

УДК 669.046.564:621.785

РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ НАГРЕВА В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК СТАЛИ МАРКИ 60С2ХА

*Темлянец М.В.¹, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии,
проректор по научной работе и инновациям (uchebn_otdel@sibsiu.ru)*

Коноз К.С.¹, аспирант кафедры теплоэнергетики и экологии

Дзюба А.Ю.², начальник лаборатории сортового проката НТЦ

Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов

*Темлянец Н.В.¹, к.т.н., доцент кафедры горнопромышленной экологии
и безопасности жизнедеятельности*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
² ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
(455019, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

Аннотация. Представлены результаты лабораторных исследований закономерности окалинообразования, кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали марки 60С2ХА. Установлено, что угар резко интенсифицируется при достижении металлом температуры порядка 1000 °С. Появление первых жидкофазных участков в окалине происходит при температурах 1270 – 1280 °С, а оплавление окалины, сопровождающееся ее стеканием с поверхности металла, начинается при 1300 °С. Область температур наиболее интенсивного обезуглероживания стали составляет 950 – 1100 °С; при 1175 °С и выше на поверхности металла наблюдается образование смешанной зоны толщиной 0,030 – 0,045 мм, затрудняющей удаление окалины с поверхности металла. Получены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать угар металла при нагреве под прокатку. Для практического применения на основе детерминированной математической модели разработан металлосберегающий температурный режим нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах с шагающим подом.

Ключевые слова: окисление, обезуглероживание, нагрев в методических печах, сталь марки 60С2ХА.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-545-549

В настоящее время для изготовления пружин различного назначения широкое распространение получила рессорно-пружинная сталь марки 60С2ХА, круглый прокат для навивки пружин из которой производят на сортовых станах посредством горячей прокатки заготовок. Традиционно нагрев последних осуществляют в методических печах, при этом помимо окисления стали происходит процесс ее обезуглероживания.

К прокату из рессорно-пружинной стали предъявляют высокие требования к качеству поверхности, в том числе к глубине видимого обезуглероживанного слоя. Большинство таких изделий работает в условиях кручения или изгиба, при которых максимальные напряжения приходятся именно на поверхностные слои [1 – 6]. Наличие обезуглероживанного слоя в упругих элементах (пружинах, рессорах, прутковых пружинных клеммах и т.п.) наиболее опасно, поскольку резко снижаются их усталостная прочность и предел выносливости. Удаление обезуглероживанного слоя с готового проката является трудоемкой операцией, которая приводит к значительным потерям металла (особенно при сплошной

зачистке). В связи с этим особую актуальность приобретают теплотехнологии, обеспечивающие формирование в готовом прокате минимальной глубины видимого обезуглероживанного слоя. В общем случае формирование последнего происходит при нагреве заготовок в методической печи, прокатке на стане и последующем охлаждении. Принимая во внимание температурно-временной режим этих трех технологических операций, наибольший урон качеству продукции по глубине видимого обезуглероживанного слоя наносит нагрев металла в печи. Одним из эффективных и малозатратных мероприятий по снижению глубины видимого обезуглероживанного слоя на стадии нагрева металла в печи является применение рациональных температурных режимов нагрева, обеспечивающих минимальное воздействие температурно-временного фактора [7, 8]. Для разработки таких режимов нужны эмпирические количественные данные о влиянии температуры и времени нагрева на угар и обезуглероживание стали конкретной марки. Исследованию кинетики высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 60С2 посвя-

щено достаточно много работ [1, 9, 10], однако для стали марки 60С2ХА с повышенным содержанием хрома данные по влиянию температурно-временного фактора на угар и обезуглероживание фактически отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты исследования малоокислительных и малообезуглероживающих режимов нагрева в методических печах с шагающим подом непрерывнолитых заготовок рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА. Исследования включали три блока: получение количественных данных по влиянию температурно-временного фактора на кинетику окисления и обезуглероживания стали; установление температур плавления окалины; разработку малоокислительных температурных режимов нагрева в методических печах.

Сталь марки 60С2ХА имела следующий химический состав: 0,576 % С; 1,439 % Si; 0,660 % Mn; 0,736 % Cr; 0,024 % Ni; 0,031 % Cu; 0,004 % S; 0,008 % P. Кинетику высокотемпературного окисления исследовали в лабораторных условиях с применением дискретного и непрерывного гравиметрических методов. При проведении лабораторных экспериментов использовали три вида образцов: цилиндрические diam. 11 – 13 и длиной 20 – 30 мм, массой 16 – 27 г (для определения обезуглероживания и угара по убыли массы), сечением 3×3×6 мм (для определения угара на дериватографе по методу непрерывной регистрации увеличения массы образца во времени) и 4×4×10 мм (для определения температуры плавления окалины). Образцы вырезали из отрезков (стержней) круглого проката diam. 14 мм. Перед вырезкой образцов стержни отжигали и obtачивали на токарном станке с целью полного удаления обезуглероженного слоя.

Нагрев образцов проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха.

При проведении исследований с помощью дискретного гравиметрического метода, основанного на убыли массы образцов, их нагревали до температур 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 и 1250 °С и выдерживали при постоянной температуре в течение 5, 15 и 25 мин. Время разогрева образцов от 20 °С до температуры выдержки составляло 3 – 5 мин, причем в области температур (до 800 °С) ниже начала интенсивного окисления – порядка 3 мин. При выдержке температура образцов менялась в пределах ±5 – 10 °С. Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевой термопарой, которую устанавливали в высверленное в центре образца отверстие diam. 3,2 и глубиной 12 мм.

До и после опытов геометрические размеры образцов измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, массу определяли на весах Vibra AF-220CE с точностью до 0,1 мг. Для удаления окалины с поверхности образцы подвергали травлению в подогретом до 40 – 60 °С 10 %-ом растворе серной кислоты с добавлением 0,1 г/л тиомочевины.

После нагрева в образцах с помощью металлографического метода определяли глубину видимого обезуглероженного слоя.

При обработке экспериментальных данных считали, что зависимость угара (толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня, который отражает диффузионный механизм окалинообразования [11, 12].

Дополнительно проведена серия экспериментов по дифференциально-термическому анализу образцов при помощи термоанализатора LABSYS. Эксперименты проводили в атмосфере воздуха. Применение термоанализатора позволило непрерывно фиксировать массу образца и тепловые эффекты, вызванные окислением железа и легирующих элементов.

При определении температур плавления печной окалины для более точного измерения температуры образцы крепили непосредственно к спаю термопары. Начало плавления окалины фиксировали визуально через окно печи. В результате статистической обработки экспериментальных данных для прогнозных расчетов угара Y , г/см², получено соотношение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры T , К, и времени τ , мин, нагрева:

$$Y = 348,6 \exp\left(\frac{-12\,660}{T}\right) \sqrt{\tau}.$$

На рис. 1 представлена зависимость угара от температуры и времени выдержки, построенная по экспериментальным данным. На рис. 2 представлены результаты дифференциально-термического анализа. При нагреве образца стали в атмосфере воздуха происходит увеличение его массы за счет окисления железа и легирующих компонентов. В то же время окисление углерода и удаление его оксидов в газовую фазу способствует некоторому снижению массы образца.

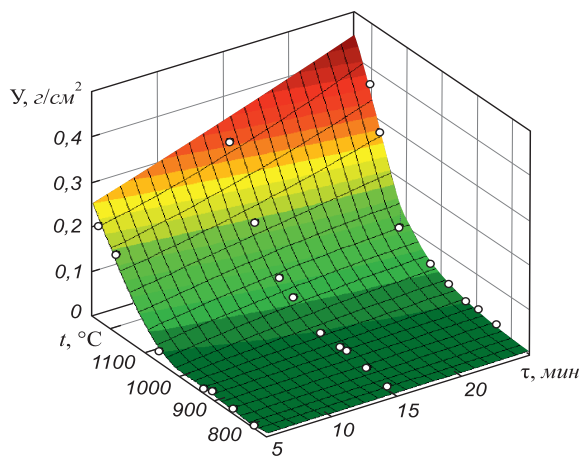


Рис. 1. Зависимость угара стали марки 60С2ХА от температуры t и времени выдержки

Fig. 1. Waste dependence of 60Si2CrA steel from temperature t and soaking time

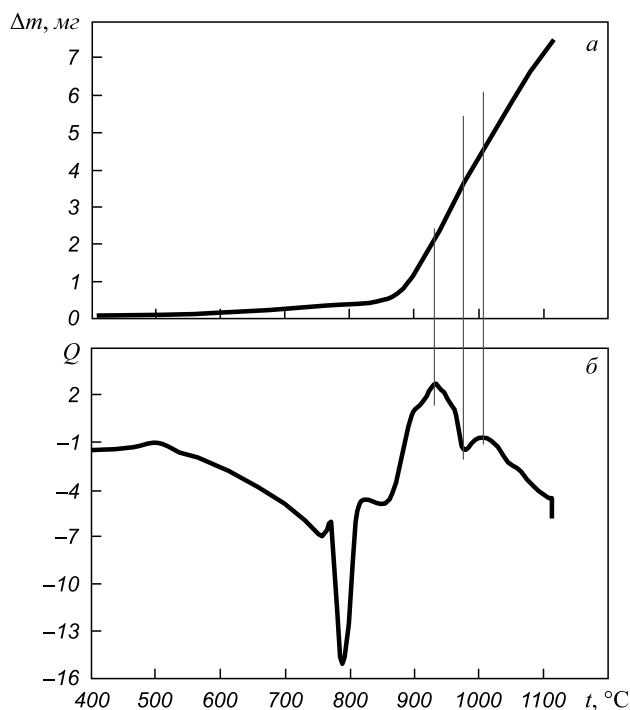


Рис. 2. Дериватограмма изменения массы Δm (а) и теплового эффекта Q (б) образца стали 60С2ХА при нагреве в атмосфере воздуха

Fig. 2. Derivatogram of mass changing Δm (a) and thermal effect Q (б) of 60Si2CrA steel sample at heating in the atmosphere

Исследования угара с помощью гравиметрического метода по потере массы (рис. 1) и на дериватографе (рис. 2) согласуются между собой. На дериватограмме присутствуют два пика на кривой теплового состояния. Один соответствует началу интенсификации угара после перехода стали в аустенитное состояние и образования вюститита, и второй – интенсификации угара в области температур порядка 1000 °С. При увеличении температуры от 900 до 1100 °С угар стали марки 60С2ХА возрастает почти в семь раз.

На рис. 3 представлена зависимость глубины δ , мм, видимого обезуглероженного слоя от температуры и времени нагрева образцов. Для исследуемой марки стали характерно образование полностью обезуглероженного слоя металла глубиной до 0,05 – 0,15 мм при нагреве до 750 °С и выдержке 5 – 25 мин. В интервале 750 – 1100 °С происходит формирование видимого обезуглероженного слоя глубиной до 0,223 мм; область температур наиболее интенсивного обезуглероживания стали составляет 950 – 1100 °С. При более высоких температурах происходит поглощение обезуглероженного слоя окалиной, связанное с превышением скорости окисления стали над скоростью обезуглероживания.

Исследование микроструктуры поверхностных слоев металла показало, что при температурах 1175 °С и выше на поверхности металла наблюдается образование смешанной зоны толщиной 0,030 – 0,045 мм (рис. 4), представляющей собой полностью обезуглероженную сталь (феррит) и оксиды. Наличие такой зоны

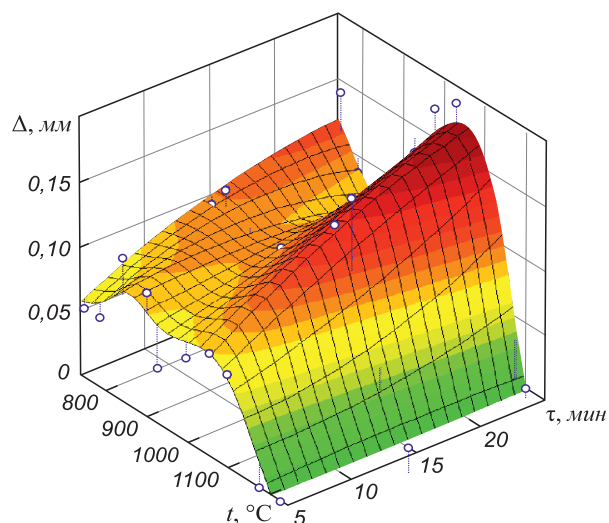


Рис. 3. Зависимость глубины видимого обезуглероженного слоя от температуры и времени выдержки

Fig. 3. Depth dependence of the visible carbon-free layer from the temperature and soaking time

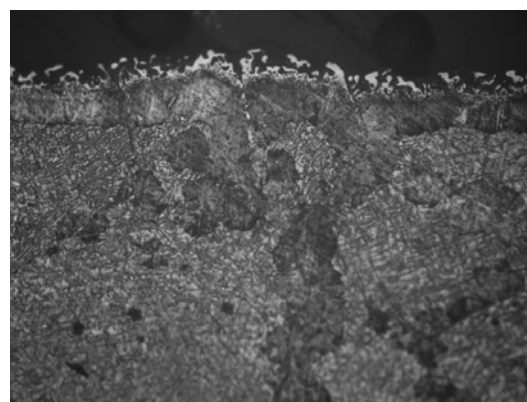


Рис. 4. Микроструктура поверхностных слоев образцов, $\times 400$

Fig. 4. Microstructure of sample surface layers, $\times 400$

способствует формированию сталагмитообразного вида поверхности раздела окалина – сталь, для которого характерно наиболее проблемное отделение окалины от металла. Это может стать причиной образования дефектов поверхности, связанных со вкатанной окалиной.

Анализ результатов исследований температуры плавления окалины показывает, что для окалины, образующейся на стали 60С2ХА, появление первых жидкофазных участков происходит при температурах 1270 – 1280 °С. Оплавление окалины, сопровождающееся ее стеканием с поверхности металла, начинается при температурах 1300 °С. По сравнению с температурой начала плавления окалины стали 60С2, которая составляет 1229 – 1251 °С, температура начала плавления окалины стали марки 60С2ХА выше; это связано с более высоким содержанием хрома, который повышает температуру плавления окалины в среднем на 2 °С на каждые 0,1 % его содержания в стали [1]. По результа-

там рентгеноспектрального анализа окалина содержит 1,66 % Si; 0,70 % Mn и 0,67 % Cr.

Экспериментальные данные показывают, что регламентированная глубина видимого обезуглероженного слоя в готовом прокате может быть достигнута двумя принципиально различающимися подходами к разработке температурного режима. Первый подход основан на повышении температур нагрева до 1200 – 1250 °С и при необходимости времени выдержки металла с целью поглощения обезуглероженного слоя окалиной, создания условий для выгорания поверхностных дефектов [13]. Недостатками такого подхода являются повышенные угар стали, окалинообразование и вероятность появления дефектов по вкатанной окалине. Второй подход основан на реализации пониженных температур нагрева (порядка 1050 °С) [14, 15] и сокращении времени нахождения металла в области температур интенсивного обезуглероживания. Недостатками второго подхода являются повышенные энергозатраты на деформацию, а снижение температуры лимитировано энергосиловыми и прочностными параметрами стана.

На основе полученных экспериментальных данных с применением детерминированной математической модели, представленной в работе [16], провели серию многовариантных расчетов угара и глубины видимого обезуглероженного слоя в непрерывнолитых заготовках поперечным сечением 150×150 мм при нагреве по различным температурным режимам в печи с шагающим подом. Расчеты проводили с ориентацией на реализацию низкотемпературного нагрева, технологию производства и оборудование одного из российских металлургических предприятий. Принимали, что для обеспечения регламентированной глубины видимого обезуглероженного слоя в круглом прокате диам. 14 мм менее 0,14 мм, значение δ в непрерывнолитых заготовках после нагрева в печи должно составлять не более 0,5 мм.

В результате проведенных расчетов разработан ресурсосберегающий температурный режим, представленный на рис. 5. Общее время нагрева 120 мин, это соответствует удельному времени нагрева 8 мин/см при температурах уходящего из печи дыма 650 °С, первой сварочной зоны – 950 °С, второй сварочной зоны – 1080 °С, третьей сварочной зоны – 1120 °С и томильной зоны – 1080 °С. Конечная температура нагрева поверхности 1035 °С, центра – 1001 °С, соответственно перепад температур по сечению заготовки 34 °С (2,3 °С/см). Значение δ составляет 0,303 мм, угар – 0,05 г/см². Разработанный режим нагрева можно отнести к малоокислительному и малообезуглероживающему.

Выводы. Проведено исследование кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали марки 60С2ХА. Установлено, что угар резко интенсифицируется при достижении металлом температуры порядка 1000 °С. Появление первых жидкофазных участков в окалине происходит при температурах

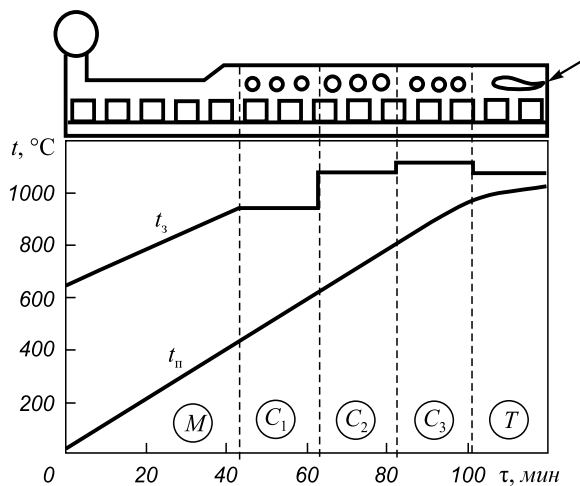


Рис. 5. Металлосберегающий температурный режим нагрева

Fig. 5. Metal-saving temperature heating mode

1270 – 1280 °С, а оплавление окалины, сопровождающееся ее стеканием с поверхности металла, начинается при 1300 °С; область температур наиболее интенсивного обезуглероживания стали составляет 950 – 1100 °С; при 1175 °С и выше на поверхности металла наблюдается образование смешанной зоны толщиной 0,030 – 0,045 мм, затрудняющей удаление окалины с поверхности металла. Для осуществления расчетов угара получены эмпирические зависимости. На основе полученных данных для практического применения разработан ресурсосберегающий режим нагрева непрерывнолитых заготовок в методической печи с шагающим подом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
2. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 496 с.
3. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. – М.: Интекст, 2002. – 208 с.
4. Семихатский С.А., Панфилов Ю.А., Кузнецова А.И., Шушарин Д.А. Технология производства прутковых пружинных клемм // КИП. 2006. № 10. С. 43 – 48.
5. Потемкин К.Д., Наговицин В.В., Захарова В.Д. и др. Борьба с обезуглероживанием рессорной полосы и влияние термической обработки на ее усталостную прочность и долговечность // Сталь. 1971. № 7. С. 642 – 644.
6. Бочков Н.Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
7. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1972. – 439 с.
8. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
9. Леонидова М.Н., Шварцман Л.А., Шульц Л.А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируруемыми атмосферами. – М.: Металлургия, 1980. – 263 с.
10. Темлянец М.В., Темлянец Н.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей

- // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 3. С. 50 – 52.
11. Окисление и обезуглероживание стали / А.И. Ващенко, А.Г. Зеньковский, А.Е. Лифшиц и др. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
 12. Губинский В.И., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. Уменьшение окислинобразования при производстве проката. – Киев: Техніка, 1981. – 135 с.
 13. Кугушин А.А., Челышев Н.А., Маняк В.В., Омелин А.А., Ереметов А.М. Выгорание поверхностных дефектов при нагреве металла под прокатку // Изв. вуз. Черная металлургия. 1973. № 12. С. 72 – 74.
 14. Губинский В.И., Куян Ю.В., Бровкин В.Л. и др. Применение низкотемпературного режима нагрева и прокатки при производстве катанки // Сталь. 1991. № 3. С. 49 – 51.
 15. Губинский В.И., Куян Ю.В., Бровкин В.Л. К вопросу оптимальной температуры нагрева металла в печи при минимальных затратах в системе печь – стан // Изв. вуз. Черная металлургия. 1989. № 9. С. 157, 158.
 16. Перетятко В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Нагрев стальных слябов. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.

Поступила 16 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 8, pp. 545–549.

DEVELOPMENT OF METALL-SAVING MODES IN CONTINUOUS FURNACES FOR HEATING OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS OF 60Si2CrA STEEL

Temlyantsev M.V.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal power and Ecology”, Vice-Rector for Research and Innovations (uchebn_otdel@sibsiu.ru)

Konoz K.S.¹, Postgraduate of the Chair “Thermal power and Ecology”

Dziuba A.Y.², Head of the Laboratory of Sectional Iron of Research and Development Centre

Umanskii A.A.¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy

Temlyantsev N.V.¹, Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair of Mining Ecology and Life Safety

¹ Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² JSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (93, Kirova str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455019, Russia)

Abstract. The paper presents the results of laboratory studies of scaling laws, the kinetics of high-temperature oxidation and decarbonization of 60Si2CrA steel. It has been established that the waste is intensified sharply when the temperature of the metal is about 1000 °C. The appearance of the first liquid-phase areas in the scale occurs at temperatures of 1270 – 1280 °C, and the melting of the scale, accompanied it to the runoff in metal surface begins at 1300 °C. The temperature range of the most intense decarbonization of steel is 950 – 1100 °C; at 1175 °C and above on the metal surface, the formation of the mixed zone thickness of 0,030 – 0,045 mm, complicating remove scale from the surface of the metal. The received empirical dependence helps to forecast the waste of metal during heating for rolling. For practical use, based on a deterministic mathematical model, a metal-saving temperature mode for heating of continuously cast billets in continuous walking-beam furnaces has been developed.

Keywords: oxidation, decarbonization, heating in continuous furnaces, steel of 60Si2CrA grade.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-545-549

REFERENCES

1. Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Okislenie i obezугlerozhivanie stali v protsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Oxidation and decarbonization of steel in the heating processes for forming operations]. Moscow: Teplotekhnik, 2006. 200 p. (In Russ.).
2. Rakhshadt A.G. *Pruzhinnye stali i splavy* [Spring steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 496 p. (In Russ.).
3. Fedin V.M. *Ob'emno-poverkhnostnaya zakalka detalei podvzhnogo sostava i verkhnego stroeniya puti* [Bulk-surface hardening of rolling stock parts and superstructure]. Moscow: Intekst, 2002. 208 p. (In Russ.).
4. Semikhatskii S.A., Panfilov Yu.A., Kuznetsova A.I., Shusharin D.A. Production engineering of bar spring terminals. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2006, no. 10, pp. 43–48. (In Russ.).
5. Potemkin K.D., Nagovitsin V.V., Zakharova V.D. etc. Struggle with decarburization of spring plate and the influence of thermal treatment on its fatigue strength and life. *Stal'*. 1971, no. 7, pp. 642–644. (In Russ.).
6. Bochkov N.G. *Proizvodstvo kachestvennogo metalla na sovremennykh sortovykh stanakh* [Production of high quality metal on modern sectional machines]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 312 p. (In Russ.).
7. Butkovskii A.G., Malyi S.A., Andreev Yu.N. *Optimal'noe upravlenie nagrevom metalla* [Optimal control of metal heating]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 39 p. (In Russ.).
8. Butkovskii A.G., Malyi S.A., Andreev Yu.N. *Upravlenie nagrevom metalla* [Metal heating control]. Moscow: Metallurgiya, 1981. 272 p. (In Russ.).
9. Leonidova M.N., Shvartsman L.A., Shul'ts L.A. *Fiziko-khimicheskie osnovy vzaimodeistviya metallov s kontroliruemymi atmosferami* [Physicochemical metal interaction basis with the controlled atmospheres]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 263 p. (In Russ.).
10. Temlyantsev M.V., Temlyantsev N.V. High-temperature oxidation and decarburization of silicon spring steel. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2005, no. 3, pp. 50–52. (In Russ.).
11. Vashchenko A.I., Zen'kovskii A.G., Lifshits A.E. etc. *Okislenie i obezугlerozhivanie stali* [Oxidation and decarburization of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 336 p. (In Russ.).
12. Gubinskii V.I., Minaev A.N., Goncharov Yu.V. *Umen'shenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata* [Decrease of scaling at rolled iron production]. Kiev: Tekhnika, 1981. 135 p.
13. Kugushin A.A., Chelyshev N.A., Manyak V.V., Omelin A.A., Eremetov A.M. Burning of surface defects at metal heating for rolling. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1973. no. 12, pp. 72–74. (In Russ.).
14. Gubinskii V.I., Kuyan Yu.V., Brovkin V.L. etc. Usage of a low-temperature heating mode and rolling at rolled wire producing. *Stal'*. 1991, no. 3, pp. 49–51. (In Russ.).
15. Gubinskii V.I., Kuyan Yu.V., Brovkin V.L. The optimal low temperature heating and rolling mode at rod production. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989, no. 9, pp. 157, 158. (In Russ.).
16. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev N.V., Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Nagrev stal'nykh slyabov* [Heating of steel slabs]. Moscow: Teplotekhnik, 2008. 192 p. (In Russ.).

Received February 16, 2015