

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В СРЕДЕ УГЛЕРОДА

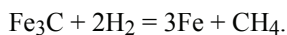
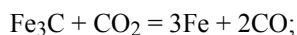
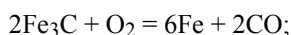
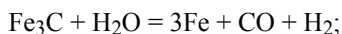
А. И. Буренина, А. П. Королев, М. В. Макарчук

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; korolevanpal@yandex.ru*

Ключевые слова: зеренная структура; механические свойства стали; микроструктура; полный перекристаллизационный отжиг; содержание углерода; углеродистая сталь.

Аннотация: Рассмотрены связи структуры углеродистой стали в качественном и количественном смысле и содержания углерода в ней с процессами термической обработки. Дано описание экспериментов, проведенных в процессе полного перекристаллизационного отжига стали на воздухе и в среде углерода. Показано, что можно контролировать содержание углерода и предотвращать обезуглероживание при многократной термической обработке стали. Представлены процессы, которые нельзя устранить при термоциклировании, например, изменение размера зерна. Отображены и проконтролированы механические свойства углеродистой стали после каждого цикла термообработки.

При производстве деталей машин и механизмов в машиностроительной отрасли иногда требуется подвергать высокоуглеродистые стали многократному отжигу. Например, для изменения формы цементита в структуре заэвтектоидной стали в целях изменения механических и технологических свойств, сплав требуется нагреть выше линии эвтектоидного превращения до 760...780 °С и охладить ниже этой линии до температуры примерно 680 °С не один раз. При этом в процессе длительной выдержки стали при высокой температуре может произойти обезуглероживание [1]. При отжиге на воздухе или в вакууме углерод будет покидать структуру. Механизм обезуглероживания в вакууме или на воздухе разный, но в любом случае содержание углерода уменьшается. В вакууме углерод с поверхности стали испаряется, и создается градиент его концентрации от поверхности образца к сердцевине, являющийся условием термической диффузии углерода к поверхности, с которой продолжается испарение. На воздухе обезуглероживание происходит путем химических реакций [1]. Карбид железа вступает в реакции с парами воды, кислородом, углекислым газом и водородом:



Согласно указанным химическим реакциям, некоторые химические процессы могут стать даже опасными для экологии и техногенными. Например, малые по размеру атомы водорода при высокой температуре диффундируют в кристаллическую решетку стали и взаимодействуют с углеродом карбида железа. Кроме карбида углерод находится, хоть и в небольшом количестве, в твердом растворе внедрения в решетке железа. Этот углерод также соединяется с водородом. Образовавшийся метан создает в структуре механические напряжения, приводящие к «водородной коррозии» и образованию трещин, которые уже вызывали аварии на зарубежных нефтезаводах. Все это говорит о том, что отжиг углеродистых сталей, тем более длительный, надо проводить в защитной среде.

После первого полного отжига на воздухе при температуре 770 °С структура стали с содержанием углерода около 1,2 % будет иметь вид, показанный на микрофотографии (рис. 1, а). Изображение структуры получено не только с помощью оптической, но и с помощью туннельной электронной микроскопии [2].

На микрофотографии видны в структуре зерна «глобулярного» цементита. После проведения повторного и последующих отжигов на воздухе твердость стали уменьшается (рис. 2) [1]. Это связано с понижением содержания углерода на поверхности сплава. Поверхностная структура после нескольких отжигов становится доэвтектоидной (рис. 1, б) [1].

На микрофотографии видны две составляющие доэвтектоидной структуры – перлит и феррит. Вместе с изменением фазового состава (появление в структуре фазы α) происходит и измельчение зерна.

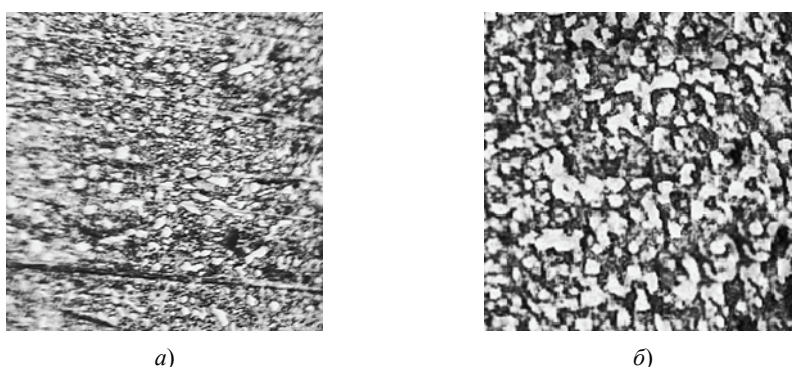


Рис. 1. Микроструктура исследуемого образца стали после первого (а) и второго (б) полных перекристаллизационных отжигов при температуре 770 °С ($\times 650$)

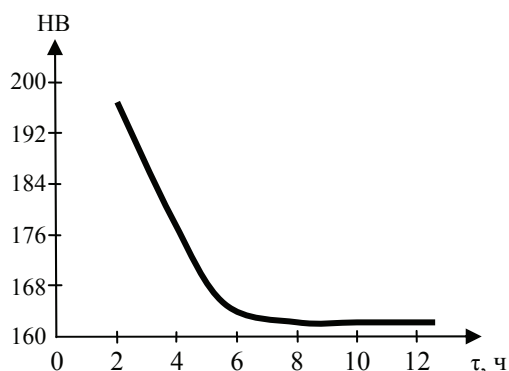


Рис. 2. Зависимость твердости стального образца от времени отжига

Появление нежелательной α -фазы и, соответственно, уменьшение содержания углерода можно предотвратить различными способами. В ходе выполнения работы проведено экспериментальное исследование изменения структуры при многократном циклическом отжиге в среде углерода. Для эксперимента взята представленная выше сталь с содержанием углерода примерно 1,2 %. Отжиг проводили в стальном ящике, погрузив стальной образец в древесный уголь. Это самый доступный технологический способ отжига с сохранением содержания углерода в том количестве, которое было до термообработки. Отжиг проходил при температуре 770 °С. Образец нагревался до заданной температуры в течение 1 ч. Динамика нагрева приведена на рис. 3, а. Диффузия углерода в кристаллической решетке началась уже в процессе нагрева. Данный факт надо учитывать для более точного описания изменения концентрации углерода во времени при нагревании и выдержке. Охлаждение стального образца вместе с печью проходило достаточно медленно, поэтому часть этапа охлаждения нельзя исключить из выдержки при температуре диффузионной подвижности углерода (рис. 3, б).

После отжига в среде углерода твердость образца составила 179 НВ, что соответствует твердости стали с содержанием углерода 1,2 %. Структура после первого отжига приведена на микрофотографии (рис. 4, а).

При большем увеличении ($\times 1250$) на микрофотографии структуры видны глобулярные зерна цементита, образовавшиеся после частичного растворения цементитной сетки перлито-цементитной структуры. Твердость стали после первого

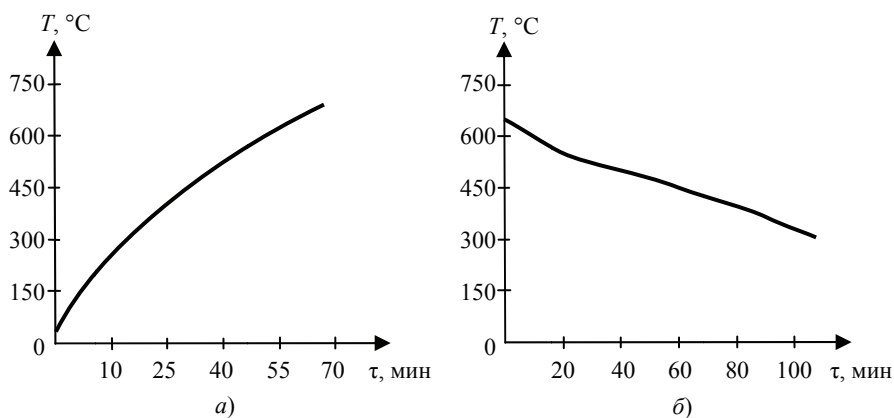


Рис. 3. Динамика нагрева (а) и охлаждения (б) печи с заготовкой

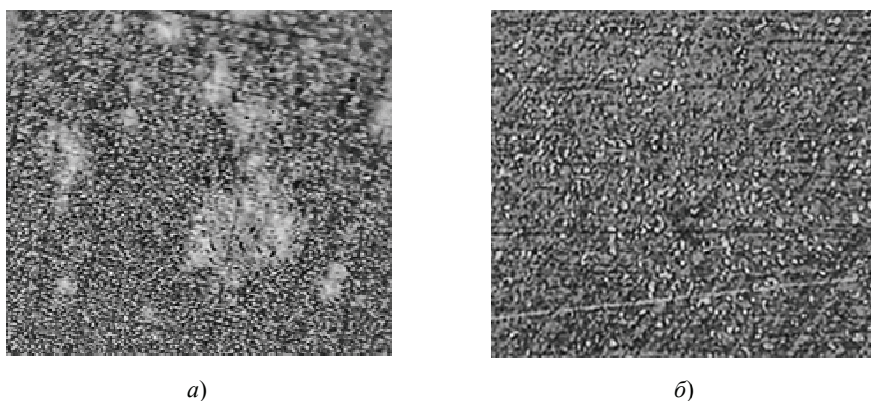


Рис. 4. Микроструктура зернистого перлита стали после первого (а) ($\times 1250$) и седьмого (б) ($\times 650$) отжигов в среде углерода

отжига осталась на том же уровне 176...179 НВ. Такой результат свидетельствует об отсутствии «выгорания» углерода. Далее проведено еще шесть циклов отжига с такими же режимами: выдержка при температуре 770 °С в течение одного часа и последующее охлаждение вместе с печью. После заключительного седьмого отжига структура осталась перлитной, но более однородной, с округлыми зернами цементита (рис. 4, б). Увеличение изображения на снимке в два раза меньше, по сравнению с рис. 4, а, что позволяет увидеть больший фрагмент микроструктуры, на котором изображение зерен цементита мельче. Как показано выше, уже после второго отжига на воздухе структура поверхностного слоя высокоуглеродистой заэвтектоидной стали превращается в феррито-перлитную структуру доэвтектоидной стали. Эксперименты с отжигом в среде углерода показали, что структура остается перлитно-цементитной даже после семи отжигов. Меняется только размер зерна. Твердость образца после седьмого отжига несколько уменьшилась по сравнению с первым отжигом с 170...179 до 163...170 НВ. Это незначительное уменьшение твердости может быть связано с релаксацией напряженных состояний в результате уменьшения количества структурных дефектов при длительном отжиге.

Из вышесказанного следует, что отжиг стали в среде углерода полностью сохраняет содержание углерода в сплаве. В результате отжига меняется форма структурной составляющей – цементита и уменьшается размер зерна. Представленный способ не является единственным в борьбе с обезуглероживанием, но может быть широко использован благодаря простоте и надежности в тех случаях, когда позволяют условия и требования к качеству структуры стали.

Список литературы

1. Влияние многократного отжига на структуру и свойства высокоуглеродистой стали / А. П. Королев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 337 – 343. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.337-343

2. Проценко, И. Г. Использование сканирующей зондовой микроскопии для изучения структуры и свойств постоянных магнитов / И. Г. Проценко, А. П. Королев, И. С. Филатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 701 – 707. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707

Cyclic Annealing of High Carbon Steel in Carbon Environment

A. I. Burenina, A. P. Korolev, M. V. Makarchuk

*Department of Materials and Technology,
TSTU, Tambov, Russia; korolevanpal@yandex.ru*

Keywords: grain structure; mechanical properties of steel; microstructure; complete recrystallization annealing; carbon content; carbon steel.

Abstract: Relationships of the structure of carbon steel in the qualitative and quantitative sense and its carbon content with heat treatment processes are considered. A description of the experiments carried out in the process of complete recrystallization annealing of steel in air and in a carbon environment is given. It is shown that it is possible to control the carbon content and prevent decarburization during repeated heat treatment of steel. The processes that cannot be eliminated during thermal cycling, for example, changing the grain size, are presented. The mechanical properties of carbon steel are displayed and controlled after each heat treatment cycle.

References

1. Korolev A.P., Burenina A.I., Makarchuk M.V., Tolstov N.A. [The influence of multiple annealing on the structure and properties of high carbon steel], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 337-343, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.337-343 (In Russ., abstract in Eng.)
 2. Protsenko I.G., Korolev A.P., Filatov I.S. [Use of scanning probe microscopy to study the structure and properties of permanent magnets], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 701-707, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707 (In Russ., abstract in Eng.)
-

Zyklisches Glühen von Kohlenstoffstahl in Kohlenstoffumgebung

Zusammenfassung: Es sind die Zusammenhänge der Struktur von Kohlenstoffstahl im qualitativen und quantitativen Sinne und seines Kohlenstoffgehalts mit Wärmebehandlungsprozessen betrachtet. Es ist die Beschreibung der Versuche gegeben, die beim vollständigen Rekristallisationsglühen von Stahl in Luft und in einer Kohlenstoffumgebung durchgeführt wurden. Es ist gezeigt, dass es möglich ist, den Kohlenstoffgehalt zu kontrollieren und eine Entkohlung bei der wiederholten Wärmebehandlung von Stahl zu verhindern. Es werden die Prozesse vorgestellt, die während des thermischen Kreislaufs nicht eliminiert werden können, beispielsweise das Ändern der Korngröße. Die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoffstahl sind nach jedem Wärmebehandlungszyklus angezeigt und kontrolliert.

Recuit cyclique en acier à haute teneur en carbone dans l'environnement du carbone

Résumé: Sont examinés les liens de la structure de l'acier au carbone dans le sens qualitatif et quantitatif et de la teneur en carbone dans celui-ci avec les processus de traitement thermique. Est donnée une description des expériences menées dans le processus de recuit de recristallisation complète de l'acier dans l'air et dans le milieu du charbon. Est montré qu'il est possible de contrôler la teneur de carbone et d'empêcher la désulfuration lors du traitement thermique multiple de l'acier. Sont présentés les processus qui ne peuvent pas être éliminés lors du thermocyclage, tels que le redimensionnement des grains. Sont affichées et contrôlées les propriétés mécaniques de l'acier de carbone après chaque cycle du traitement thermique.

Авторы: *Буренина Анна Игоревна* – студент; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Макаrchук Максим Валерьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.