

ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

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

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

Ключевые слова: металлический сплав; микроструктура; отжиг; перекристаллизация; термообработка; фазовый состав.

Аннотация: Дано описание влияния времени выдержки стали при высокой температуре на ее структуру, от которой зависят механические и эксплуатационные свойства. Рассмотрено не просто влияние температуры, а именно цикличность нагрева и охлаждения. Исследованы многократные нагрев и охлаждение, приводящие к фазовым превращениям в структуре доэвтектоидной стали. Рассмотрен и описан процесс обезуглероживания структуры. Приведены снимки исследуемых микроструктур, на которых видно, что сплав не только обезуглероживается, но и меняются размеры зерен. Проведен теоретический анализ влияния циклического отжига и дано описание его практического подтверждения.

Многие металлические сплавы, в том числе стали, подвергаются термической обработке, в результате которой могут качественно меняться микроструктура сплава, происходить нежелательные изменения, приводящие к снижению эксплуатационных характеристик изделий из материалов, прошедших термообработку. Воздействие температуры может быть длительным, циклическим с различным влиянием на механические свойства сплава. Для того чтобы прогнозировать свойства сплавов после технологических операций, связанных с нагревом и охлаждением, необходимо знать процессы, происходящие в структуре под действием температуры, и результат их воздействия.

Процесс изготовления изделий различного назначения из сталей часто включает в себя термообработку, предназначенную для изменения и получения требуемых свойств. Но и без специально назначаемой термообработки стальные заготовки могут подвергаться другим технологическим операциям, связанным с нагревом и охлаждением. Кроме того, в процессе эксплуатации детали из стали могут испытывать циклический нагрев и охлаждение. В зависимости от температуры и длительности нагрева возможно значительное изменение свойства стали, и, следовательно, качества изготовленных из них изделий. Проанализировав теоретический опыт изучения влияния нагрева и исследовав на практике динамику структурных изменений в стали при нагреве, можно определить методы борьбы с нежелательными последствиями, вызванными воздействием температуры.

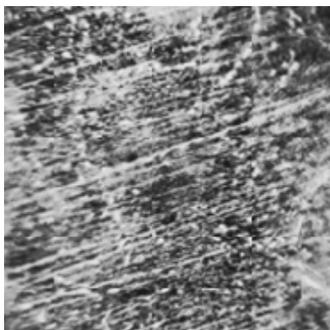
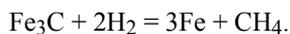
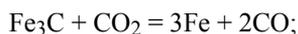
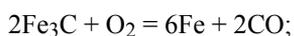
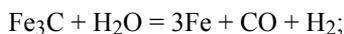


Рис. 1. Микроструктура углеродистой стали с содержанием углерода примерно 1,2 % после закалки и низкого отпуска (×650)

Эксперимент проводился с углеродистой сталью, в которой примерно 1,2 % углерода. Сталь подверглась полной закалке с последующим низким отпуском и приобрела неравновесную мартенситную структуру (рис. 1). Закаленная неравновесная структура наблюдается как с помощью оптической микроскопии, так и с помощью сканирующей зондовой [1]. На микрофотографии в виде светлых изогнутых линий слабо видны остатки цементитной сетки (см. рис. 1). Твердость данной структуры составила 65 HRC, что соответствует твердости закаленной стали после низкого отпуска с таким содержанием углерода. После отжига твердость образцов будет измеряться методом Бринеля, которым невозможно измерить закаленную структуру. Данный метод подходит для измерения твердости отожженных

сталей. Одним из видов высокотемпературной обработки сталей является полный перекристаллизационный отжиг, который заключается в нагреве выше температуры фазовых превращений, выдержке и медленном охлаждении вместе с печью. Такой нагрев может привести к обезуглероживанию поверхностного слоя стали.

Углерод в структуре находится в виде растворенных атомов в кристаллической решетке и в химическом соединении Fe_3C – карбиде железа. Удаление атомов углерода из твердого раствора – процесс более энергозатратный, поэтому в первую очередь выгорает углерод карбида Fe_3C после предварительной диссоциации. Простое испарение углерода в большом количестве с поверхности стали возможно только в вакууме. Удаление углерода из структуры стали происходит в результате химических реакций, в которые вступает углерод, находящийся в стали. В атмосфере печи активными участниками химических реакций, высвобождающих углерод, являются пары воды, кислород, углекислый газ и водород:



Скорость, с которой углерод покидает структуру приповерхностного слоя стали, определяется скоростями протекания химических реакций и диффузии внутри кристаллической решетки сплава. Последняя в свою очередь зависит от строения решетки, наличия и типа точечных и линейных дефектов, а также температуры. Если в структуре стали среди точечных дефектов будут преобладать вакансии над атомами внедрения, то скорость диффузии будет выше, чем в противном случае. Таким образом, в сплавах одного и того же состава скорость диффузии атомов может быть различной и, следовательно, углерод будет выгорать с разной скоростью.

Для выявления динамики обезуглероживания стали при циклическом воздействии температуры образец сплава подвергался шестикратному отжигу. Каждый отжиг проводился по следующей схеме: полторачасовой нагрев до температуры 770 °С, выдержка 2 часа при достигнутой температуре и медленное

охлаждение вместе с печью. После каждого отжига измерялась твердость и проводился микроанализ структуры образца.

После первого отжига твердость, измеренная методом Бринеля, составила $HV = 196 \text{ кг/мм}^2$. Данная величина соответствует твердости отожженной высокоуглеродистой стали в равновесном состоянии. При температуре $770 \text{ }^\circ\text{C}$ произошел полный перекристаллизационный отжиг.

Микроструктура данного образца сфотографирована с помощью оптического микроскопа при увеличении $\times 650$ (рис. 2). После первого полного перекристаллизационного отжига структура, как и полагается, стала более пластичной с меньшей твердостью, структурными составляющими перлит и цементит.

На микрофотографии видны светлые округлые включения – «зернистый цементит». По окончании второго отжига твердость уменьшилась до значения 179 кг/мм^2 , после третьего – до 163 кг/мм^2 . После четвертого, пятого и шестого отжигов твердость уже не уменьшалась. Зависимость твердости структуры от времени отжига представлена на рис. 3. На графике не учтено только время охлаждения, что вносит некоторую погрешность в результат.

Уменьшение твердости по окончании первого отжига связано с возвратом структуры в равновесное состояние. Структура сплава поменялась с мартенситной на перлитно-цементитную. При последующих операциях отжига принципиальных изменений в структуре не происходит (фазовый состав не меняется). При циклических воздействиях температуры измельчается зерно, что не приводит к уменьшению твердости. Тем не менее, твердость уменьшается. В структурах с наименьшим содержанием углерода твердость будет меньше, то есть уменьшение твердости сплава при последующих отжигах связано с понижением содержания углерода. Можно сделать вывод, что происходит обезуглероживание в результате длительного воздействия на сплав высокой температуры. Факт, что после четвертого и последующих отжигов твердость не уменьшалась, подтверждает прекращение обезуглероживания в связи с малым содержанием оставшегося углерода. После второго отжига микроструктура (рис. 4, а) соответствует доэвтектоидному сплаву с содержанием углерода меньше $0,8 \%$.

Как показывает практика экспериментов, для увеличения, показанного на рис. 4, а, зерно структуры очень мелкое, что соответствует теории, согласно которой после каждой термической обработки происходит измельчение зерна

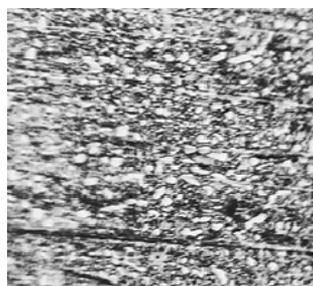


Рис. 2. Микроструктура исследуемого образца стали после первого перекристаллизационного отжига при температуре $770 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\times 650$)

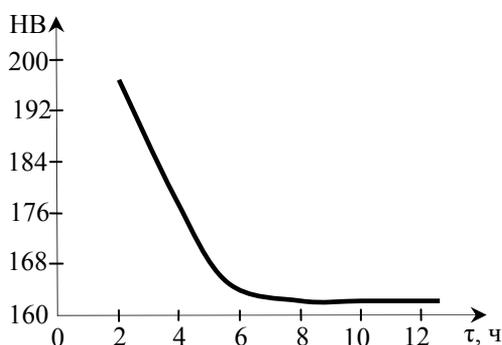
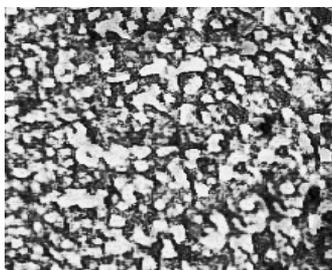
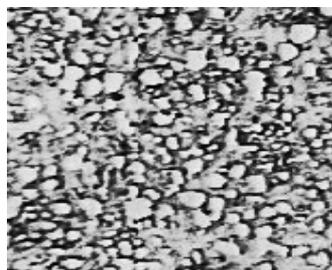


Рис. 3. Зависимость твердости стального образца от времени отжига



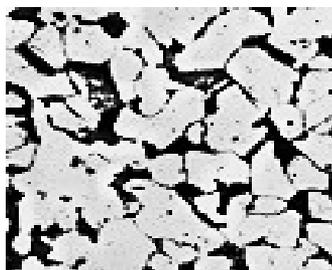
a)



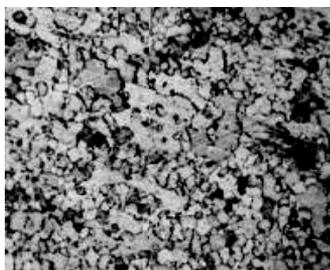
б)

Рис. 4. Микроструктура исследуемого образца стали при температуре 770 °С после отжига ($\times 650$):

a – второго; *б* – шестого



a)



б)

Рис. 5. Микроструктура стали марки 20 ($\times 200$):

a – в отожженном состоянии; *б* – после ТЦО

(зерно растет при увеличении температуры термообработки). При последующих четырех отжигах твердость не менялась. Микроструктура сплава после последнего шестого отжига, представленная на рис. 4, *б*, имеет наименьшее значение твердости 163 кг/мм^2 , которое не менялась после третьего отжига. Если сравнить снимки (см. рис. 4), то хорошо видно, что на рис. 4, *б* гораздо меньше темных перлитных зерен, то есть в данной микроструктуре (структуре поверхностного слоя сплава, а не всего объема) углерода значительно меньше. Таким образом, подтверждается теория обезуглероживания поверхностного слоя сплава.

Твердость 163 кг/мм^2 соответствует, согласно справочным данным, твердости стали марки 20 (0,20 % углерода). Можно сделать вывод, что в результате такой длительной термообработки в поверхностном слое содержание углерода уменьшилось с 1,2 до 0,2 %. Для сравнения микроструктура стали марки 20 в отожженном состоянии приведена на рис. 5, *a*.



Рис. 6. Поперечный срез микроструктуры с поверхностным обезуглероживанным слоем

Данная структура практически такая же, как и на рис. 4, *б*, только с более крупными зернами. Зерна имеют больший размер потому, что эта структура не проходила циклическую термообработку. Соответствие последних приведенных двух микроструктур и их твердости подтверждает правильность результатов эксперимента. Микроструктура стали марки 20 после термоциклической обработки (ТЦО) по экспериментальным данным приведена на рис. 5, *б*, [2].

Сравнивая два снимка (см. рис. 5), можно сказать, что после циклического нагрева и охлаж-

дения микроструктура стали значительно измельчается. Микроструктура, представленная на рис. 5, б, абсолютно идентична полученной нами (см. рис. 4, б). Следовательно, верно заключение о влиянии длительного отжига на размер зерна и обезуглероживание стали.

Обезуглероженный поверхностный слой виден на поперечном срезе микроструктуры (рис. 6) [3].

Величина обезуглероженного слоя зависит от времени воздействия температуры, но для его роста нужна диффузия углерода к поверхности. Следовательно, величина обезуглероженного слоя зависит от коэффициента диффузии, который в свою очередь зависит от температуры.

В случае заэвтектоидной стали, в которой углерода гораздо больше, чем в исследуемой марке 20, с понижением температуры часть углерода выделяется из раствора в виде карбида железа. Это химическое соединение устойчивое и при охлаждении ниже температуры фазовых превращений не распадается. Поэтому значительная часть углерода остается в сплаве. Выгоранию подвержен углерод, находящийся в твердом растворе в стали. Следовательно, интересным может быть исследование влияния многократного отжига на структуру заэвтектоидных сталей. Предположительно на поверхности образца после такой обработки структура будет состоять из двух фаз: ненасыщенного твердого раствора углерода в железе с объемно-центрированной кубической решеткой и химического соединения карбида железа. Основная часть карбида будет находиться на границах зерен. Внутри зерна останутся не пластины химического соединения, а его остатки в виде островков. В таком случае может получиться структура с зернами низкой прочности и твердости, которые заключены в твердую оболочку карбида железа.

По методике, представленной в работе [4], измерялась пористость обезуглероженной структуры до термической обработки. Обезуглероживание структуры не привело к образованию пор.

По результатам рентгеноструктурного анализа [2] после циклического нагрева происходят микроискажения решетки примерно на 2 %. Параметр решетки может изменяться на величину до 0,0003 Å. Следовательно, циклический нагрев приводит не только к обезуглероживанию и измельчению зерна, но и его микропластической деформации.

Из вышесказанного следует, что длительная выдержка стали выше температуры фазовых превращений приводит к обезуглероживанию структуры в значительной степени. Методами борьбы с таким явлением является защита от кислорода, паров воды, азота и водорода. Циклический нагрев неизбежно приводит к измельчению зерна, что в некоторых случаях может быть положительным фактом. Кроме того, происходит и микропластическая деформация структуры сплава.

Список литературы

1. 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 – 708.
2. Ткаченко, Г. А. Структурообразование конструкционных сталей при циклической термической и химико-термической обработке и упрочнение деталей почвообрабатывающих машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Г. А. Ткаченко. – Минск : [б. и.], 2011. – 23 с.
3. Атлас дефектов стали / под ред. М. Л. Бернштейна ; пер. с нем. Е. Я. Капуткина. – М. : Металлургия, 1979. – 188 с.
4. Филатов, И. С. Получение пористых связей системы «медь – железо – олово» и исследование влияния химического состава на пористость / И. С. Филатов, А. И. Буренина, А. С. Черкасова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 707 – 711.

The Effect of Multiple Annealing on the Structure and Properties of High Carbon Steel

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

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

Keywords: microstructure; phase composition; heat treatment; metal alloy; recrystallization; annealing.

Abstract: The paper describes the effect of steel holding time at high temperature on its structure, which affects its mechanical and operational properties. The effect of temperature, namely, the cyclicity of heating and cooling, is considered from different perspectives. Multiple heating and cooling, leading to phase transformations in the structure of the pre-eutectoid steel, have been investigated. The process of decarburization of the structure is considered and described. The photographs of the investigated microstructures show that the alloy is not only decarburized, but also the grain sizes change. A theoretical analysis of the effect of cyclic annealing is made, and its practical verification is described.

References

1. 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.701-708. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Tkachenko G.A. *Extended abstract of candidate's of technical thesis*, Minsk, 2011, 23 p. (In Russ.)
3. Bernshteyn M.L. [Ed], *Atlas defektov stali* [Atlas of steel defects], Moscow: Metallurgiya, 1979, 188 p. (In Russ.)
4. Filatov I.S., Burenina A.I., Cherkasova A.S. [Preparation of porous bonds of the "copper-iron-tin" system and investigation of the effect of chemical composition on porosity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 707-711. (In Russ., abstract in Eng.)

Die Wirkung von mehrfachem Glühen auf die Struktur und Eigenschaften des kohlenstoffreichen Stahls

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Auswirkungen der Härtingszeit des Stahls bei hoher Temperatur auf ihre Struktur gegeben, von der die mechanischen und betrieblichen Eigenschaften abhängen. Es ist nicht nur der Einfluss der Temperatur, nämlich die Zyklizität von Heizung und Kühlung, betrachtet. Mehrfache Erwärmung und Kühlung sind untersucht, was zu Phasentransformationen in der Struktur des untereutektoiden Stahls führt. Es ist der Prozess der Entkohlung der Struktur untersucht und beschrieben. Es sind die Bilder der erforschten Mikrostrukturen angeführt, auf denen man sieht, dass nicht nur die Legierung entkohlt ist, sondern auch die Größe der Körner sich geändert hat. Eine theoretische Analyse des Einflusses des zyklischen Glühens wurde durchgeführt und eine Beschreibung seiner praktischen Bestätigung ist gegeben.

Influence de recuit multiple sur la structure et les propriétés de l'acier de haute contenu de carbone

Résumé: Est donnée la description de l'influence de la force de l'acier lors de la haute température sur sa structure dont dépendent les propriétés mécaniques et celles d'exploitation. Est examinée non seulement l'influence de la température mais la possibilité du cycle du chauffage et du refroidissement. Sont étudiés de nombreux chauffages et du refroidissements. Est examiné et décrit le processus lié au contenu de carbone. Sont donnés les photos des microstructures étudiés. Est effectuée une analyse théorique de l'influence de recuit ainsi que sa description pratique.

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

Рецензент: *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
