

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.017:621.771.25

Э. В. ПАРУСОВ¹, А. Б. СЫЧКОВ², С. И. ГУБЕНКО³, И. Н. ЧУЙКО⁴, Л. В. САГУРА^{5*}

¹Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

²Каф. «Литейное производство и материаловедение», Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, пр. Ленина, 38, Магнитогорск, Российская Федерация, 455000, тел. +7 (919) 348 66 84, эл. почта absychkov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

³Каф. «Материаловедение», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 374 83 57, эл. почта sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5427-1154

⁴Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта ichuiko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

^{5*}Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, Национальная академия наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, Украина, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, эл. почта slv_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ОКАЛИНЫ И ОБЕЗУГЛЕРОЖЕННОГО СЛОЯ БУНТОВОГО ПРОКАТА

Цель. В работе необходимо установить универсальные эмпирические зависимости, которые позволят произвести оперативный расчет массы окалины и глубины обезуглероженного слоя, основываясь на параметрах технологического процесса производства бунтового проката. **Методика.** Исследования выполнены на промышленных партиях проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065. Удаляемость окалины определяли в соответствии с методикой компании «Beaert» по спецификациям: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. Глубину обезуглероженного слоя идентифицировали по ГОСТ 1763-68 (метод М). **Результаты.** Анализ экспериментальных данных позволил определить рациональные температуры виткообразования проката исследуемых марок стали, которые обеспечивают наилучшее удаление поверхностной окалины, минимальное ее количество, а также соответствие цвета поверхности металла требованиям европейских потребителей. **Научная новизна.** Авторами установлена корреляционная связь нормируемых качественных показателей бунтового проката из высокоуглеродистой стали (масса окалины, глубина обезуглероженного слоя и межпластиночное расстояние в перлите) с одним из главных параметров (температурой виткообразования) режима деформационно-термической обработки. Полученные уравнения регрессии позволяют, без применения металлографического анализа, с минимальной погрешностью определить количественные значения массы окалины, глубины обезуглероженного слоя и среднего межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката из высокоуглеродистой стали. **Практическая значимость.** В соответствии со спецификациями компании «Beaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01) разработана и внедрена в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности бунтового проката из низко- и высокоуглеродистых марок сталей. Разработан экспресс-метод определения общей и остаточной масс окалины на поверхности бунтового проката из низко-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

и высокоуглеродистой марок сталей в зависимости от температуры виткообразования. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

Ключевые слова: бунтовой прокат; окалина; обезуглероженный слой; деформационно-термическая обработка

Введение

При аттестации горячекатаного бунтового проката из высокоуглеродистых марок сталей одними из важных показателей его качества, которые подвергаются нормированию и контролю, являются масса окалины и глубина обезуглероженного слоя на поверхности проката.

Стальная заготовка, из которой производят бунтовой прокат, при нагреве в печи перед горячей деформацией контактирует с продуктами горения природного газа, в результате на ее поверхности развиваются процессы обезуглероживания и окалинообразования. В случае, если заготовка имеет значительные поверхностные дефекты (трещины), которые не удаляются при естественном угаре металла в печи, то в бунтовом прокате они могут проявляться в виде локальных зон окисления и обезуглероживания, проникающих от поверхности вглубь металла. Такие дефекты снижают комплекс механических свойств готового металлопроката. Рационально выбранные температурно-скоростной регламент нагрева заготовки и атмосфера печи, позволяют добиться минимальной потери металла (не более 0,9 %), а имеющиеся неглубокие поверхностные дефекты на заготовке удаляются в процессе естественного угара металла в печи.

После горячей пластической деформации заготовки, при выходе проката из последней клетки чистового проволочного блока осуществляют его водяное охлаждение, а затем раскладку на витки транспортера линии Стелмор, где происходит повторное окалинообразование на поверхности металла, называемое вторичной окалиной. Масса окалины и глубина обезуглероженного слоя являются аттестационными показателями бунтового проката, ввиду чего они всегда регламентируются нормативной документацией и сертификатами качества на металлопродукцию [11, 8, 6]. Логично предположить, что первичная окалина, образующаяся на поверхности заготовки в нагревательной печи, оказывает влияние только на степень угара ме-

талла, защищая его от обезуглероживания. Однако, на практике прослеживается тесная взаимосвязь температуры виткообразования и глубины обезуглероженного слоя, которая может изменяться в достаточно широком диапазоне (3,0–1,0 % от диаметра бунтового проката).

Фазовый состав окалины, образующейся в процессе охлаждения проката, оказывает влияние на степень ее удаления с поверхности металла вне зависимости от выбранного способа (химический или механический) и является важным технологическим параметром при подготовке поверхности металла к последующему волочению. Окалина должна легко удаляться, а поверхность металла иметь при этом голубовато-серый оттенок [17]. Медленное охлаждение проката в интервале температур 570–450 °С приводит к выделению магнетита и α -железа из вюстита, наибольшая скорость распада последнего происходит при температуре ~ 480 °С. При достаточно больших скоростях охлаждения распад вюстита удается практически подавить [15, 13], тем самым обеспечивая хорошую удаляемость окалины.

Согласно [15, 13, 14, 23, 5] окалина, которая состоит из вюстита и имеет толщину слоя более 10 мкм по сравнению с другими ее модификациями, наиболее легко удаляется с поверхности бунтового проката как механическим, так и химическим способами.

Масса окалины на поверхности проката возрастает с повышением температур горячей деформации и виткообразования, а также при снижении скорости воздушного охлаждения [13, 22, 4]. Однако исследования, выполненные в работах [5, 4], позволяют утверждать, что на массу образующейся окалины, а также глубину обезуглероженного слоя наиболее значимое влияние оказывает один из главных параметров режима деформационно-термической обработки – температура виткообразования проката.

В работе [4] показано, что при охлаждении проката в потоке непрерывного проволочного стана на линии Стелмор масса окалины на поверхности металла уменьшается при снижении

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

температури окончания водяного охлаждения и повышении скорости воздушного охлаждения. Химический состав стали оказывает различное влияние на степень удаления окалины. К примеру, медь и сера улучшают удаление окалины при механическом способе, кремний и никель оказывают абсолютно противоположное воздействие, а легирование стали хромом и вовсе не существенно [13]. Ввиду того, что при скоростях воздушного охлаждения проката более 10 °C/c масса окалины изменяется незначительно, а химический состав высокоуглеродистой стали на металлургических предприятиях отличается несущественно, то влияние этих факторов в настоящей работе не рассматривалось.

Необходимо отметить, что достижение требуемого результата в условиях промышленных предприятий всегда основывается на стратегии управления инновационной деятельностью, что позволяет снизить расход энергетических ресурсов и повысить экологическую безопасность производственного процесса [12]. Сегодня, в странах ЕС, при подготовке поверхности проката к волочению преимущество отдается исключительно механическому способу удаления окалины, вследствие дешевизны и экологической чистоты такого процесса. При этом на металлургических предприятиях используют различные методы определения массы окалины на поверхности бунтового проката [7, 19, 21]. В мировой практике существуют нормативные документы, которые содержат методики, регламентирующие определение общей и остаточной масс окалины на поверхности металла, а также ее способности к удалению.

Лидирующие позиции по переработке бунтового проката широкого марочного сортамента занимает Бельгийская компания «Beckaert», которая контролирует до 20 % мирового рынка метизной продукции. Требования, предъявляемые к окалине на поверхности проката из высокоуглеродистой стали, подробно изложены в спецификации компании «Beckaert» GS-03-16. Масса окалины определяется при помощи взвешивания с точностью до 0,001 г по следующей методике: производят отбор образцов от горячекатаного проката и взвешивают их (G_1), затем оба конца образца (длиной 50,0 мм) подвергают химическому травлению до полно-

го удаления окалины и осуществляют повторное взвешивание (G_2). Травленные концы металла зажимаются в захваты разрывной машины и при помощи экстензометра осуществляют 6–7 % растяжение образца, а затем выполняют взвешивание образца (G_3). После растяжения образец подвергают химическому травлению до полного удаления окалины и выполняют окончательное взвешивание (G_4). Используя полученные значения результатов взвешиваний, расчетным методом определяют общую (A , кг/т) и остаточную (C , кг/т) массы окалины, а также способность к удалению окалины механическим способом с поверхности проката (B , %).

В целом, представленная методика направлена на определение остаточной массы окалины на поверхности бунтового проката и пригодна для использования механического способа ее удаления. При этом существует вероятность возникновения определенной погрешности, которая обусловлена травлением концов испытуемого образца. При наличии легко удаляемой окалины на поверхности металла, когда содержание вюстита на границе раздела металл-окалина составляет до 80 %, химическое травление образцов может привести к растворению металлоосновы, несмотря на наличие в травильном растворе ингибитора [16]. Однако такое утверждение не подтвердилось на практике ввиду невозможности обеспечения требуемой чистоты эксперимента.

Методика П. Функе мл. и М. Хайнритца [20] близка к методике компании «Beckaert» и основана на растяжении образца до 5 %.

Отличительная особенность методики заключается в том, что не проводят повторное химическое травление концов испытываемых образцов, благодаря чему исключается погрешность определения остаточной массы окалины.

Методика компании «Kobe Steel» [17], которая была предложена Робертсом и М. И. Мэннингом, основана на эмпирической зависимости и базируется на механике разрушения. При этом методика хорошо согласуется с существующей концепцией: лучшие характеристики удаления окалины обеспечиваются при повышении толщины слоя окалины и более гладкой поверхности проката.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Методика ОАО «Молдавский металлургический завод» в целом аналогична методике компании «Beckaert» GA-03-16. Отличительной особенностью является определение количества остаточной окалины, которое исключает ее зависимость от общей массы окалины.

Отделом термической обработки металла для машиностроения Института черной металлургии им. З. И. Некрасова разработана и опробована на стане 150-1 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» методика определения массы окалины на поверхности бунтового проката, охлажденного на линии Стелмор [17]. Количество окалины определяется расчетным методом, а в качестве исходных данных используются: масса окалины на поверхности горячекатаного металла (передний конец бунта), длина горячекатаной части бунта, масса одного погонного метра проката, масса окалины на поверхности проката, подвергнутого охлаждению, длина охлажденной части бунта и общая масса бунта.

Метод определения общей массы окалины на поверхности проката из высокоуглеродистых марок сталей, который применяется сегодня на металлургических предприятиях Украины, изложен в национальном стандарте ДСТУ 3683-98 (приложение Б) [9]. Согласно п. 6.1.5 ДСТУ 3683-98 образцы для всех видов испытаний, в том числе и определения массы окалины, для проката, охлажденного двухстадийным способом, отбираются от заднего конца раската, при этом не учитывается до 25 горячекатаных витков в головной части бунта.

Следует отметить, что определение способности окалины к удалению с поверхности проката на метизных предприятиях основано на 5–7 % растяжении исследуемых образцов, которое металл претерпевает при изгибе в устройстве окалиноломателя. В целом, рассмотренные методы разнообразны, а последовательность проведения требуемых операций и обработки данных различны и в ряде случаев специфичны. Методика «Kobe Steel» при оценке степени удаления окалины учитывает влияние шероховатости контактирующих поверхностей, модуль Юнга окалины и др. показатели. Методика П. Функе мл. и М. Хайнритца основана на определении фактической массы как общей, так и остаточной окалины через эмпирически полученное уравнение. Метод компа-

нии «Beckaert» (GA-03-16) основан на фактических расчетных значениях, а остаточное количество окалины после 6–7 % растяжения зависит от общей ее массы. Анализируя требования, предъявляемые к свойствам окалины по спецификации компании «Beckaert» следует отметить, что в комплексе они невыполнимы, так как часть из них противоречит друг другу. Так требование к общей массе окалины не более 7 кг/т и ее толщине 10–14 мкм является необоснованным ввиду того, что при указанной толщине слоя ее масса может составлять 8–12 кг/т [5].

На металлургических предприятиях постсоветского пространства обезуглероженный слой на поверхности бунтового проката определяют по ГОСТ 1763-68 (метод М). Согласно методике компании «Pirelli» (спецификация № 18.V.005) определяют среднюю глубину обезуглероженного слоя по 8 условно разделенным секторам поперечного сечения проката и максимальную по отдельному сектору. Главная трудность заключается в измерении длин участков обезуглероживания для каждого из секторов, что оказывает влияние на точность определения.

На заводе РУП «БМЗ» (г. Жлобин) разработан метод металлографического определения обезуглероженного слоя по периметру проката диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистых сталей, в соответствии с которым обезуглероживание определяется на исследуемых образцах через каждые 0,24 мм, что соответствует выполнению замеров в 72 точках. Расчет глубины обезуглероженного слоя поверхности проката рассчитывается в «штрафных» баллах.

При увеличении диаметра исследуемого образца количество замеров пропорционально увеличивается, что является достаточным условием для объективной оценки глубины обезуглероженного слоя. Предложенная методика является универсальной, но при этом весьма трудоемкой.

В работе [18] показана возможность определения общей массы окалины, глубины обезуглероженного слоя и среднего межпластиночного расстояния в перлите при известном одном из указанных показателей. Однако для определения этого показателя требуется проведение металлографического анализа или наличие дополнительного лабораторного оборудования [4, 5].

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Основные недостатки рассмотренных методов связаны с применением специального исследовательского оборудования (оптический микроскоп, разрывная машина, высокоточные аналитические весы и т.д.), продолжительностью во времени, трудоемкостью выполняемых операций и соответствующей квалификацией рабочего персонала. Перечисленные недостатки снижают оперативность определения общей массы окалины и глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката при изменяющихся технологических параметрах режима деформационно-термической обработки металла.

Цель

Установить универсальные эмпирические зависимости, которые позволят произвести оперативный расчет массы окалины, глубины обезуглероженного слоя и других качественных показателей бунтового проката, основываясь на параметрах технологического процесса его производства.

Материал и методика исследований. Исследования выполнены на промышленных партиях бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065, химический состав которых соответствовал стандарту ASTM A 510M (табл. 1). Удаляемость окалины определяли в соответствии с методиками компании «Beckaert» по спецификациям: GA-03-16 «Количественное определение общей и остаточной масс окалины и способности к ее удалению с поверхности проката из низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей», GA-03-18 «Испытание на удаление окалины механическим способом с поверхности проката из низкоугле-

родистой стали», GS-03-02 «Прокат из низкоуглеродистой стали для механического удаления окалины», GS-06-01 «Прокат из высокоуглеродистой стали качества Стелмор». Глубину обезуглероженного слоя идентифицировали в соответствии с ГОСТ 1763-68 (метод М). Используемые приборы и оборудование: разрывная машина «P-50», раствор соляной кислоты с ингибитором ТДА, подготовленный в соответствии с требованиями ДСТУ 3683-98, высокоточные весы «JD 100» с точностью взвешивания 0,001 г, рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0, световые оптические микроскопы «Neophot-21», «Axiovert 200M MAT», электронный растровый микроскоп «VEGA TS5130MM».

Результаты

Разработка нового метода заключалась в создании способа определения массы окалины и глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката, который бы не требовал применения вышеуказанных операций и характеризовался достаточной универсальностью и оперативностью при изменении одного из главных параметров режима деформационно-термической обработки металла (температуры виткообразования).

Новый способ определения массы окалины и глубины обезуглероженного слоя на поверхности металла предусматривает возможность оперативной корректировки режима охлаждения проката, изготавливаемого на проволочном стане при изменяющихся технологических параметрах его производства.

Таблица 1

Химический состав бунтового проката по ASTM 510/510M

Table 1

Chemical composition of rolled coil steel by ASTM 510/510M

Марка стали	Диаметр проката, мм	Химический состав стали, % (масс.)							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
SAE 1006	5,5	0,07	0,36	0,06	0,007	0,023	0,028	0,017	0,028
SAE 1065	5,5	0,65	0,71	0,25	0,024	0,029	0,050	0,020	0,050

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Решение поставленной задачи обеспечивалось тем, что разработанный способ основывается на фактическом измерении массы окалины и глубины обезуглероженного слоя, которые определяются в реальных производственных условиях с использованием стандартного промышленного оборудования. При проведении исследований раскладку металла витками на транспортер при помощи виткоукладчика производили в интервале температур (800–940) ± 20 °С, с шагом в 50 °С. Для каждой из температур виткообразования измеряли глубину обезуглероженного слоя (по ГОСТ 1763-68) и рассчитывали массу окалины на поверхности бунтового проката, изготовленного из сталей SAE 1006 и SAE 1065 (см. табл. 1). Для расчета массы окалины на поверхности проката (из низко- и высокоуглеродистых сталей) в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» разработана методика на базе спецификаций GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01 компании «Beaert», в соответствии с которой отбирают образцы длиной 300,0 мм от горячекатаного металла, не подвергают правке и выполняют взвешивание (G_1). Затем на обоих концах образцов наносят идентификационные надрезы, травят в растворе кислоты (глубина погружения 50,0 мм, время травления 15 минут), после чего концы образцов промывают и сушат, затем выполняют взвешивание (G_2). Последующее растяжение образцов с остаточным удлинением 6 % (прокат из стали SAE 1065) и 7 % (прокат из стали SAE 1006) выполняют таким образом, чтобы рабочая длина образцов между захватами разрывной машины составляла 200,0 мм. Удаление остатков окалины с поверхности металла осуществляют при помощи четырехкратного обдува сжатым воздухом, при этом каждый раз образец поворачивается на 90°, затем производят взвешивание (G_3) и оценивают состояние поверхности в соответствии с эталонными фотографиями (рис. 1). Оставшаяся окалина на образце травится в растворе кислоты в течение 3 минут, после чего выполняют окончательное взвешивание (G_4).

Расчет общей (A , кг/т) и остаточной (C , кг/т) масс окалины, а также ее способности к удалению механическим способом (B , %) выполняется по формулам (1–3):

$$A = (G_1 - G_4) \div G_1 \cdot 1000 \quad ,$$

$$C = (G_1 - G_4) \div G_1 \cdot \left(1 - \frac{(G_2 - G_3)}{(G_2 - G_4)} \right) 1000 \quad ,$$

$$B = (G_2 - G_3) \div (G_2 - G_4) \cdot 100 \quad .$$

Согласно работы [1], точность опыта определяется величиной отклонения измеренного значения от действительного, с ошибкой (погрешностью) эксперимента. Расчеты показали, что в зависимости от точности взвешивания образцов погрешность эксперимента будет различной: при точности весов 0,001 г – 17 %, при 0,005 г – 85 %. В связи с этим при проведении исследований образцы взвешивали на высокоточных аналитических весах с точностью до 0,001 г.

Шаблон для выполнения маркировки и нарезки образцов приведен на рис. 2.

Зависимости определения общей и остаточной масс окалины на поверхности бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065 получены путем статистической обработки экспериментальных данных производственного процесса на проволочном стане (ПС-150-1) ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Проволочный стан оборудован линией водовоздушного охлаждения Стелмор с соответствующими контрольно-измерительными приборами. Бунтовой прокат из сталей SAE 1006 и SAE 1065 диаметром 5,5 мм прокатывался из непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм, нагрев и горячую деформацию проводили в соответствии с ТИ 228-П1-02-03. В табл. 2 представлены данные о температуре нагрева заготовок в печи.

Технологические режимы охлаждения бунтового проката на линии Стелмор приведены в табл. 3, а механические свойства бунтового проката – в табл. 4. Металлографические исследования показали, что номера действительных зерен изменяются в пределах 8–10 для стали SAE 1006 и 8–11 для стали SAE 1065, а разбег значений для каждого из режимов не превышает 2–3 номеров. При этом следует отметить, что для неохлажденного переднего конца бунтового проката обеих марок стали характерным является увеличение размеров действительного зерна на 1–2 номера. На по-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

верхности неохлажденного горячекатаного переднего конца бунтового проката из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065 общую массу окалины не удалось идентифицировать в полном объеме из-за ее скалывания при отборе и подготовке

образцов. Толщина слоя окалины на поверхности проката из стали SAE 1006 составляет 0,008–0,026 мм, а из стали SAE 1065 – 0,003–0,017 мм соответственно.

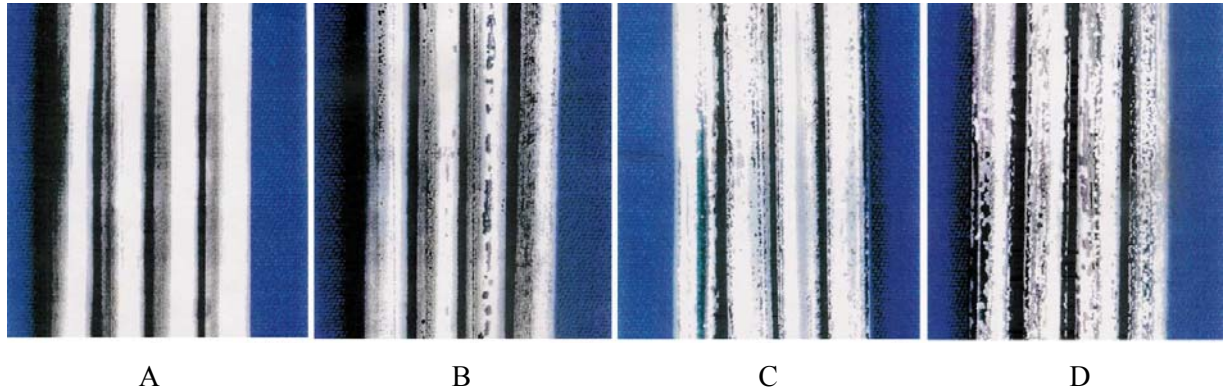


Рис. 1. Эталонная шкала определения типа (кода) состояния поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм [10]:
A – чистая серая поверхность проката; *B* – небольшие остаточные темные пятна или слабые следы окалины; *C* – значительная часть поверхности (20 %) покрыта темными пятнами или на субстрате проката отчетливо видны остатки окалины; *D* – крупные сплошные участки поверхности покрыты темными пятнами или на субстрате проката отчетливо видны остатки окалины

Fig. 1. Reference scale for determination of type (code) of surface state of the rolled coil steel of 5.5 mm diameter [10]:

A – clean grey surface of rolled steel; *B* – small residual dark spots or faint traces of scale; *C* – a significant part of the surface (20 %) is covered with dark spots or scale residues are clearly visible on the rolled substrate; *D* – large continuous surface portions are covered with dark spots or scale residues are clearly visible on the rolled substrate

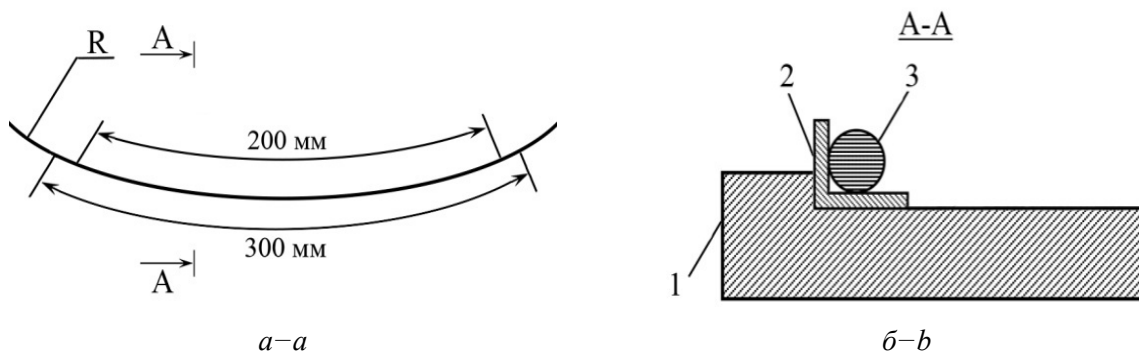


Рис. 2. Эскиз приспособления подготовки образцов для определения массы окалины и состояния поверхности по методике «Bekaert» [10]:
a – размер отбираемых образцов и рабочая длина образца; *R* – радиус витка проката; *b* – 1 – основание; 2 – угловой профиль с прорезами для полотна ножовки; 3 – горячекатаный бунтовой прокат

Fig. 2. Sketch of sample preparation tool for determination of scale mass and surface state by Bekaert method [10]:
a – size of selected samples and sample working length; *R* – rolled coil radius; *b* – 1 – basis; 2 – corner profile with hacksaw blade slots; 3 – hot-rolled coil steel

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

С целью изучения фазового состава окалины на поверхности бунтового проката, изготовленного по различным режимам двухстадийного охлаждения, окалину отбирали методом кручения при подготовке образцов.

Фазовый состав окалины определяли по дифрактограммам, полученным на установке ДРОН-2,0 в медном излучении с графитовым

монохроматором. На дифрактометре предварительно были записаны эталонные смеси, содержащие различные соотношения оксидов (вюстит, магнетит, гематит). Расшифровку дифрактограмм и идентификацию фаз осуществляли по дифракционным характеристикам эталонных смесей (табл. 5) и изменению значений углов дифракции.

Таблица 2

Температура нагрева металла в печи

Table 2

Metal heating temperature in furnace

Марка стали	Температура нагрева металла по зонам печи (± 20 °C), °C						
	зона 1	зона 2	зона 3	зона 4	зона 5	зона 6	зона 7
SAE 1006	720	730	1 090	1 200	1 160	1 205	1 215
SAE 1065							

Таблица 3

Параметры режимов двухстадийного охлаждения бунтового проката из сталей SAE 1006 и SAE 1065

Table 3

Parameters of two-stage cooling modes of rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	Марка стали	Скорость прокатки, м/с	Температура виткообразования, °C	Скорость транспортера на секциях (1–7) линии Стелмор, м/с	Положение теплоизоляционных крышек	Работа вентиляторов, об/мин
1–1	SAE 1006	86,8	800 \pm 20	0,50–0,55	все открыты	№1-7 – 900; №8-12 – откл.; № 13-14 – 200; № 15 – 150; № 16-17 – 100
1–2			850 \pm 20	0,50–0,55		
1–3			900 \pm 20	0,50–0,55		
1–4			940 \pm 20	0,50–0,55		
2–1	SAE 1065	86,8	800 \pm 20	0,50–0,55	все открыты	№17 – 900; №8-12 – откл.; №13-14 – 200; №15 – 150; №16-17 – 100
2–2			850 \pm 20	0,50–0,55		
2–3			900 \pm 20	0,50–0,55		
2–4			940 \pm 20	0,50–0,55		

Таблица 4

Механические свойства¹ исследуемого бунтового проката из сталей SAE 1006 и SAE 1065

Table 4

Mechanical properties of the tested rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	Место отбора проб ²	σ_B , МПа	δ_{10} , %	ψ , %	Номер действительного зерна ³	Толщина слоя окислы, мм
1-1	<i>o</i>	<u>390–400</u> 396,7	<u>29–34</u> 31,7	<u>71–72</u> 71,3	10; 9	0,009–0,011
1-2	<i>o</i>	<u>390–410</u> 401,7	<u>29–32</u> 30,3	<u>70–72</u> 70,7	10; 9	0,008–0,013
1-3	<i>o</i>	<u>385–385</u> 385,0	<u>31–33</u> 32	<u>75–77</u> 76,3	10; 9	–
1-4	<i>z</i>	<u>380–400</u> 388,3	30–31 30,3	75–76 75,7	9; 8	–
	<i>o</i>	<u>390–405</u> 396,7	<u>31–34</u> 32,3	<u>72–73</u> 72,3	10; 9	0,024–0,026
2-1	<i>o</i>	<u>1 000–1 040</u> 1 021,7	<u>11–12</u> 11,5	<u>47–49</u> 47,7	11; 10	0,008–0,009
2-2	<i>o</i>	<u>970–1 045</u> 1010	<u>12–14</u> 12,7	<u>45–47</u> 46,0	10; 9	0,008–0,010
2-3	<i>o</i>	<u>980–1 015</u> 998,3	<u>11–14</u> 12,5	<u>42–47</u> 44,7	10; 11	0,006–0,008
2-4	<i>z</i>	<u>1 070–1 130</u> 1 098,3	<u>9,2–11,0</u> 10,2	<u>39–42</u> 40	9; 8	0,003–0,004
	<i>o</i>	<u>1 060–1 115</u> 1 091,7	<u>11,5–12,5</u> 12,0	<u>39–42</u> 40	10; 11	0,016–0,017

Примечание: 1 – в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее; 2 – (*z*) – горячекатаный передний конец бунта, (*o*) – охлажденный задний конец бунта; 3 – испытания по ГОСТ 5639-82.

Таблица 5

Состав эталонных смесей для определения фазового состава окислы

Table 5

Composition of reference compounds for determination of scale phase composition

Состав эталонных смесей, % масс.			
№ 1	№ 2	№ 2	№ 4
33,3 % – Fe ₃ O ₄	10 % – Fe ₃ O ₄	25 % – Fe ₃ O ₄	50 % – Fe ₃ O ₄
33,3 % – Fe ₂ O ₃	5 % – Fe ₂ O ₃	15 % – Fe ₂ O ₃	50 % – FeO
33,3 % – FeO	85 % – FeO	60 % – FeO	

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

При расшифровке полученных дифрактограмм установлено, что количественное соотношение фазовых составляющих окалины при прочих равных условиях зависит главным образом от температуры виткообразования металла. Исследования показали, что при изменении температуры виткообразования на поверхности проката образуется окалина, состоящая из двух-трех фаз (табл. 6).

Точность количественного анализа зависит от представительности проб – количества вещества (окалины). В качестве связующего материала использовался вазелин. Применить метод гомологических пар в данном случае не представлялось возможным ввиду того, что он предназначен для двухфазных образцов. Способ наложения основан на использовании предварительно снятых эталонных (смесях известного состава) образцах, отличающихся между собой ступенчатым изменением отношения интенсивностей. После чего сравнивают интенсивность эталонных и исследуемых образцов.

Исследования показали, что при повышении температуры виткообразования металла на линии Стелмор в диапазоне температур 800–940 °С

количество окалины и глубина обезуглероженного слоя для проката из стали марки SAE 1065 изменяются следующим образом:

– при раскладке на витки при температурах 800, 850, 900 и 940 °С и последующего воздушного охлаждения средние значения общей масса окалины составляют: 3,85, 3,59, 3,36 и 9,19 кг/т, а остаточной – 0,11, 0,16, 0,18 и 0,22 кг/т соответственно;

– средняя глубина обезуглероженного слоя после охлаждения проката от температур 800, 850, 900 и 940 °С составляет – 0,11, 0,09, 0,08 и 0,05 мм соответственно.

Для проката из низкоуглеродистой стали, в частности SAE 1006, глубина обезуглероженного слоя не подвергается контролю ни одним из существующих нормативных документов, ввиду невозможности ее определения методом металлографического анализа, а количество окалины изменяется в таких диапазонах:

– при раскладке на витки при температурах 800; 850; 900 и 940 °С и последующего воздушного охлаждения средние значения общей массы окалины составляют: 4,64; 5,85; 10,33 и 11,17 кг/т, а остаточной – 0,67; 0,73; 0,30 и 0,33 кг/т соответственно.

Таблица 6

Фазовый состав окалины на поверхности бунтового проката марок SAE 1006 и SAE 1065

Table 6

Scale phase composition on the surface of rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	Марка стали	Температура виткообразования, °С	Количественное содержание оксидов железа, %		
			Вюстит (FeO)	Магнетит (Fe ₃ O ₄)	Гематит (Fe ₂ O ₃)
1-1	SAE 1006	800±20	~ 90	8–10	~ 2
1-2		850±20	88–90	10–12	–
1-3		900±20	~ 85	~ 15	–
		940±20	~ 80	~ 15	~ 5
1-4		горячекатаный передний конец бунта	75–80	20–15	~ 5
2-1	SAE 1065	800±20	85–88	10–12	~ 2
2-2		850±20	85–88	10–12	~ 2
2-3		900±20	83–85	~ 15	~ 2
2-4		940±20	80	17–15	3–5

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В табл. 7 приведені результати взвешиваний, расчета общей и остаточной масс окалины на поверхности металла, а также ее способности к удалению в зависимости от температуры виткообразования металла.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что для стали SAE 1006 наилучшая способность к удалению окалины составляет 96,8–97,5 % и 96,7–97,6 %, которая наблюдается на образцах металла, охлажденного до температур виткообразования 900 и 940 °С соответственно. Для указанного температурного диапазона характерным является и минимальное количество остаточной окалины на поверхности металла. Для проката из стали SAE 1065 наилучшие показатели по удаляемости окалины достигнуты при температурах виткообразования 800 и 940 °С – 95,9–98,3 %

и 97,3–97,9 % соответственно, а минимальное количество остаточной окалины на поверхности металла наблюдается при температуре виткообразования 800 °С. При снижении температуры виткообразования (при прочих равных условиях: скорости передвижения витков по роликовому транспортеру линии Стелмор, количеству задействованных единиц и режимов работы воздушных вентиляторов, положению теплоизоляционных крышек) общая масса окалины снижается, а остаточная возрастает. При температуре виткообразования 850 °С и ниже на поверхности металла образуется гематит характерного красно-рыжего оттенка (цвет ржавчины), что приводит к потере товарного вида металлопродукции и опасению потребителей относительно возможности дальнейшей ее переработки.

Таблица 7

Результаты испытаний по механическому удалению окалины с поверхности бунтового проката марок SAE 1006 и SAE 1065

Table 7

Tests results for mechanical descaling of the surface of rolled coil steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades

№ режима	G_1 , г	G_2 , г	G_3 , г	G_4 , г	A , кг/т	B , %	C , кг/т	Код (тип) поверхности
Сталь SAE 1006								
1-1	57,712	57,622	57,480	57,453	4,49	84,0	0,72	В
	57,980	57,893	57,749	57,724	4,42	85,2	0,65	В
	57,732	57,632	57,466	57,442	5,02	87,4	0,64	В
1-2	56,190	56,074	55,882	55,856	5,94	88,1	0,71	В
	55,714	55,615	55,461	55,431	5,08	83,7	0,83	В
	56,437	56,323	56,094	56,069	6,52	90,2	0,64	В
1-3	58,142	57,932	57,493	57,482	11,35	97,6	0,28	В
	58,031	57,845	57,486	57,475	9,58	97,0	0,29	В
	58,217	58,024	57,645	57,632	10,04	96,7	0,33	В
1-4 ¹	56,248	56,216	56,129	56,098	2,67	73,7	0,70	С
	55,792	55,741	55,659	55,631	2,87	74,5	0,74	С
	55,812	55,783	55,751	55,721	1,63	51,6	0,79	С
1-4	57,194	56,975	56,523	56,508	11,99	96,8	0,39	В
	57,696	57,482	57,085	57,072	10,82	96,8	0,34	В
	57,354	57,147	56,750	56,740	10,71	97,5	0,26	В

№ режима	G_1 , г	G_2 , г	G_3 , г	G_4 , г	A , кг/г	B , %	C , кг/г	Код (тип) поверхности
Сталь SAE 1065								
2-1	57,530	57,460	57,339	57,335	3,39	96,8	0,11	B
	58,085	58,009	57,867	57,861	3,86	95,9	0,16	B
	58,278	58,199	58,030	58,027	4,31	98,3	0,08	B
2-2	57,020	56,949	56,822	56,816	3,58	95,5	0,16	B
	56,550	56,474	56,348	56,342	3,68	95,5	0,17	B
	58,025	57,955	57,826	57,820	3,53	95,5	0,16	B
2-3	55,638	55,573	55,463	55,454	3,31	92,4	0,25	B
	56,552	56,484	56,370	56,366	3,29	96,6	0,11	B
	56,811	56,741	56,620	56,613	3,49	94,5	0,19	B
2-4 ¹	56,312	56,288	56,252	56,224	1,56	56,3	0,68	D
	55,937	55,898	55,835	55,811	2,25	72,4	0,62	C
	56,670	56,634	56,585	56,557	1,99	63,6	0,73	C
2-4	57,384	57,182	56,823	56,813	9,95	97,3	0,27	B
	57,477	57,291	56,921	56,913	9,81	97,9	0,21	B
	57,325	57,170	56,884	56,877	7,82	97,6	0,19	B

Примечание: 1 – горячекатаный передний конец бунта.

Возникающий градиент температур при различных температурах виткообразования, несмотря на незначительно отличающийся фазовый состав окалины (табл. 5), приводит к образованию вторичных оксидов на границе раздела металлокалина с различными свойствами и, соответственно, способности к механическому удалению окалины с поверхности бунтового проката.

Данные металлографического анализа изменения глубины обезуглероженного слоя представлены в табл. 8.

Графическое представление результатов исследований в зависимости от температуры виткообразования проката приведено на рис. 3–5.

Статистическая обработка данных позволила установить корреляционную связь общей и остаточной масс окалины, а также глубины обезуглероженного слоя ($h_{об}$, %) на поверхности металла от изменения температуры виткообразования ($T_{во}$, °C).

Исходные данные были обработаны стандартными методами математической статистики,

в результате чего получены следующие уравнения регрессии:

– для проката из стали SAE 1006:

$$A_{SAE1006} = 44,597 \cdot \ln T_{BO} - 293,9;$$

$$C_{SAE1006} = 1,4371 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-6} - 3,7619 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-3} + 3,273 \cdot T_{BO} - 945,9;$$

– для проката из стали SAE 1065:

$$A_{SAE1065} = 1,1894 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-6} - 3,0324 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-3} + 25,736 \cdot T_{BO} - 7267;$$

$$C_{SAE1065} = 0,7337 \cdot T_{BO} \cdot 10^{-3} - 0,4733;$$

$$h_{об} = 3,7857 \cdot T_{BO}^3 \cdot 10^{-7} + 9,867 \cdot T_{BO}^2 \times \\ \times 10^{-4} - 0,862 \cdot T_{BO} + 253,82.$$

Измерение глубины обезуглероженного слоя на поверхности бунтового проката

Measuring the depth of decarbonized layer on the rolled coil steel surface

Марка стали	Температура виткообразования, °С			
	800	850	900	940
SAE 1006 ¹	–	–	–	–
SAE 1065 ²	<u>2,21–2,04</u>	<u>1,72–1,87</u>	<u>1,45–1,67</u>	<u>1,14–1,38</u>
	2,11	1,78	1,56	1,27

Примечание: 1 – не подвергается контролю в нормативной документации; 2 – в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

При проведении металлографических исследований изменения глубины обезуглероженного слоя на поверхности проката из стали SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования дополнительному контролю подвергали изменение главного параметра микроструктуры – межпластиночного расстояния в перлите (рис. 6), средние значения которого (S_0 , мкм) для температур виткообразования 800, 850, 900 и 940 °С составили – 0,341, 0,263, 0,176 и 0,158 мкм соответственно.

Уравнение регрессии (1), описывающее взаимосвязь S_0 с температурой виткообразования, показало хорошую корреляционную связь ($R = 0,93$):

$$S_0 = -1,1895 \cdot \ln T_{BO} + 8,287. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что сопоставительный анализ данных, полученных расчетным путем, и результатов исследований для всех уравнений регрессии показал достаточно высокое соответствие расчетных и экспериментальных данных ($R = 0,90–0,96$). Принимая во внимание, что уравнения регрессии получены путем обработки экспериментальных данных типового проволочного стана ПС-150-1 стандартными статистическими методами, разработанная методика определения общей и остаточной масс окалины, глубины обезуглероженного слоя, а также среднего межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката марки SAE 1065 может быть использована в условиях других металлургических предприятий.

Предложенный экспресс-метод позволяет снизить трудоемкость и существенно умень-

шить временные потери, необходимые для определения нормируемых показателей качества бунтового проката. Выполненные эксперименты позволили добиться необходимого практического результата в силу возможности оперативного управления режимами регулируемого охлаждения металла, а также обеспечить контроль над процессами структурообразования в процессе деформационно-термической обработки бунтового проката.

В заключение следует отметить, что товарный вид проката при прочих равных условиях определяется цветом его поверхности. Допустимыми цветами проката являются серо-голубой и черный, а недопустимым – красно-рыжий. При температурах виткообразования 800 и 940 °С окалина имеет допустимый (черный) цвет, а при 850 °С и 900 °С – недопустимый (красно-рыжий). С учетом удаляемости окалины с поверхности бунтового проката механическим способом рациональной температурой раскладки проката на витки, при двухстадийном охлаждении металла на линии Стелмор, является температура $(940 + 20)$ °С.

На основании результатов исследований в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» введена во внутриводское использование методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности проката из низко- и высокоуглеродистых марок стали. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

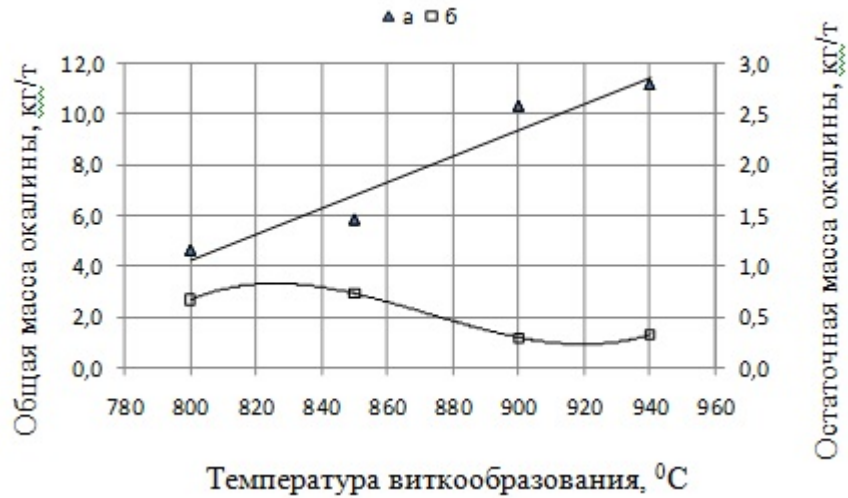


Рис. 3. Изменение количества окалины на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1006 в зависимости от температуры виткообразования: *a* – общая масса окалины; *b* – остаточная масса окалины

Fig. 3. Changes in scale mass on rolled coil steel surface of 5.5 mm diameter of SAE 1006 steel grade depending on coil formation temperature: *a* – total scale mass; *b* – residual scale mass

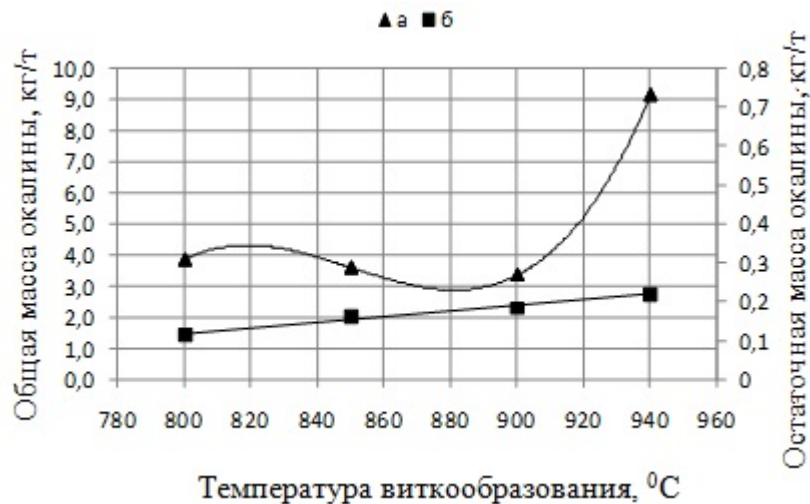


Рис. 4. Изменение количества окалины на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования: *a* – общая масса окалины; *b* – остаточная масса окалины

Fig. 4. Changes in scale mass on rolled coil steel surface of 5.5 mm diameter of SAE 1065 steel grade depending on coil formation temperature: *a* – total scale mass; *b* – residual scale mass

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

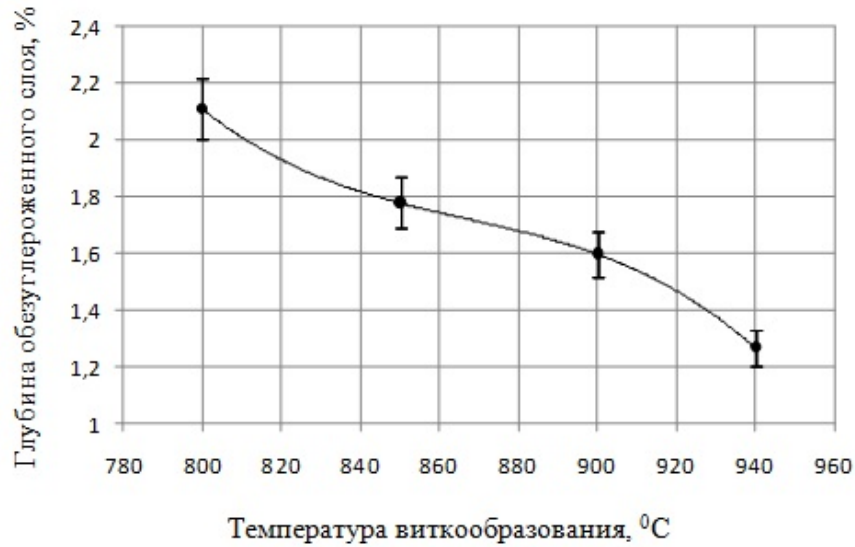


Рис. 5. Изменение глубины обезуглероженного слоя на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования

Fig. 5. Changes in decarburized layer depth on rolled coil steel surface of 5.5 mm diameter of SAE 1065 steel grade depending on coil formation temperature

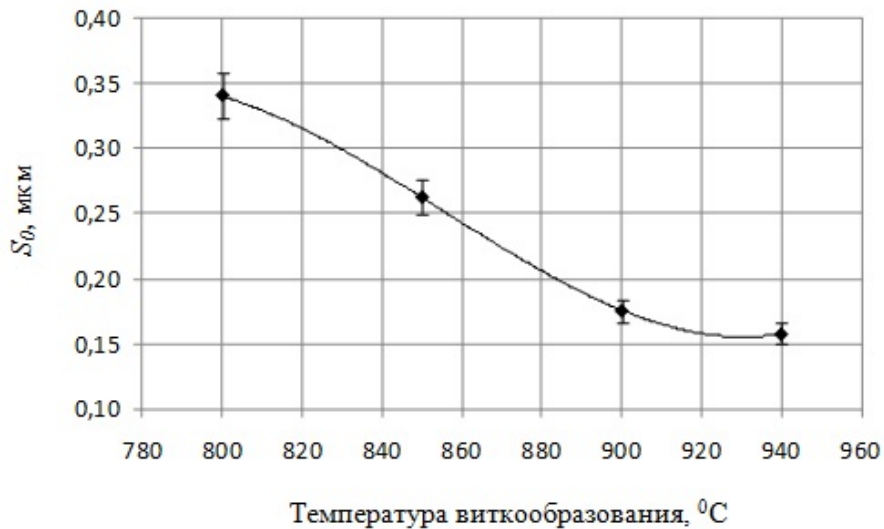


Рис. 6. Изменение межпластиночного расстояния в перлите бунтового проката диаметром 5,5 мм из стали марки SAE 1065 в зависимости от температуры виткообразования (интенсивность воздушного охлаждения – const)

Fig. 6. Changes in interlamellar spacing in pearlite of 5.5 mm diameter rolled coil steel of SAE 1065 steel grade depending on coil formation temperature (intensity of air-cooling – const)

Выводы

1. Установлено влияние температуры виткообразования и последующего непрерывного воздушного охлаждения на фазовый и количественный состав окалины, образующейся на поверхности бунтового проката диаметром 5,5 мм из сталей марок SAE 1006 и SAE 1065.

2. Анализ экспериментальных данных позволил определить рациональные температуры виткообразования металла, которые обеспечивают наилучшее удаление окалины, минимальное ее остаточное количество и соответствие цвета поверхности металла требованиям европейских потребителей.

3. На базе спецификаций компании «BeKaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 и GS-06-01) в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» разработана и внедрена методика проведения испытаний по удалению окалины механическим способом с поверхности бунтового проката из низко- и высокоуглеродистой марок сталей.

4. Разработан экспресс-метод определения общей и остаточной масс окалины на поверхности металла в зависимости от температуры виткообразования. Получен патент Украины на изобретение № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

5. Установлена корреляционная связь нормируемых показателей качества бунтового проката из высокоуглеродистой стали (масса окалины, глубина обезуглероженного слоя и межпластиночное расстояние в перлите) с одним из главных параметров (температурой виткообразования) режима деформационно-термической обработки.

6. Полученные уравнения регрессии позволяют без применения металлографического анализа с минимальной погрешностью определить массу окалины, глубину обезуглероженного слоя и среднее межпластиночное расстояние в перлите проката из высокоуглеродистой стали. При этом не требуется проведение трудоемких и длительных во времени аттестационных испытаний.

7. Показано дополнительное обоснование рациональности повышения температуры виткообразования металла с точки зрения формирования эффективных механических свойств,

структурного состояния и других качественных показателей бунтового проката.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блатнер, М. Е. Методика исследований металлов и обработки опытных данных / М. Е. Блатнер. – Москва : Metallurgizdat, 1952. – 444 с.
2. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
3. Вакуленко, И. О. Структурный анализ в материаловедении / И. О. Вакуленко. – Днепропетровск : Маковецкий, 2010. – 124 с.
4. Взаимосвязь структурных, механических и технологических характеристик катанки из стали 80 КРД / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко [и др.] // Стальные канаты : сб. научн. тр. – Одесса, 2007. – С. 155–161.
5. Взаимосвязь толщины и удельной массы окалины на поверхности высокоуглеродистой катанки / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, И. Н. Чуйко [и др.] // Стр-во, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2004. – Вып. 27, ч. 2. – С. 26–29.
6. Исследование влияния окисления на состояние поверхности заготовок для повышения качества горячекатаных безшовных труб / И. А. Ковалева, А. А. Кучков, А. В. Венгура [и др.] // Литье и металлургия. – 2014. – № 3 (76). – С. 53–57.
7. Исследование охлаждения труб при гидросбиве окалины / В. Д. Добряк, А. Н. Степаненко, Ю. Д. Угрюмов [и др.] // Металлург. и горноруд. промышленность. – 2016. – № 1. – С. 99–102.
8. Кайстров, Е. А. Борьба с обезуглероживанием в прокатных цехах / Е. А. Кайстров // Сталь. – 1950. – № 12. – С. 1106–1108.
9. Катанка стальная канатная. Технические условия: ДСТУ 3683–98. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1999. – 34 с. – (Національний стандарт України).
10. Количественное определение общего количества окалины, способности к удалению окалины и остаточных оксидов с поверхности высокоуглеродистого и низкоуглеродистого проката: GA-03-16. – BEKAERT. MBUSC. BK-спес: GA-03-16. – 1994. – 9 с.
11. Копытов, В. Ф. Нагрев стали в печах / В. Ф. Копытов. – Москва : Металлургия, 1955. – 264 с.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

12. Кравченко, М. С. Стратегия инновационной деятельности промышленных предприятий / М. С. Кравченко, Н. В. Марченко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 25–35. doi: 10.15802/stp2016/67283.
13. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, В. Гопкинс [пер. с англ.]. – Москва : Металлургия, 1965. – 428 с.
14. Ледков, В. Г. Непрерывные травильные линии / В. Г. Ледков. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 158 с.
15. Матвеев, Б. Н. Методы повышения качества катанки / Б. Н. Матвеев // Прокатное производство. – 2001. – № 1. – С. 40–47.
16. Налча, Г. И. Комплексное исследование окалины, образующейся при горячей прокатке / Г. И. Налча // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. – 1999. – № 2. – С. 102–112.
17. Парусов, В. В. Разработка технологических режимов охлаждения катанки на линии Stelmor, обеспечивающих требуемую удаляемость окалины механическим способом и товарный вид металлопродукции : отчет о НИР / Ин-т черной металлургии НАНУ ; рук. В. В. Парусов. – Днепропетровск, 2007. – 88 с.
18. Формирование структуры и свойств катанки для сверхвысокопрочного металлокорда / В. А. Луценко, В. А. Маточкин, Н. И. Анелькин [и др.] // Металлург. и горноруд. промышленность. – 2006. – № 6. – С. 54–57.
19. Фрик, Ю. Оптимизация технологии гидромеханического удаления окалины на стали / Ю. Фрик // Новости черной металлургии за рубежом. – 2012. – № 4 (88). – С. 59–60.
20. Функе, П. мл. Влияние условий охлаждения на стане на структуру окалины и травимость стальной катанки / П. мл. Функе, М. Хайнрихт // Черные металлы. – 1970. – № 3. – С. 12–20.
21. Integrated process for drawing wire-rod without a die plate and descaling the rod surface / Yu. F. Bakhmatov, K. G. Pashchenko, A. A., Kal'chenko [et al.] // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58. – Iss. 3-4. – P. 316–320. doi: 10.1007/s11015-014-9908-0.
22. Manufacture of Wire Rods with Good Descaling Property / J. Tominaga, K. Wakimoto, T. Mori [et al.] // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1982. – Vol. 22. – Iss. 8. – P. 646–656. doi: 10.2355/isijinternational1966.22.646.
23. Pfeil, L. V. J. of the Iron and Steel Institute / L. V. Pfeil. – 1931. – № 123.

Е. В. ПАРУСОВ¹, О. Б. СИЧКОВ², С. І. ГУБЕНКО³, І. М. ЧУЙКО⁴, Л. В. САГУРА^{5*}

¹Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49050, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

²Каф. «Ливарне виробництво і матеріалознавство», Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова, пр. Леніна, 38, Магнітогорськ, Російська Федерація, тел. +7 (919) 348 66 84, ел. пошта absyckov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

³Каф. «Матеріалознавство», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374 83 57, ел. пошта sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0886-1601

⁴Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта ichuuko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

^{5*}Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова, Національна академія наук України, пл. Ак. Стародубова, 1, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 33 71 63, ел. пошта slv_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

ПЕРЕВАГИ ЕКСПРЕС-МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ МАСИ ОКАЛИНИ І ЗНЕВУГЛЕЦЬОВАНОГО ШАРУ БУНТОВОГО ПРОКАТУ

Мета. У роботі необхідно встановити універсальні емпіричні залежності, які дозволять здійснити оперативний розрахунок маси окалини і глибини зневуглицьованого шару, ґрунтуючись на параметрах технологічного процесу виробництва бунтового прокату. **Методика.** Дослідження виконані на промислових партіях прокату із сталей марок SAE 1006 і SAE 1065. Видалення окалини визначали відповідно до методик компанії «Beaert» за специфікаціями: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. Глибину зневуглицьованого шару ідентифікували відповідно до ГОСТ 1763-68 (метод М). **Результати.** Аналіз експериментальних даних дозволив визначити раціональні температури виткоутворення прокату досліджуваних марок сталі, які забезпечують найкраще видалення поверхневої окалини, мінімальну її остаточну кількість, а також відповідність

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

кольору поверхні металу вимогам європейських споживачів. **Наукова новизна.** Авторами встановлений кореляційний зв'язок нормованих показників якості, бунтового прокату з високовуглецевої сталі (маса окалини, глибина зневуглецьованого шару і міжпластинкова відстань у перліті) з одним з головних параметрів (температурою виткоутворення) режиму деформаційно-термічної обробки. Отримані рівняння регресії дозволяють, без застосування металографічного аналізу, з мінімальною похибкою визначити кількісні значення маси окалини, глибини зневуглецьованого шару і середньої міжпластинчастої відстані в перліті бунтового прокату з високовуглецевої сталі. **Практична значимість.** На базі специфікацій компанії «Beckaert» (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 і GS-06-01) розроблена і впроваджена в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» методика проведення випробувань по видаленню окалини механічним способом із поверхні бунтового прокату з низько- і високовуглецевої марок сталі. Розроблено експрес-метод визначення загальної та залишкової маси окалини на поверхні прокату в залежності від температури виткоутворення. Отримано патент України на винахід № 91760 «Спосіб визначення загальної та залишкової кількості окалини на поверхні катанки».

Ключові слова: бунтовий прокат; окалина; зневуглецьований шар; деформаційно-термічна обробка

E. V. PARUSOV¹, A. B. SYCHKOV², S. I. GUBENKO³, I. N. CHUIKO⁴, L. V. SAHURA^{5*}

¹Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences in Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail tometal@ukr.net, ORCID 0000-0002-4560-2043

²Dep. «Foundry and Materials», Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Lenin Ave., 38, Magnitogorsk, Russian Federation, 455000, tel. +7 (919) 348 66 84, e-mail absyckov@mail.ru, ORCID 0000-0002-0886-1601

³Dep. «Material Science», National Metallurgical Academy of Ukraine, Haharin Ave., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 83 57, e-mail sigubenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0886-1601

⁴Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences in Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail ichuyko@mail.ru, ORCID 0000-0002-4753-614X

^{5*}Dep. of metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Akademik Starodubov Sqr., 1, Dnipro, Ukraine, 49050, tel. +38 (0562) 33 71 63, e-mail slv_metal@mail.ru, ORCID 0000-0002-2614-0322

ADVANTAGES OF RAPID METHOD FOR DETERMINING SCALE MASS AND DECARBURIZED LAYER OF ROLLED COIL STEEL

Purpose. To determine the universal empirical relationships that allow for operational calculation of scale mass and decarbonized layer depth based on the parameters of the technological process for rolled coil steel production.

Methodology. The research is carried out on the industrial batches of the rolled steel of SAE 1006 and SAE 1065 grades. Scale removability was determined in accordance with the procedure of «Beckaert» company by the specifications: GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02, GS-06-01. The depth of decarbonized layer was identified in accordance with GOST 1763-68 (M method). **Findings.** Analysis of experimental data allowed us to determine the rational temperature of coil formation of the investigated steel grades, which provide the best possible removal of scale from the metal surface, a minimal amount of scale, as well as compliance of the metal surface color with the requirements of European consumers. **Originality.** The authors established correlation of the standardized quality indicators of the rolled coil high carbon steel (scale mass, depth of decarbonized layer and inter-laminar distance in pearlite) with one of the main parameters (coil formation temperature) of the deformation and heat treatment mode. The resulting regression equations, without metallographic analysis, can be used to determine, with a minimum error, the quantitative values of the total scale mass, depth of decarbonized layer and the average inter-lamellar distance in pearlite of the rolled coil high carbon steel. **Practical value.** Based on the specifications of «Beckaert» company (GA-03-16, GA-03-18, GS-03-02 and GS-06-01) the method of testing descaling by mechanical means from the surface of the rolled coil steel of low- and high-carbon steel grades was developed and approved in the environment of PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». The work resulted in development of the rapid method for determination of total and remaining scale mass on the rolled coil steel surface of low- and high-carbon steel grades depending on the temperature coil formation. There was obtained the patent of Ukraine for invention no. 91760 «The method for determining the total and remaining amount of scale on the rolled steel surface».

Keywords: rolled coil steel; scale; decarbonized layer; deformation-thermal treatment

REFERENCES

1. Blatner M.Ye. *Metodika issledovaniy metallov i obrabotki opytnykh dannykh* [Methods of metals research and processing of experimental data]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1952. 444 p.
2. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [The morphology of the structure and work hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
3. Vakulenko I.O. *Strukturniy analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in material science]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Lutsenko V.A. Vzaimosvyaz strukturnykh, mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh kharakteristik katanki iz stali 80 KRД [The relationship of the structural, mechanical and technological characteristics of 80 KRД wire-rod of steel]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stalnyye kanaty»* [Proc. «Steel ropes»], Odessa, Astroprint Publ., 2007, pp. 155-161.
5. Parusov V.V., Parusov E.V., Chuyko I.N., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V. Vzaimosvyaz tolshchiny i udelnoy massy okaliny na poverkhnosti vysokouglerodistoy katanki [The relationship of thickness and specific mass scale on the surface of high carbon wire rod]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye»* [Proc. «Construction, Material Science, Engineering Industry»], Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2004, vol. 27, no.2, pp. 26–29.
6. Kovaleva I. A., Kuchkov A. A., Vengura A. V., Hodosovskaya N. A., Guzova I. A., Ovchinnikova I. A. Issledovaniye vliyaniya okalinoobrazovaniya na sostoyaniye poverkhnosti zagotovok dlya povysheniya kachestva goryachekatanykh bezshovnykh trub [Study of the effect of scaling on the state of the surface of the workpieces to improve the quality of hot-rolled seamless pipes]. *Litye i metallurgiya – Casting and Metallurgy*, 2014, no. 3 (76), pp. 53–57.
7. Dobryak V. D., Stepanenko A. N., Ugryumov Yu. D., Gubinskiy M. V., Grinev A. F. Issledovaniye ohlazhdeniya trub pri gidrosbive okaliny [Research cooling pipes at descaling]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 1, pp. 99–102.
8. Kaystrov E. A. Borba s obezuglerozhivaniyem v prokatnykh tsekhakh [Fighting with decarbonization in rolling mills]. *Stal – Steel*, 1950, no 12, pp. 1106-1108.
9. *Katanka stalnaya kanatnaya. Tehnicheskiye usloviya: DSTU 3683–98* [State Standard 3683–98. Steel cable wire rod]. Kiev, Derzhspozhivstandart Ukrayini Publ., 1999, 34 p.
10. Kolichestvennoye opredeleniye obshchego kolichestva okaliny, sposobnosti k udalenyu okaliny i ostatochnykh oksidov s poverkhnosti vysokouglerodistogo i nizkouglerodistogo prokata [Quantitative determination of the total amount of scale, descaling ability and residual oxides from the surface of rolled high-low-carbon]: GA–03–16, BEKAERT. MBUSC. BK-spec: GA-03-16. May 1994, 9 p.
11. Kopyitov V. F. *Nagrev stali v pechah* [Heating the steel in furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1955. 264 p.
12. Kravchenko M. S., Marchenko N. V. Strategiya innovatsionnoy deyatelnosti promyshlennykh predpriyatiy [The strategy of innovative activity of industrial enterprises]. *Nauka ta progres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 2 (62), pp. 25–35. doi: 10.15802/stp2016/67283.
13. Kubashevskiy O., Gopkins V. *Okisleniye metallov i splavov* [Oxidation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965, 428 p.
14. Ledkov V. G. *Nepreryvnyye travilnyye linii* [The continuous pickling lines]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961. 158 p.
15. Matveyev B.N. Metody povysheniya kachestva katanki [Methods to improve the quality of a wire rod]. *Prokatnoye proizvodstvo – Rolling*, 2001, no. 1, pp. 40–47.
16. Nalcha G.I. Kompleksnoye issledovaniye okaliny, obrazuyushcheysya pri goryachey prokatke [Comprehensive study of scale produced during hot rolling]. *Novosti chernoy metallurgii Rossii i zarubezhnykh stran – News of Ferrous Metallurgy in Russia and Abroad*, 1999, no. 2, pp. 102–112.
17. Parusov V.V. Razrabotka tekhnologicheskikh rezhimov okhlazhdeniya katanki na linii Stelmor, obespechivayushchikh trebuemuyu udalyaemost okaliny mekhanicheskim sposobom i tovarnyy vid metalloproduktii [Development of technological modes of rod cooling on Stelmor line, providing the required removability of scale with mechanical way and presentation of metal]. Dnepropetrovsk, 2007. 88 p.
18. Lutsenko V.A., Yevsyukov M.F., Sivak A.I., Matochkin V.A., Anelkin N.I. Formirovaniye struktury i svoystv katanki dlya sverkhvysokoprochnogo metallokorda [Formation of structure and properties of the rod for ultra-high steel cord]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and Mining Industry*, 2006, no. 6, pp. 54–57.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

19. Frik Yu. Optimizatsiya tekhnologii gidromekhanicheskogo udaleniya okaliny na stali [Optimization of hydro-mechanical descaling technology on steel]. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom – News of Ferrous Metallurgy in Russia and Abroad*, 2012, no. 4 (88), pp. 59–60.
20. Funke P. ml., Khaynritts M. Vliyaniye usloviy okhlazhdeniya na stane na strukturu okaliny i travimost stalnoy katanki [Effect of cooling conditions at the camp on the scale structure of the etchability of steel rod]. *Chernyye metally – Ferrous Metals*, 1970, no. 3, pp. 12-20.
21. Bakhmatov Yu.F., Pashchenko K.G., Kal'chenko A. A., Belov A. S. , Tyuteryakov N. Sh. Integrated process for drawing wire-rod without a die plate and descaling the rod surface. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, issue 3, pp. 316-320. doi:10.1007%2Fs11015-014-9908-0
22. Tominaga J., Wakimoto K. Mori T. Manufacture of Wire Rods with Good Descaling Property. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, no. 8, vol. 22, pp. 646-656. doi: 10.2355/isijinternational1966.22.646.
23. Pfeil L. B. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1931. No. 123.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г. В. Левченко (Украина); д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Поступила в редколлегию: 24.03.2016

Принята к печати: 04.07.2016