. 4). При более высоких температурах нагрева образуется более толстая окалина, поэтому ширина трещин зависит от толщины окалины на входе в валки в той же мере, как и от температуры, а когда увеличивается толщина окалины, растет и ширина трещин.

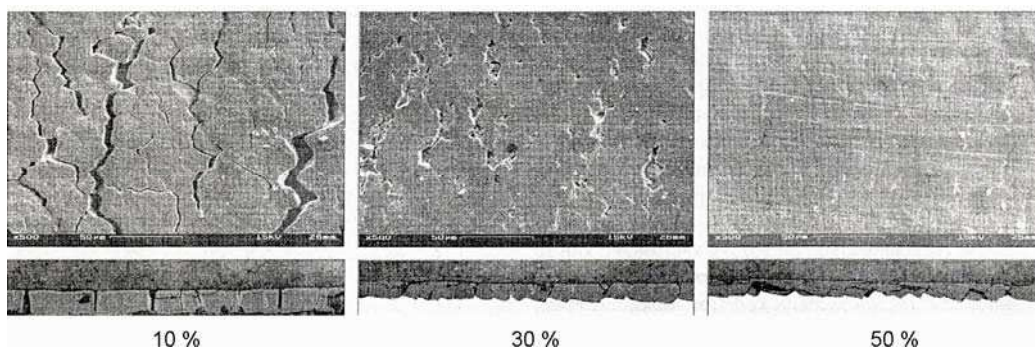


Рис. 4. Ширина трещин в функции деформации полосы

На рис. 5 показано влияние толщины окалины на входе в валки на ее дальнейшее поведение. Эти образцы имели разные температуры нагрева: 1050, 950 и 900 °С, что привело к образованию окалины разной толщины. Задавая разные скорости прокатки, 0,13 и 0,28 м/с, можно получить для всех образцов

приблизительно одинаковую температуру деформации, равную 829 °С. Шероховатость контактной поверхности и высота выдавливания металла меньше при наиболее тонкой оксидной пленке. Как упоминали выше, кроме толщины окалины может повлиять также температура окалинообразования.

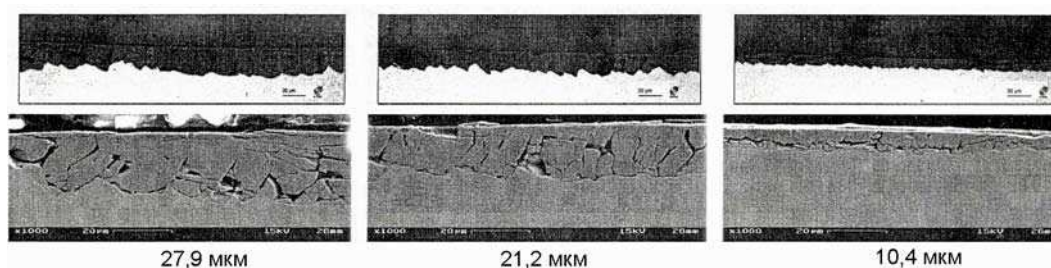


Рис. 5. Поперечное сечение образцов (цифры — толщина окалины)

Таким образом, даже при одинаковой температуре деформации твердая и толстая окалина, образованная при высокой температуре нагрева, сильно вдавливаются в основной металл, а пластичная и тонкая окалина, образованная при более низкой температуре на-

грева, легко приспособляется к деформации основного металла.

Согласно наблюдениям, шероховатость контактной поверхности, высота выдавливания металла и расстояние между поперечными трещинами лишь

слабо изменяются при изменении температуры деформации.

Для изучения адгезии окалины провели испытание на растяжение образцов со слоем окалины. После удлинения на 0, 2, 5 и 10 % на поверхность наклеивали клейкую ленту, чтобы взять образцы окалины. При таком методе некоторое количество окалины отслаивается, остается на ленте и позволяет провести измерения. Путем анализа изображения определяли долю отслоившейся окалины, которая характеризовала адгезию окалины. При всех температурах нагрева адгезия тем сильнее, чем выше обжатие. После нагрева до 1050 °С и прокатки с обжатием около 50 % при испытании на растяжение отслаивание окалины после 10 %-ного удлинения составило 50 %, а после 10 %-ного удлинения — почти 100 %.

Как уже определили ранее, шероховатость поверхности контакта и основного металла увеличивается с повышением обжатия при прокатке. Когда увеличивается шероховатость, адгезия окалины к стали усиливается; сталь сцепляется с основанием оксидных зерен и с их периферией. При плоской контактной поверхности прочное сцепление окалины с подложкой невозможно в силу малой площади соприкосновения оксидных зерен и стали. Одним из наиболее важных факторов влияния служит толщина слоя окалины на входе в валки. Прочность адгезии снижается при увеличении толщины окалины на входе в прокатную клетку, что можно объяснить нарастанием напряжений в контакте между металлом и окалиной.

Здесь важно отметить возможность ущерба, который приносит прочности сцепления увеличение толщины слоя окалины: если окалина имеет большую толщину, в ней образуются трещины, направленные либо по толщине слоя, либо параллельно контактной поверхности. Когезия, то есть внутреннее сцепление толстой окалины, может оказаться слабее, чем у тонкой, из-за возможности продольных трещин (параллельно направлению прокатки). Некоторые крупные зерна могут отделяться от толстого оксидного слоя легче, чем хорошо сцепленные зерна в тонком слое. Влияние температуры деформации на некоторые характеристики окалины было незначительно. Проанализировали ее влияние и на прочность сцепления окалины с металлом.

Для исследования воздействия смазки провели специальные эксперименты с подачей и без подачи на полосу эмульсии, чтобы оценить влияние смазки на поведение окалины при прочих равных условиях прокатки (температуру на выходе из устройства индукционного нагрева настроили равной 900 °С, расстояние между размотывателем и прокатной клеткой равнялось 2 м; выполнили прокатку со скоростями 0,2 и 0,05 м/с и относительным обжатием 10,

30 и 50 %). Каждый образец изучали под растровым электронным и под оптическим микроскопом, определяли толщину окалины методом анализа изображений, травлением и измерением в поперечном сечении.

Согласно полученным данным, применение смазки, по-видимому, тормозит рост слоя окалины, его толщина оказывается меньше, чем при отсутствии смазки. При прокатке с высоким обжатием и смазкой сильно выражен наклон трещин в слое окалины, контактная поверхность — гладкая, меньше вероятность выдавливания металла. При малых обжатиях смазка мало влияет на показатель Ra.

Смазка, по-видимому, препятствует “залечиванию” трещин. При всех скоростях прокатки со смазкой окалина имеет повышенную плотность трещин и меньшее значение D (расстояние между трещинами). Образцы после “сухой” прокатки проявили более высокую адгезию окалины, чем после прокатки со смазкой. Меньшая шероховатость Ra и более высокая плотность трещин при прокатке со смазкой влияют на когезию слоя окалины и его сцепление с основным металлом; окалина легче отслаивается при испытании на растяжение с соответствующим удлинением.

Для экспериментов с влажностью в исследовательском центре CRM сконструировали увлажняющее устройство, которое встроили в опытный прокатный агрегат. Устройство поместили между нагревательной печью и прокатной клеткой № 1. Точка росы (DP) в системе равнялась 65, 55 и 25 °С, и при каждом значении точки росы выполняли прокатку с относительным обжатием 10, 30 и 50 %.

Первое наблюдение, сделанное на образцах, состояло в том, что ни при каком обжатии при прокатке не проявилось отслаивание окалины из-за охлаждения и деформации при прокатке. Вероятно, проявилось влияние на прочность адгезии окалины, так как в устройстве охлаждения (WPC, см. рис. 1) на выходной стороне клетки оксидный слой не отделился ни на одном образце. При исследовании обнаружили значительное отличие толщины слоя окалины при высоких значениях точки росы. Так, при DP = 65 °С толщина окалины на входе в валки равнялась 30 мкм, при DP = 55 °С она составляла около 17 мкм, а при DP = 25 °С окалина имела толщину 14 мкм.

Анализ образцов в поперечном сечении также показал, что в присутствии водяного пара пластичность окалины повышается, и деформация оксида сильнее, чем деформация стальной основы.

Измерение ширины трещин показало, что присутствие водяного пара с точкой росы 65 °С повлияло на эти параметры окалины. Во внешней части оксидного слоя присутствует больше трещин, а при высокой деформации полосы трещины шире, чем в

экспериментах при обычных условиях. Тем не менее при точке росы 65 °С имеет место выдавливание неокисленного металла в окалину, а трещины при 50 %-ной деформации короче и не достигают поверхности контакта окалины и основного металла, то есть внутренняя часть оксидного слоя была способна деформироваться в той же мере, что и основной металл.

Влажный воздух влияет и на адгезию окалины. После прокатки при точке росы 65 °С и последующего испытания на растяжение окалина при том же удлинении отделялась с большим трудом, чем в экспериментах с более низкой точкой росы.

На опытном прокатном агрегате установили разработанную в исследовательском центре CRM систему инспектирования поверхности полосы с

микроскопом в реальном времени (OLM). Этот микроскоп использовали для наблюдения поверхности полосы на выходе из валков прокатной клетки, перед устройством охлаждения, чтобы проследить растрескивание оксидного слоя в реальном времени. Сначала по этому методу проинспектировали горячие поверхности. Трещины, которые наблюдали с помощью системы инспектирования поверхности полосы в реальном времени перед охлаждением, имели характер, сходный с характером трещин под растровым электронным микроскопом после охлаждения полосы. Дополнительные трещины при охлаждении не возникали даже тогда, когда полоса при выходе из валков, перед быстрым охлаждением, имела высокую температуру.

Реф. А.В. Зиновьев

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРЕЗИ: УМЕНЬШЕНИЕ ОТХОДОВ И РАСХОДА ЭНЕРГИИ

Crop optimization: Waste and energy reduction explained / Fletcher N. // Steel Times International. 2009. № 10. С. 29, 30. Англ.

С 1945 г. при производстве стального проката удельный расход энергии уменьшился на 60 %, все же в основном уменьшение расхода энергии было обеспечено при выплавке чугуна и стали, и совсем малая экономия энергии относится к горячей прокатке. При этом при производстве чугуна все еще потребляют 70–80 % энергии, нужной на заводе с полным металлургическим циклом, так что масштаб мероприятий по общему уменьшению расхода энергии на заводе мало связан с данными, относящимися к прокатанной стали. Тем не менее, дальнейшее повышение эффективности производства и экономия энергии могут быть достигнуты за счет уменьшения потерь горячекатаной продукции на выходе за счет оптимизации обрезки.

Автор (фирма “Siemens VAI MT”, Великобритания) ограничился описанием оптимизации обрезки на полосовых станах горячей прокатки, хотя следует отметить, что можно достигнуть значительного повышения выхода продукции на толстолистовых и крупносортовых станах.

В результате прокатки в черновой клетке раскат часто имеет нерегулярную форму переднего и заднего концов. Формы этих концов были систематизированы для их легкого изображения (рис. 1). По форме, геометрии и механическим свойствам концы отличаются от основной части полосы. По-

этому оптимизация размеров обрезки является актуальной задачей. Чтобы определить лучшее положение реза, необходимо измерить форму переднего и заднего концов. Один метод измерения заключается в использовании стереоскопической камеры, разработанной в конце 70-х годов прошлого века. Она состоит из двух отдельных камер с однострочной разверткой, находящихся в одном корпусе. Перед каждой камерой находится линза, которая позволяет охватить всю ширину рольганга.



Рис. 1. Формы переднего и заднего концов: 1 — симметричная D-образная; 2 — асимметричная D-образная; 3 — “рыбий хвост”; 4 — “собачья кость”

Стереоскопическая система технического зрения может компенсировать поворот, подъем и лыжеобразный конец полосы. Когда передний и задний концы полосы проходят под камерой, эта система строит изображение формы концов, причем каждая горизонтальная линия представляет собой результат одного сканирования.

Нахождение оптимального сечения резки становится более трудным делом, когда отмечается форма в виде “рыбьего хвоста”. Поэтому оптимальное сечение резки надо передвигать назад до тех пор, пока