

УДК 621.78

*Статья посвящается 85-летию кафедры теплоэнергетики и экологии Сибирского государственного индустриального университета*

*М.В. Темлянецв, С.Г. Коротков, Е.Н. Темлянцева*

**Сибирский государственный индустриальный университет**

## **РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ МАЛООКИСЛИТЕЛЬНЫХ И МАЛООБЕЗУГЛЕРОЖИВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ НАГРЕВА СТАЛИ**

При современном уровне развития науки и техники одним из основных способов придания стали необходимой для обработки давлением пластичности и снижения сопротивления деформации является нагрев. В настоящее время наибольшее распространение получил высокотемпературный нагрев стали до 1100 – 1250 °С. Нагрев металла в камерных и методических, электрических и пламенных печах с атмосферой воздуха или продуктов сгорания неизбежно сопровождается окислением и обезуглероживанием поверхностных слоев металла. Эти явления негативно сказываются на качестве и себестоимости металлопродукции, технико-экономических показателях печей и агрегатов для обработки металлов давлением (ОМД).

В 50 – 70-е годы прошлого века в металлургии сформировалось целое научное направление – малоокислительный и безокислительный нагрев стали, ориентированный на ресурсосбережение, уменьшение потерь металла.

В Сибирском государственном индустриальном университете коллективом ученых кафедры теплоэнергетики и экологии исследования в области теории и технологии малоокислительного и малообезуглероживающего нагрева стали реализуются с начала 40-х годов прошлого века. Развитие научной деятельности сибирских теплотехников связано с приходом в 1940 г. в Сибирский институт черных металлов профессора И.С. Назарова. По его инициативе в послевоенные годы создан парк полупромышленных камерных печей скоростного нагрева, освоение работы которых поставило перед учеными целый ряд новых научных задач, в их числе – исследование особенностей окисления и обезуглероживания стали при скоростном нагреве. Следствием развития этого научного направления послужили защиты кандидатских диссертаций заведующим кафедрой, доцентом Е.И. Корочкиным, тема «Исследование окисления малоуглеродистой стали при скоростном нагреве» (1968 г.), инженером Б.И. Сельским, тема «Исследование

окисления стали в цикле производства проката» (1972 г.) и доцентом Ю.Е. Михайленко, тема «Исследование процесса обезуглероживания при скоростном нагреве под прокатку» (1981 г.) [1].

В начале XXI века в условиях жесткой конкуренции Российских и зарубежных производящих сталь компаний, при необходимости снижения себестоимости и повышения качества металлопродукции ресурсосберегающие технологии малоокислительного и безокислительного нагрева стали приобретают особую актуальность, а исследования кафедры – системный и комплексный характер. Исследования вели по пяти укрупненным тематическим направлениям:

1 – Кинетика окисления и обезуглероживания сталей, влияние на нее температурно-временного фактора и легирующих элементов стали.

2 – Особенности химического и фазового составов, строения, температуры плавления окалина, поверхности раздела окалина – сталь и влияние различных факторов на окалиноудаление при деформировании металла.

3 – Математическое моделирование процессов окисления и обезуглероживания стали.

4 – Разработка защитных покрытий для снижения интенсивности окисления и обезуглероживания сталей.

5 – Разработка и промышленное внедрение малоокислительных и малообезуглероживающих технологий нагрева стали под обработку давлением.

За последние 15 лет результатами разработок по этим пяти направлениям стали защиты М.В. Темлянцевым докторской диссертации на тему «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали» (2007 г.) и четырех кандидатских диссертаций: А.Ю. Сюсюкиным «Повышение качества рельсов на основе применения малоокислительных и малообезуглероживающих

технологий нагрева непрерывнолитых заготовок» (2007 г.), Н.В. Темлянцева «Повышение качества толстолистового проката на основе применения рациональных режимов нагрева стали в печах и деформационного окалиноудаления» (2007 г.), О.Д. Олендаренко «Разработка металлосберегающей технологии нагрева непрерывнолитых заготовок рельсовой стали в методических печах» (2010 г.), О.Л. Базайкиной «Разработка металлосберегающей технологии нагрева многогранных слитков в камерных печах» (2014 г.).

В результате проведенных исследований установлены зависимости и закономерности влияния температурно-временного фактора на кинетику высокотемпературного окисления и обезуглероживания широкого сортамента сталей: конструкционных сталей углеродистых марок 10, 3сп, 3пс, 20, 5сп, 6сп, 45, 50, 60, 70; легированных сталей – 40Х, 40ХН, 09Г2С, 12ГС, 20Г2Р, 25Г2С, 30Г1Р, 35ГС, 15ХСНД, 30ХГСА, 34ХН1М, 5ХНМ; рельсовых сталей – М54, М76, Э76Ф, Э78ХСФ, Э30ХГ2САФМ; рессорно-пружинных сталей – 65Г, 40С2, 60С2, 60С2ХА [2 – 19]. В качестве основного метода исследований окисления использованы разновидности гравиметрического: по увеличению и по потере массы образца. Процессы обезуглероживания исследовали металлографическим методом. Для стали каждой марки получены соотношения, позволяющие прогнозировать угар в зависимости от температуры и времени выдержки при постоянной температуре.

Комплекс исследований химического и фазового составов, строения, температуры плавления окалина, поверхности раздела окалина – сталь и влияние различных факторов на окалиноудаление при деформировании металла проведен для сталей марок 3пс, 40С2, 60С2, 60С2ХА, 12ГС, 20Г2Р, 30Г1Р, 25Г2С, 18Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, 65Г, Э76Ф, 30ХГСА, 09Г2Д, 09Г2С, ШХ15СГ, 45Г17Ю3, 12ХМ, 10КП, 40Х, 40ХН, 34ХН1М, 5ХНМ [2, 20 – 24].

Экспериментальным путем исследовано удаление окалина при прокатке с поверхности образцов из сталей марок 30ХГСА, 15ХСНД, 40Х, 3пс, 60С2. Установлено, что наилучшее отделение окалина наблюдается при прокатке стали марки 3пс, наихудшее – 60С2. Отделение окалина связано с повышенным содержанием кремния. Выявлены три характерных типа строения поверхности раздела окалина – сталь, которые по возрастанию температуры нагрева и прочности сцепления окалина со сталью можно расположить в следующей последовательности: слоевой (послойный), зернограницный, сталагмитообразный. Установлено, что наибольшее влия-

ние на снижение температуры плавления окалина оказывает кремний (образующий фаялит): в среднем 5 – 8 °С на каждые 0,1 % его содержания в стали. Медь также снижает температуру плавления, но на величину 2 – 3 °С на каждые 0,1 % ее содержания. Марганец фактически не оказывает влияния на температуру плавления окалина. Хром и никель повышают температуру плавления в среднем на 2 °С на каждые 0,1 % их содержания в стали. Для сплавов на железной основе и сталей максимальная температура плавления окалина приближается к температуре плавления вюстита 1377 °С, а хром и никель способствуют этому [2].

Для осуществления многовариантных прогнозных расчетов совместно протекающих процессов высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали при нагреве в промышленных методических и камерных печах, совершенствования существующих и разработки новых теплотехнологий разработаны детерминированные математические модели [2, 4, 5]. Созданные математические модели позволяют рассчитывать величину угара, толщину окалина и глубину видимого обезуглероженного слоя по мере нагрева заготовок круглой и квадратной (блюмы) формы, слябов и многогранных слитков.

Применение математических моделей позволило выявить и спрогнозировать впоследствии экспериментально подтвержденные особенности параллельно протекающих и оказывающих взаимное влияние друг на друга процессов окисления и обезуглероживания, например, установить, что при повторном нагреве в методических печах непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76Ф с исходным обезуглероженным слоем на кривой зависимости глубины обезуглероженного слоя от времени нагрева наблюдается три характерных участка. На первом участке (область температур от 20 до 700 – 800 °С) глубина обезуглероженного слоя практически не изменяется; это связано с низкой скоростью диффузионных процессов окисления и обезуглероживания стали. На втором участке, соответствующем области температур 800 – 1050 °С, процессы окисления интенсифицируются, при этом скорость диффузии углерода остается достаточно низкой. Это приводит к поглощению окалиной имеющегося обезуглероженного слоя и уменьшению его толщины. На третьем участке при температурах более 1050 °С диффузия углерода интенсифицируется, это приводит к росту глубины обезуглероженного слоя. Таким образом установлено, что в исследованных условиях, соответствующих промышленному нагреву, формирование обезуглеро-

женного слоя происходит не по принципу монотонного нарастания, а по принципу частичной замены с нарастанием [4].

В области применения защитных покрытий проработано два концептуально различающихся направления: керамические покрытия, не образующие жидких фаз и образующие жидкие фазы при нагреве.

Первый тип покрытий разработан и апробирован в промышленных условиях для нагрева непрерывно литых заготовок рельсовой стали в методических печах. Установлено, что наиболее перспективными являются покрытия на основе периклаза (фракция менее 0,15 мм) с минимальным содержанием углерода. Такие покрытия сохраняют свои защитные свойства до температур 1250 °С и обеспечивают снижение интенсивности обезуглероживания и угара стали примерно в два раза. Качество поверхности металла после высокотемпературного нагрева с применением периклазосиликатных покрытий гораздо выше, чем при использовании покрытий алюмосиликатного состава [25, 26].

Второй тип покрытий на основе силикатных стекол разработан для условий нагрева непрерывнолитых заготовок стали марки 60С2ХА в методических печах [27]. Применение покрытия обеспечило фактически полное отсутствие видимого обезуглероженного слоя в металле, при этом угар снизился почти в 1,7 раза. Лабораторные эксперименты показали, что после удаления покрытия поверхность образцов гладкая, имеет характерный металлический блеск стали. Шероховатость поверхности образцов после нагрева с покрытием значительно меньше, чем образцов, нагретых без покрытия [28].

Проведенные исследования стали основой для разработки и внедрения металлосберегающих малоокислительных и малообезуглероживающих технологий и режимов нагрева стали на различных предприятиях России [4, 27, 29 – 34].

**Выводы.** Рассмотрены основные результаты работы коллектива ученых кафедры теплоэнергетики и экологии Сибирского государственного индустриального университета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Темлянец М.В., Коротков С.Г., Стерлигов В.В. Кафедра теплофизики и промышленной экологии СибГИУ. 75 лет в образовании и науке. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – 163 с.
2. Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. Монография. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
3. Дефекты и качество рельсовой стали. Справочник / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, Т.Н. Осколкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
4. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
5. Нагрев стальных слябов / В.Н. Перетятыко, Н.В. Темлянец, М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
6. Темлянец М.В., Стариков В.С., Журавлев Б.К., Темлянец Н.В. Исследование окисления низколегированных кремнемарганцовистых сталей при нагреве в электрических печах сопротивления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 4. С. 47 – 49.
7. Темлянец М.В., Стариков В.С., Темлянец Н.В., Журавлев Б.К. Окисление углеродистых конструкционных сталей при нагреве в атмосфере воздуха под обработку давлением // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 5. С. 44 – 46.
8. Темлянец М.В., Стариков В.С., Темлянец Н.В., Сюсюкин А.Ю. Исследование окисления и обезуглероживания сталей для рельсов и рельсовых накладок при нагреве под прокатку // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 8. С. 36 – 38.
9. Темлянец М.В., Темлянец Н.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 3. С. 50 – 52.
10. Темлянец М.В., Сюсюкин А.Ю., Темлянец Н.В. Металлографическое исследование поверхностного обезуглероженного слоя рельсов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 37 – 40.
11. Михайленко Ю.Е., Темлянец М.В. Исследование кинетики процессов окисления и обезуглероживания высокоуглеродистой стали при нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 10. С. 44 – 47.
12. Темлянец М.В., Колотов Е.А., Сюсюкин А.Ю. Определение угара и обезуглероживания непрерывно литых заготовок рельсовой стали при нагреве в методических печах с шагающими балками // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 62, 63.
13. Темлянец М.В. Исследование процессов окисления и обезуглероживания стали при нагреве // Сталь. 2007. № 3. С. 58 – 60.
14. Базайкина О.Л., Темлянец М.В., Казимиров С.А., Запольская Е.М. Исследование высокотемпературного окисления и обезуглероживания легированных сталей марок 40ХН, 34ХН1М, 5ХН при нагреве под обработку давлением // Вестник Сибирского государственного университета. 2013. № 2 (4). С. 13 – 17.
15. Темлянец М.В., Олендаренко О.Д. Окисление рельсовой стали Э30ХГ2САФМ при высоко-

- температурном нагреве под прокатку // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 41 – 43.
16. Темлянцева М.В., Олендаренко О.Д. Исследование высокотемпературного окисления и обезуглероживания рельсовой стали марки Э78ХСФ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 60, 61.
  17. Темлянцева М.В., Коноз К.С., Горюшкин В.Ф., Живаго Э.Я., Целлермаер В.Я. Исследование процессов высокотемпературного окисления и обезуглероживания низколегированных борсодержащих сталей 20Г2Р и 30Г1Р при нагреве под прокатку // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 4. С. 34 – 38.
  18. Темлянцева М.В., Слажнева К.С., Дзюба А.Ю., Уманский А.А., Темлянцева Н.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. Вып. 33. С. 55 – 63.
  19. Темлянцева М.В., Коноз К.С., Кузнецова О.В., Живаго Э.Я., Целлермаер В.Я. Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окалины // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 48 – 54.
  20. Темлянцева М.В., Темлянцева Н.В. Исследование химического состава окалины пружинной стали 60С2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 75 – 76.
  21. Темлянцева М.В., Темлянцева Н.В. О некоторых особенностях состава окалины, образующейся на марганцовистых сталях при высокотемпературном нагреве // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 8. С. 69, 70.
  22. Темлянцева М.В. Состав окалины, образующейся на стали 45Г17Ю3 при высокотемпературном нагреве // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 1. С. 55.
  23. Темлянцева М.В., Темлянцева Н.В. Исследование температур оплавления образующейся при нагреве стали печной окалины // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 9. С. 51 – 53.
  24. Перетягко В.Н., Темлянцева Н.В. Удаление окалины с поверхности низко- и среднелегированных сталей при прокатке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 10. С. 23 – 26.
  25. Темлянцева М.В., Темлянцева Е.Н., Олендаренко О.Д. Разработка составов защитных покрытий для снижения окисления и обезуглероживания рельсовой стали при нагреве под прокатку // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 2. С. 44 – 46.
  26. Темлянцева М.В., Олендаренко О.Д. Применение защитных покрытий для снижения угара рельсовой стали при нагреве под прокатку // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 2. С. 69, 70.
  27. Темлянцева М.В., Коноз К.С., Дзюба А.Ю., Уманский А.А., Темлянцева Н.В. Разработка металлосберегающих режимов нагрева в методических печах непрерывнолитых заготовок стали марки 60С2ХА // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 8. С. 545 – 549.
  28. Темлянцева М.В., Дзюба А.Ю., Темлянцева Е.Н., Коноз К.С., Живаго Э.Я., Горюшкин В.Ф. Применение покрытий для защиты рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА от окисления и обезуглероживания при нагреве под прокатку // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2015. Вып. 35. С. 38 – 43.
  29. Михайленко Ю.Е., Темлянцева М.В. Разработка теплотехнологии, обеспечивающей снижение глубины видимого обезуглероженого слоя в стальном прокате // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 8. С. 32, 33.
  30. Михайленко Ю.Е., Темлянцева М.В. Снижение обезуглероживания стали при нагреве в методических печах // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 8. С. 54 – 56.
  31. Темлянцева М.В., Колотов Е.А., Сюсюкин А.Ю., Гаврилов В.В. Разработка технологии нагрева рельсовых заготовок в методической печи с шагающими балками // Сталь. 2006. № 12. С. 33 – 35.
  32. Темлянцева М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю., Темлянцева Н.В. Нагрев под прокатку непрерывнолитых заготовок рельсовой электростали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 69, 70.
  33. Темлянцева М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Кожеурова Л.Т. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 12. С. 47 – 49.
  34. Филиппова М.В., Перетягко В.Н., Темлянцева М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2016. – 269 с.

© 2019 г. М.В. Темлянцева, С.Г. Коротков,  
Е.Н. Темлянцева  
Поступила 12 сентября 2019 г.