

УДК 621.771

Пивоварова К.Г.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЬНОЙ КАТАНКИ

Аннотация. Показано, что одними из нежелательных и распространенных дефектов поверхности, которые снижают качественные показатели высокоуглеродистого бунтового проката и эксплуатационные характеристики изготавливаемых из него изделий, являются обезуглероживание поверхности и окалинообразование. Поэтому к катанке из высокоуглеродистой стали предъявляют высокий уровень требований к качеству поверхности, в том числе к глубине видимого обезуглероженного слоя и толщине поверхностной окалины, которые нормируются соответствующей нормативной документацией. В настоящей работе представлены результаты лабораторных исследований высокотемпературного окисления и обезуглероживания катанки из высокоуглеродистой стали марки 80 методами синхронного термического анализа. Установлены температурные интервалы интенсификации окалинообразования и обезуглероживания в различных средах (слабоокислительной и окислительной). Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) изучены фазовые превращения в высокоуглеродистой стали марки 80 и установлены оптимальные температуры образования однородного аустенита при нагревании. Отмечено, что в диапазоне температур нагрева стали 720–950°C наряду с фазовыми превращениями начинается интенсификация процессов окалинообразования и обеднение поверхностных слоев углеродом. Исследованы методом термогравиметрического анализа (ТГ) особенности кинетики окисления стали в неизотермических условиях при непрерывном нагреве до заданной температуры. Определены температуры максимальной скорости окисления. Показано, что скорость окисления при повышении температуры заготовки с 900 до 1000°C увеличивается в 3 раза, а до 1200°C – в 8 раз. Найден оптимальная температура нагрева заготовок перед прокаткой (1157°C) и критическая температура (929°C) окисления. Полученные результаты можно использовать для выбора основных технологических параметров режима термической обработки катанки из стали марки 80, обеспечивающей формирование на поверхности металла низкого количества легко удаляемой окалины и минимальной глубины обезуглероженного слоя.

Ключевые слова: высокоуглеродистая катанка, сталь марки 80, термический анализ, ДСК-кривая, ТГ-кривая, окисление, обезуглероживание.

Введение

Высокоуглеродистая катанка является сырьем для метизной промышленности и используется для изготовления арматуры, пружин, канатов и металлокорда. Ее качество является одним из главных факторов, определяющих технико-экономические показатели и потребительские свойства вышеперечисленной продукции. Качество горячекатаного проката (катанки) оценивается соответствием нормативным требованиям его геометрических параметров (овальность и установленные величины допуска на диаметр), химического состава и механических характеристик. Оно также определяется структурой проката, которая, в свою очередь, зависит от способа изготовления, включая разливку стали, нагрев заготовок и горячую прокатку на прокатном стане, способа охлаждения и последующей термообработки [1–4].

На качество готовой метизной продукции существенно влияют поверхностные дефекты катанки. Такие дефекты поверхности, как закаты, плены, риски, волосовины способствуют появлению трещин, рванин, пор при дальнейшей пластической деформации методом волочения. Все перечисленные виды дефектов могут раскрываться при термообработке в виде трещин, приводя к отбраковке готовых изделий. Такие дефекты, как усадочные раковины и рыхлость, ослабляют сечение проволоки, приводя к обрывам при волочении и снижая механические свойства проволоки. Поэтому катанка при наличии значительного

количества поверхностных дефектов даже с высокими значениями механических характеристик и имеющая оптимальную структуру может оказаться совершенно непригодной для дальнейшего применения [5]. Наряду с вышеперечисленными дефектами, самыми распространенными и нежелательными дефектами, которые снижают качественные показатели катанки и эксплуатационные характеристики изготавливаемых из нее изделий, являются окалинообразование и обезуглероживание поверхности [6, 7].

Окалинообразование является причиной таких видов брака, как вкатанная или вмятая окалина, рябизна, раковины (язвины и оспины), что также снижает качество поверхности проката. Формирование окалины при производстве катанки неизбежно ставит проблему ее удаления. Удаление окалины перед волочением необходимо для уменьшения трения в канале волоки и снижения силы волочения, снижения температуры в очаге деформации и величины остаточных напряжений в металле после волочения. Технология удаления окалины значительно влияет на качество и стоимость готовой продукции [8].

Обезуглероживание поверхности металла является нежелательным явлением, однако существует мнение и о положительном влиянии обезуглероживания поверхности бунтового проката на его потребительские свойства. Мягкая обезуглероженная поверхность обеспечивает повышенную пластичность металла при перегибах и скручиваниях из-за малой чувствительности к концентраторам напряжений, высокой сопротивляемости распространению трещин, а также повышению коррозионной стойкости. Форми-

рование в поверхностном обезуглероженном слое остаточных сжимающих напряжений приводит к повышению усталостной прочности и долговечности в процессе эксплуатации изделий (канатов). В бунтовом прокате с более развитым поверхностным обезуглероживанием уменьшается вероятность образования закалочных структур (мартенсита) при волочении и вызываемых появлением мартенсита поверхностных трещин и надрывов. Однако при деформации металла способом холодного волочения, путем протяжки бунтового проката через систему монолитных волок, максимальные напряжения при этом сосредоточены на поверхности проката. В связи с такой особенностью равномерность распределения структуры на поверхности и в приповерхностных слоях оказывает решающее воздействие. Следовательно, при изготовлении качественной катанки необходимо обеспечить минимальную и равномерную глубину обезуглероживания на поверхности металла [2].

Масса окалины и глубина обезуглероженного слоя являются аттестационными показателями бунтового проката, ввиду чего они всегда регламентируются нормативной документацией и сертификатами качества на металлопродукцию [8]. Масса окалины на поверхности проката возрастает с повышением температур горячей деформации и виткообразования, а также при снижении скорости воздушного охлаждения на линии Стелмор, которые, кроме этого, влияют на структурообразование и формирование других качественных показателей бунтового проката [9]. Анализ литературных источников свидетельствуют о наличии довольно противоречивых результатов, касающихся формирования общей массы окалины, времени распада вюстита и определения оптимальных температурных диапазонов его образования на поверхности проката в процессе охлаждения на линии Стелмор. Это требует знания определенных законов, регулирующих процесс окалинообразования, а именно необходимы сведения о кинетике окисления стали для рационального выбора температурно-скоростного регламента нагрева заготовки.

В последнее время термический анализ, в частности синхронный (ТГ и ДСК), является одним из самых распространенных методов физико-химических исследований, ввиду возможности изучения различных по своей природе объектов и быстроты получения разнообразной информации, в том числе, при исследовании высокотемпературных процессов окисления стали [10].

Все вышеизложенное ставит целью работы исследование кинетики окисления и обезуглероживания высокоуглеродистой катанки из стали марки 80 термическим методом.

Материалы и методы исследований

Материалом для исследований служила катанка производства ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» диаметром 16,0 мм из стали марки 80

с химическим составом, % мас.: 0,81 С; 0,35 Si; 0,57 Mn; 0,0020 S; 0,0030 P; 0,02 Cr; 0,03 Ni; 0,0013 V; 0,0010 Al.

Термоаналитические исследования выполняли на приборе синхронного термического анализа STA Jupiter 449 F3. Прибор позволяет одновременно при одном измерении образца проводить дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) и термогравиметрический анализ (ТГ) и напрямую сравнивать результаты измерений ТГ и ДСК, при этом устранять влияние неоднородности материала, пробоподготовки и условий измерений. Методом ДСК фиксировали разность температур, которая пропорциональна разности теплового потока, возникающего между эталоном (для STA – пустой тигель) и образцом, находящимся в другом тигле из этого материала. Методом термогравиметрии измеряли изменение массы образца в зависимости от температуры при определенных контролируемых условиях.

Для экспериментов вырезали образцы, имеющие форму дисков диаметром 3 мм и высотой 4 мм, шлифовали их поверхность с помощью наждачной бумаги, обезжиривали ацетоном. Измерения проводили в корундовых тиглях. Перед проведением анализа прибор калибровали по температурам плавления эталонов, в качестве которых использованы чистые металлы. Ошибка измерения температуры не превышала $\pm 0,1$ С.

Термические кривые образцов записывали со скоростью 10 °С/мин в потоке аргона (газ защитный – 10 см³/мин, рабочий – 20 см³/мин) в диапазоне температур 30-1000 и 30-1200°С в смеси аргона и воздуха. Такая смесь отвечала требованиям к работе на приборе: на весы подавался защитный газ аргон (10 см³/мин), который далее поступал в печь и смешивался с рабочим газом – воздухом (20 см³/мин). Суммарная скорость потока аргона и смеси составляла 30 см³/мин. Прободержатель ДСК вместе с тиглями перед проведением измерения образца в потоке аргона предварительно прогревали до 1000°С, в потоке воздуха – до 1200°С. После загрузки образца и установки тигля на держатель образца печь герметично закрывали и нагревали по вышеприведенной программе. При этом автоматически фиксировались дифференциальные кривые зависимостей температуры $\Delta T_{\text{обр}} = f(T_{\text{этл}})$ [ДСК], массы $\Delta m = f(T, \tau)$ [ТГ]. Полученные данные обрабатывали с помощью программы Netzsch Proteus Analysis.

Результаты исследования и их обсуждение

Так как для развития процесса обезуглероживания на поверхности металла при нагреве в печи газовая атмосфера не должна оказывать сильное окислительное воздействие, то образец катанки из стали 80 подвергали высокотемпературному нагреву в инертной атмосфере (аргоне). Окисляющими газами в нем являются примеси кислорода (до 0,002%) и воды (до 0,001%) (см. ГОСТ 10157-2016).

На рис. 1 приведена типичная термограмма, отражающая фазовые превращения, протекающие в углеродистых сталях при нагреве, и при этом изменение массы, связанное с процессами окисления и обезуглероживания. На ДСК-кривой (см. рис. 1) исследуемого образца наблюдаются глубокий эндотермический эффект в диапазоне температур 721–757°C с максимумом пика при температуре 744,9°C и перегиб при 930,6°C. Эндотермический эффект свидетельствует о превращении перлита в аустенит ($\alpha \rightarrow \gamma$), перегиб – распаду и растворению в аустените карбидов. Наблюдаемый при нагреве свыше 932°C спад ДСК-кривой до температуры 950°C вероятнее всего связан с гомогенизацией аустенита. Согласно [11] температура виткообразования в производственных условиях в максимальной степени должна соответствовать температуре аустенитизации. Таким образом, по температурному диапазону образования однородного аустенита выбрали рациональную температуру виткообразования и она составляет 930–950°C.

На ТГ-кривой, начиная с температуры 590°C, отмечается незначительный прирост массы, который продолжается практически до температуры 900°C. Прибавка массы в этом диапазоне температур соста-

вила 0,014% и она обусловлена процессами окисления металла. Наряду с процессами окисления наблюдается обезуглероживание металла, о чем свидетельствуют потери массы (0,07%) в диапазоне температур 900–1000°C. Процесс обезуглероживания четко проявляется при температуре 897°C и интенсивно протекает до 1000°C. В этом температурном интервале происходит распад и растворение карбидов в аустените. В результате происходит разрыв связей Me-C, карбиды разлагаются с образованием углерода (C) и элементов, входящих в их состав (Fe, Mn, Cr) и в дальнейшем при нагревании происходит их интенсивное окисление. В то же время окисление углерода и удаление его оксидов в газовую фазу способствует некоторому снижению массы образца.

При нагреве сталей на поверхности образуется слой оксидов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), называемый окалиной. Толщина слоя окалины зависит от температуры и времени нагрева, расположения заготовок в печи, состава печных газов и химического состава сплава. Наиболее интенсивно стали окисляются при температуре выше 900°C. Этот процесс наблюдаем на термограмме образца (рис. 2), нагретого в среде воздуха.

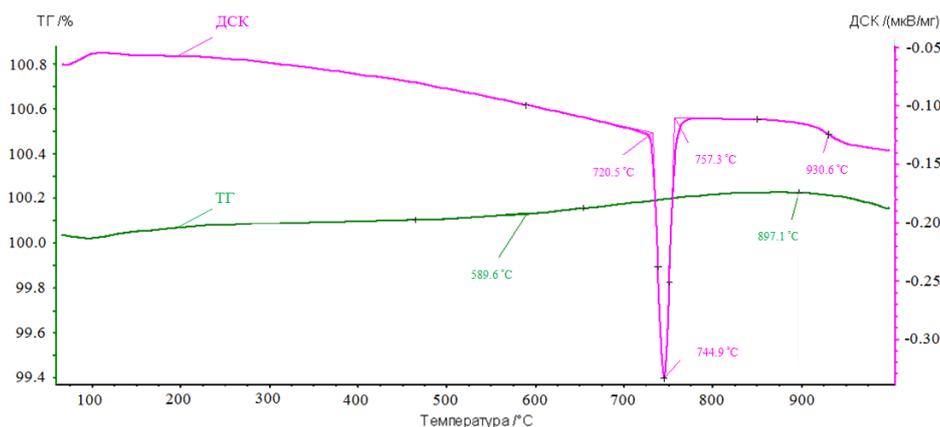


Рис. 1. Термограмма непрерывного нагрева в атмосфере аргона образца из стали марки 80

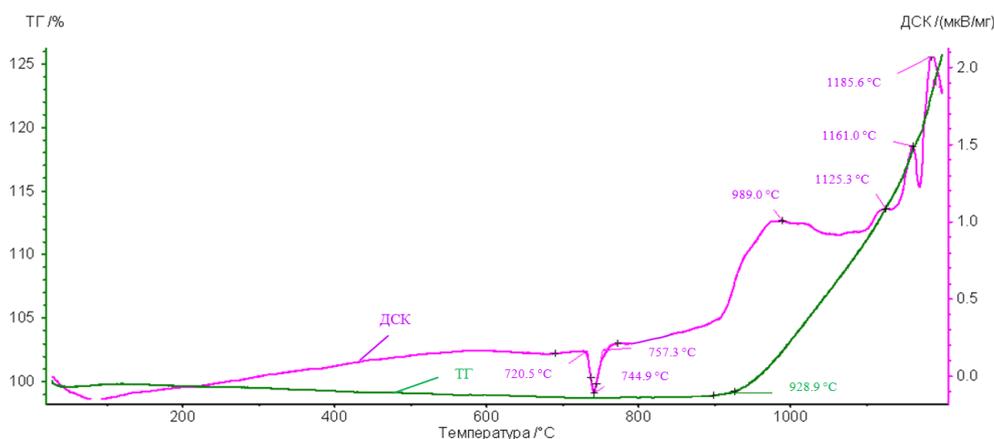


Рис. 2. Термограмма непрерывного нагрева в атмосфере воздуха образца из стали марки 80

При высокотемпературном нагреве в окислительной среде в отличие от слабоокислительной на ДСК-кривой (см. рис. 2) кроме эндотермического эффекта с максимумом при 745°C фиксируются экзотермические пики с максимумами при температурах 989; 1125,3; 1161 и 1185,6°C. Первый соответствует началу интенсификации окисления (угара) после перехода стали в аустенитное состояние (в диапазоне температур 720,5–757,3°C) и образования вюстита, а остальные – продолжению интенсификации угара в области температур до 1200°C. Это обычно происходит при нагреве стали перед горячей прокаткой при температурах выше 1100°C и при сжигании топлива с избытком воздуха. В окислительной среде растворение и распад карбидов в этом диапазоне температур протекает одновременно с процессами окисления сплава, в результате чего происходит наложение эффектов. При этом экзотермический эффект превалирует над эндотермическим и на ТГ-кривой отмечается только увеличение массы, а на ДСК-кривой – экзотермические эффекты. При этом на ТГ-кривой, начиная с температуры 900°C, отмечается увеличение массы за счет окисления железа и других присутствующих компонентов. Резкое увеличение массы образца начинается при температуре 929°C и эта температура согласно [12] является критической. При нагреве выше критической температуры процессы окисления металла начинают протекать с высокой скоростью и связаны они в основном с образованием вюстита в окалине.

Дифференцирование ТГ-кривой дает ДТГ-кривую (рис. 3), позволяющую судить о скорости процесса окисления стали марки 80 при температурах нагрева в печах и прокатки.

Согласно ДТГ-кривой скорость окисления постоянно до температуры 900°C. Свыше 900°C она монотонно увеличивается и достигает максимума при температуре 1000°C, затем начинается ее спад, кото-

рый продолжается почти до температуры 1100°C. Свыше 1100°C скорость окисления начинает резко возрастать и достигает максимума при 1157°C и 1185°C. Так, при увеличении температуры заготовки с 930 до 1000°C скорость окисления увеличивается в 3 раза, а до 1200°C – в 8 раз. Однако в диапазоне температур 1100–1200°C скорость окисления самая высокая. Если принять за единицу скорость окисления при 1100°C, то при температуре 1157°C она увеличивается в 1,5 раза, при 1185°C – более чем в 2 раза. Поэтому скорость окисления стали марки 80 в температурном диапазоне 1100–1200°C при температуре 1157°C ниже, чем при 1185°C. Следовательно, температура 1157°C является оптимальной при нагреве стали марки 80 в печах перед горячей прокаткой.

Заключение

Анализ полученных термограмм и идентификация экстремумов дифференциальных кривых (ТГ и ДСК) позволила описать процессы, протекающие при нагреве стали марки 80 в инертной (аргоне) и окислительной (воздухе) средах. Установлено, что при нагреве образца в инертной атмосфере (с незначительным количеством примесей окисляющих газов) в температурном интервале 720–950°C наряду с фазовыми превращениями ($\alpha \rightarrow \gamma$) начинается интенсификация процессов окалинообразования за счет образования вюстита и обеднения поверхностных слоев углеродом в результате распада и растворения карбидов в аустените.

Результаты синхронного термического анализа (дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа) являются информативными и их можно использовать для корректировки температурно-временных режимов технологического процесса получения высокоуглеродистой катанки из стали 80 с высоким качеством поверхности.

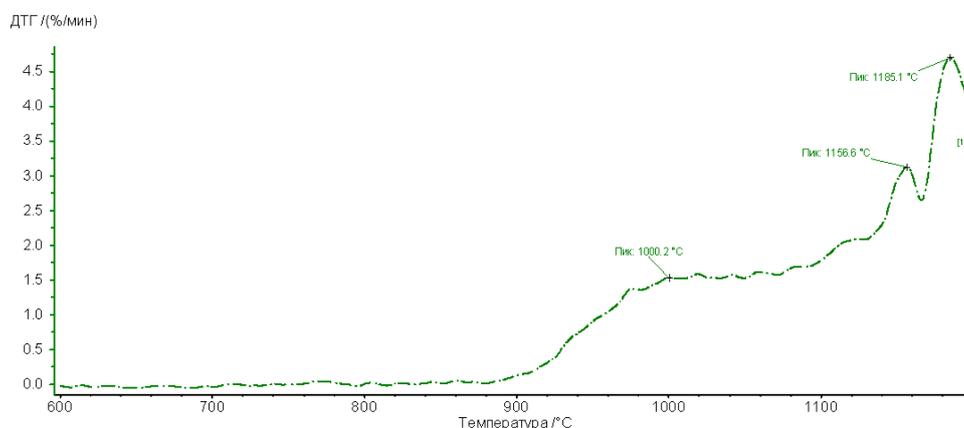


Рис. 3. Изменение скорости окисления стали марки 80 от температуры

Список литературы

1. Совершенствование технологии производства высококачественной катанки / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жуков, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов // Литье и металлургия. 2011. № 4 (83). С. 85-92.
2. Влияние величины аустенитного зерна на развитие обезуглероживания при производстве бунтового проката / Э.В. Парусов, С.И. Губенко, А.Б. Сычков, В.А. Луценко, Л.В. Сагура // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016 № 8 (221). С. 26-34.
3. Усовершенствование сквозной технологии производства бунтового проката из стали марки 80P в условиях ОАО «ММК» / А.Г. Корчунов, В.А. Бигеев, А.Б. Сычков, Г.С. Зайцев, Ю.А. Ивин, А.Ю. Дзюба // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова 2013. № 2. С. 29-35.
4. Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. Конечно-элементное моделирование процесса cold stretching для оценки возможности изготовления холоднодеформированной арматуры класса 500 в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 1 (36). С. 21-26.
5. Влияние поверхностного и структурного состояния на качество проката для болтов / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин, В.И. Наумов, Н.А. Кузьмин // Фундаментальные исследования. 2015. № 10-1. С. 77-82.
6. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением: монография. М.: Теплотехник, 2006. 199 с.
7. Формирование свойств окалины для ее полного удаления с поверхности катанки перед волочением / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова, А.В. Перчаткин, В.И. Грицаенко // Литье и металлургия. 2012. № 4 (68). С. 83-91.
8. Пашнин С.С., Коберник О.П. Исследование окисленности атмосферы печей нагрева на образование окалины при тепловой обработке литых заготовок под прокатку // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-2. С. 355-357.
9. Перспективы использования экологически чистого способа подготовки поверхности бунтового проката к волочению / Э.В. Парусов, А.Б. Сычков, С.И. Губенко, И.Н. Чуйко // Проблемы трибологии. 2016. № 2. С. 74-82.
10. Investigation of heat of biomass pyrolysis an secondary reactions by simultaneous thermogravimetry and differential scanning calorimetry / Q. Chen, R. Yang, B. Zhao, Y. Li, S. Wang, H. Wu, Y. Zhuo, C. Chen. Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy. 2014, vol. 134, pp. 467-476.
11. Обоснование параметров регулируемого охлаждения бунтового проката из высокоуглеродистой стали в потоке проволочного стана 320/150 ОАО «ММЗ» / Э. В. Парусов, А.Б. Сычков, С.И. Губенко, С.В. Долгий, Л.В. Сагура // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. 2016. № 2 (77). С. 62-70.
12. Миронов О.А. Разработка новых жароизносостойких чугунов для отливок, работающих в условиях повышенных температур, износа и агрессивных газовых сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. 18 с.

Сведения об авторах

Пивоварова Ксения Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

QUALITY SURFACE ASSURANCE FOR WIRE ROD OF HIGH-CARBON STEEL

Pivovarova Ksenia G. – Ph.D. (Eng), Associate Professor of Materials Processing Technologies Department, Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Abstract. It is shown that undesirable and common surface defects that reduce the quality indicators of high-carbon hot rolled products and the operational characteristics of products made from it are surface decarburization and scale formation. Therefore, a high level of surface quality requirements are imposed on a high-carbon steel rod, including the depth of the visible decarbonized layer and the thickness of the surface scale, which are normalized by the relevant regulatory documentation. This paper presents the results of laboratory studies of high-temperature oxidation and decarburization of wire rod made of high-carbon steel grade 80 by synchronous thermal analysis methods. Temperature intervals of intensification of scale formation and decarburization in various media (weakly oxidizing and oxidizing)

have been established. The phase transformations in high-carbon steel grade 80 were studied by differential scanning calorimetry (DSC) and the optimal temperatures for the formation of homogeneous austenite during heating were established. It is noted that in the range of heating temperatures of steel 720÷950 °C, along with phase transformations, the intensification of the processes of scale formation and the depletion of the surface layers with carbon begins. The features of the kinetics of steel oxidation under non-isothermal conditions under continuous heating to a given temperature are studied by the method of thermogravimetric analysis (TG). The temperatures of the maximum oxidation rate are determined. It is shown that the rate of oxidation with an increase in the temperature of the workpiece from 900 to 1000 °C increases by 3 times, and up to 1200 °C-by 8 times. The optimal heating temperature of the workpieces before rolling (1157 °C) and the critical temperature (929 °C) of oxidation are found. The obtained results can be used to select the main technological parameters of the heat treatment mode of wire rod made of grade 80 steel, which ensures the formation of a low amount of easily removed scale on the metal surface and a minimum depth of the decarbonized layer.

Keywords: high-carbon wire rod, grade 80 steel, thermal analysis, DSC curve, TG curve, oxidation, decarburization.

Ссылка на статью:

Пивоварова К.Г. Обеспечение качества поверхности высокоуглеродистой стальной катанки // Теория и технология металлургического производства. 2021. №3(38). С. 24-29.

Pivovarova K.G. Quality surface assurance for wire rod of high-carbon steel. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 38, no. 3, pp. 24-29.