

ОТПУСК МАРТЕНСИТА В ХОДЕ БЫСТРОГО НАГРЕВА¹

Д.А. Мирзаев², А.А. Мирзоев³, П.В. Чирков⁴

В современной термической обработке получили широкое применение методы скоростного нагрева: пропускание электрического тока через деталь, обработка лазерным, электронным пучком или токами высокой частоты и др. Часто такой нагрев производят с целью новой аустенизации закаленной стали, преследуя цель – измельчить зерно аустенита перед окончательной закалкой. Однако в условиях медленного или, напротив, быстрого нагрева происходит специфическое явление структурной наследственности, заключающееся в том, что исходное зерно γ -фазы восстанавливается по величине и по форме [1]. Это явление, детально исследованное акад. В.Д. Садовским и его школой, возникает, по-видимому, в том случае, если исходный мартенсит или бейнит был нагрет выше A_{c1} , не подвергаясь значительному отпуску в ходе нагрева. Очевидно, что степень отпуска зависит [2] от скорости нагрева V_H . В данной работе проведено аналитическое исследование влияния V_H на степень отпуска с использованием разных моделей двухфазного распада мартенсита.

Ключевые слова: мартенсит; отпуск стали; двухфазный распад.

Модель Курдюмова–Лысака

Рассматривается стадия двухфазного распада мартенсита при отпуске. Обозначим через P долю распавшегося мартенсита $P = V^*/V_0$, где V_0 – исходный, а V^* – превращенный объем. Для изотермических условий распада Курдюмов и Лысак [3, 4] установили закон распада:

$$dP = v \cdot n \cdot (1 - P) d\tau, \quad (1)$$

где n – число карбидных зародышей в единице объема, v – средний объем одной превращенной области, τ – длительность распада при температуре T . Множитель $v \cdot n$ подчиняется соотношению Аррениусова типа:

$$v \cdot n = A_0 e^{-E/RT}. \quad (2)$$

Если распад идет в условиях непрерывного нагрева со скоростью V_H , то $d\tau = dT/V_H$, причем скорость нагрева V_H будем считать постоянной. Тогда из (1), (2) имеем:

$$dP/(1 - P) = A_0 e^{-E/RT} dT/V_H. \quad (3)$$

Пусть при нагреве от 0 К до требуемой температуры T_1 доля распада составляет P_1 . Тогда выполняется соотношение:

$$\int_0^{P_1} \frac{dP}{(1 - P)} = (A_0/V_H) \int_0^{T_1} A_0 e^{-E/RT} dT. \quad (4)$$

Интеграл в левой части (4) – табличный, соответственно получаем:

$$-\ln(1 - P_1) = (A_0/V_H) \int_0^{T_1} A_0 e^{-E/RT} dT. \quad (5)$$

В правом интеграле вводим новую переменную:

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-03-00138.

² Мирзаев Джалал Аминович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физического металловедения и физики твердого тела, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.
E-mail: mirzaev@physmet.susu.ac.ru

³ Мирзоев Александр Аминович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общей и теоретической физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.
E-mail: mirzoev@physics.susu.ac.ru

⁴ Чирков Павел Владимирович – аспирант, кафедра общей и теоретической физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

E-mail: p.chirkov@physics.susu.ac.ru

$$x = -\frac{E}{RT}; \quad dT = \frac{E}{R \cdot x^2} dx,$$

и приводим его к виду:

$$-\ln(1 - P_1) = \frac{A_0}{V_H} \frac{E}{R} \int_{-\infty}^{-E/RT_1} \frac{1}{x^2} e^x dx. \quad (6)$$

Согласно таблицам интегралов [5]:

$$\int \frac{1}{x^2} e^x dx = -\frac{e^x}{x} + \text{Ei}(x), \quad (7)$$

где $\text{Ei}(x)$ – интегральная показательная функция. По данным [3, 4] величина E порядка 130 кДж/моль, поэтому ниже A_{c1} отношение $E/RT_1 > 10$. При таких значениях аргумента можно использовать асимптотический ряд [6]:

$$\text{Ei}(-a) = -\frac{e^{-a}}{a} \left(1 - \frac{1}{a} + \frac{2!}{a^2} - \frac{3!}{a^3} \dots \right).$$

Тогда с хорошей точностью имеем:

$$\int_{-\infty}^{-E/RT_1} \frac{1}{x^2} e^x dx = \frac{e^{-E/RT_1}}{(E/RT_1)^2} \left(1 - \frac{1}{(E/RT_1)} + \frac{2!}{(E/RT_1)^2} - \frac{3!}{(E/RT_1)^3} \dots \right).$$

Ограничиваясь первыми двумя членами ряда, найдем:

$$-\ln(1 - P_1) \approx \frac{A_0}{V_H} \frac{RT_1^2}{E} e^{-E/RT_1}.$$

Теперь легко определить искомую скорость, нагрев с которой создаст долю распада не превосходящую некоторого критического значения $P_{кр}$:

$$V_H = -\frac{A_0}{\ln(1 - P_{кр})} \frac{RT_1^2}{E} e^{-E/RT_1}. \quad (8)$$

При малых критических долях $\ln(1 - P_{кр}) \approx -P_{кр}$, тогда соотношение (8) упрощается:

$$V_H = -\frac{A_0}{P_{кр}} \frac{RT_1^2}{E} e^{-E/RT_1}. \quad (9)$$

На рисунке приведен график зависимости $V_H = f(T_1)$ для $P_{кр} = 0,01$, рассчитанный по формуле (9). Если это условие «ослабить», например, принять степень распада равной 0,1 или 0,2, то скорости нагрева, определенные по графику, нужно уменьшить в 10 и 20 раз соответственно. При расчете приняты следующие значения величин (согласно [2]): $A_0 = 0,7 \cdot 10^{19} \text{ мин}^{-1}$, $E = 33 \text{ ккал/моль}$, $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$.

Модель Еднерала–Скакова

Указанные авторы [5] нашли, что кинетический закон отпуска мартенсита ближе к уравнению Аврами, чем Лысака–Курдюмова, т.е. приняли

$$P = P^\infty \left(1 - e^{-(\tau/\tau_0)^m} \right), \quad (10)$$

где P^∞ – максимальная доля распада, τ – время, τ_0 – кинетический параметр, определяемый соотношением:

$$\frac{1}{\tau_0} = B \cdot e^{-Q/RT}, \quad (11)$$

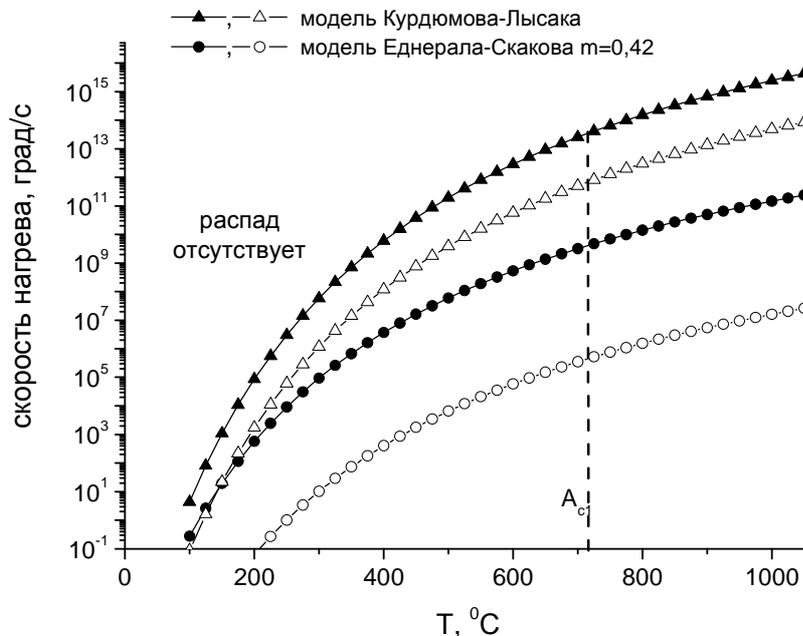
а m – параметр, который, вероятно, зависит от структурного состояния, наличия сильных карбидообразующих элементов и др.

В изотермических условиях:

$$dP = P^\infty \frac{\tau^{m-1}}{\tau_0^m} \cdot m \cdot e^{-(\tau/\tau_0)^m} d\tau. \quad (12)$$

Если положить, как и ранее, что в условиях нагрева $d\tau = dT/V_H$, то несложно получить дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP}{P^\infty (1 - P/P^\infty)} = \frac{m \cdot B^m}{V_H^m} e^{-Q \cdot m/RT} T^{m-1} dT. \quad (13)$$



Зависимость скорости нагрева V_H от температуры согласно теории Курдюмова–Лысака и Еднерала–Скакова, закрашенные символы соответствуют критической степени распада $P_{кр} = 0,01$, а пустые $P_{кр} = 0,1$

Интегрируя, найдем:

$$-\ln(1 - P/P^\infty) = \frac{m \cdot B^m}{V_H^m} \int_0^{T_1} e^{-Qm/RT} T^{m-1} dT. \quad (13a)$$

Введем новую переменную

$$x = -\frac{mQ}{RT}; \quad dT = \frac{mQ}{R \cdot x^2} dx.$$

Преобразуем интеграл (13a) к виду:

$$-\ln(1 - P/P^\infty) = (-1)^{m-1} \frac{mB^m}{V_H^m} \left(\frac{mQ}{R}\right)^m \cdot \int_{-\infty}^{-mQ/RT_1} e^x \frac{1}{x^{m+1}} dx. \quad (14)$$

Для расчета интеграла в (14) используем формулу

$$\int \frac{e^x}{x^k} dx = k \int \frac{e^x}{x^{k+1}} dx + \frac{e^x}{x^k},$$

которую будем последовательно использовать для возникающих интегралов:

$$\int \frac{e^x}{x^{m+1}} dx = \frac{e^x}{x^{m+1}} + (m+1) \frac{e^x}{x^{m+2}} + (m+1)(m+2) \frac{e^x}{x^{m+3}} + \\ + (m+1)(m+2)(m+3) \frac{e^x}{x^{m+4}} + (m+1)(m+2)(m+3)(m+4) \int \frac{e^x}{x^{m+4}} dx.$$

Поскольку верхний предел в (14) $mQ/RT_1 \gg 1$, то полученный ряд дает асимптотическое разложение. Ограничиваясь тремя первыми членами указанного разложения

$$\int_{-\infty}^{-mQ/RT_1} \frac{e^x}{x^{m+1}} dx = (-1)^{m+1} \frac{e^{-mQ/RT_1} - mQ/RT_1}{(mQ/RT_1)^{m+1}} \left[1 - \frac{(m+1)}{mQ/RT_1} + \frac{(m+1)(m+2)}{(mQ/RT_1)^2} - \dots \right],$$

и, обозначая функцию, заданную в виде ряда в квадратных скобках, как $F(mQ/RT_1)$, получим:

$$-\ln(1 - P_1/P^\infty) = \frac{B^m}{V_H^m} \left(\frac{mQ}{R} \right)^2 \cdot T_1 \cdot \frac{e^{-mQ/RT}}{mQ/RT_1} \cdot F(mQ/RT_1).$$

Используя для расчета значения, взятые из данных работы [5], $m = 0,42$, $B = 1,47 \cdot 10^{10}$ сек, $Q = 24$ ккал/моль, видим, что отношение $mQ/RT_1 = 5071/T_1 > 4$, поэтому можно приближенно принять $F(mQ/RT_1) = 1$. Учитывая, что при малых P_1 можно полагать $-\ln(1 - P_1/P^\infty) \approx P_1/P^\infty$, а также учитывая, что по Лысаку $P^\infty \approx 0,7$, окончательно получаем выражение для скорости нагрева:

$$V_H = \frac{B}{\left((P_1/P^\infty) \cdot (Q/RT_1) \right)^{1/m}} \cdot T_1 \cdot e^{-Q/RT_1} \cong \frac{0,63 \cdot 10^{10}}{\left(P_1(24000/RT_1) \right)^{2,33}} e^{-24000/T_1} T_1.$$

Результаты расчета V_H по модели Еднерала–Скакова также приведены на рисунке. Конечно, между двумя кривыми на рисунке очень большие расхождения. Однако нам представляется, что данные Еднерала–Скакова более надежны, поскольку они получены с использованием метода электросопротивления, что значительно точнее, нежели анализ полуширины мартенситного дублета.

Данные рисунка отчетливо свидетельствуют о следующем: 1) для того, чтобы подавить двухфазный отпуск мартенсита углеродистых сталей при быстром нагреве до и выше критической температуры A_1 (начало образования гамма-фазы) необходимы скорости нагрева от 10^{12} К/с ($m = 0,42$) по теории Еднерала–Скакова до $5 \cdot 10^{13}$ К/с по теории Лысака–Курдюмова. Такие скорости нагрева вряд ли можно реализовать на современном этапе развития техники; 2) при уменьшении скорости нагрева, по отношению к указанным значениям, степень отпуска возрастает. Тем не менее для того, чтобы произошел полураспад мартенсита нужны скорости выше $6 \cdot 10^9$ и $6 \cdot 10^5$ К/с соответственно каждой из рассмотренных моделей. В отношении легированных сталей необходимы дополнительные исследования, так как легирующие элементы могут уменьшить, либо увеличить коэффициент диффузии углерода в мартенсите, который и определяет кинетику распада мартенсита.

Литература

1. Счастливцев, В.М. Развитие идей академика В.М. Садовского / В.М. Счастливцев, В.И. Зельдович, Д.А. Мирзаев. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2008. – 409 с.
2. Бернштейн, М.Л. Отпуск стали / М.Л. Бернштейн, Л.М. Капуткина, С.Д. Прокошкин. – Москва: МИСиС, 1997. – 336 с.
3. Курдюмов, Г.В. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. – Москва: Наука, 1977. – С. 128–135.
4. Лысак, Л.И. Физические основы термической обработки стали / Л.И. Лысак, Б.И. Николин. – Киев: Техніка, 1975. – С. 174, 187–189.
5. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – Москва: Физматгиз, 1963. – С. 107.
6. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1970. – С. 625–632.
7. Еднерал, Н.В. Исследование низкотемпературного распада мартенсита в сталях / Н.В. Еднерал, Ю.А. Скаков // ФММ. – 1968. – Т. 26, № 5. – С. 850–856.

Поступила в редакцию 6 декабря 2015 г.

MARTENSITE TEMPERING DURING FAST HEATING

D.A. Mirzaev¹, A.A. Mirzoev², P.V. Chirkov³

Modern thermal treatment techniques of fast heating such as passing an electric current through the element, processing by laser beam, electron beam or by high frequency current have been widely used. Frequently such heating is used for the austenitization of hard steel to decrease the austenite grain size before final quenching. However, under slow or fast heating specific low temperature phenomenon of structural heredity occurs when the initial grain of γ -phase restores in size and form [1]. The detailed description of this phenomenon was made by V.D. Sadovskii. Apparently, this phenomenon occurs if bainite is heated above A_{c1} temperature without considerable tempering. It is obvious that tempering degree depends on the heating rate V_H . The paper describes the analytical study of V_H influence on tempering degree with the usage of different models of two-phase martensite decomposition.

Keywords: martensite; tempering; two-phase decomposition.

References

1. Schastlivtsev V.M., Zel'dovich V.I., Mirzaev D.A. *Razvitie idey akademika V.M. Sadovskogo* [Development of V.M. Sadovskii's ideas]. Ekaterinburg, IMP UrO RAN Publ., 2008, 409 p. (in Russ.).
2. Bernshteyn M.L., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D. *Otpusk stali* (Tempering). Moscow, MISiS Publ., 1997, 336 p. (in Russ.).
3. Kurdyumov G.V., Utevskiy L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* (Iron and steel transformations). Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 128–135. (in Russ.).
4. Lysak L.I., Nikolin B.I. *Fizicheskie osnovy termicheskoy obrabotki stali* (Principal physics of steel heat treatment). Kiev, Tekhnika Publ., 1975, p. 174, pp.187–189. (in Russ.).
5. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* (Tables of integrals, sums, series and products). Moscow, Fizmatgiz, 1963, pp. 107. (in Russ.).
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Handbook of mathematics (for scientists and engineers)]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 625–623. (in Russ.).
7. Edneral N.V., Skakov Yu.A. *Issledovanie nizkotemperaturnogo raspada martsenita v stalyakh* (Investigation of lowtemperature martensite dissociation in steels). *The Physics of Metals and Metallography*, 1968, Vol. 26, no. 5, pp. 850–856. (in Russ.).

Received December 6, 2015

¹ Mirzaev Dzhahal Aminulovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Physical Metallurgy and Solid State Physics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: mirzayev@physmet.susu.ac.ru

² Mirzoev Aleksander Aminulaevich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, General and Theoretical Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: mirzoev@physics.susu.ac.ru

³ Chirkov Pavel Vladimirovich is Post-graduate Student, General and Theoretical Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: p.chirkov@physics.susu.ac.ru