

Received: 18.12.2023

Revised: 01.02.2024



Accepted: 16.02.2024


DOI: 10.17804/2410-9908.2024.1.006-010



EFFECT OF TEMPERING CONDITIONS ON THE STRUCTURE AND STRENGTH PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS



K. V. Makhneva^{a)}, I. B. Kinzin^{b)}, M. A. Shabanov^{c)}, O. V. Selivanova^{d),*},
and V. A. Khotinov^{e)}



Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia

^{a)}  <https://orcid.org/0009-0004-5000-1164>  kristina.mahneva.2000@mail.ru;

^{b)}  kinzin.2000@mail.ru

^{c)}  <https://orcid.org/0000-0009-6725-1724>  m.a.shabanov@urfu.ru

^{d)}  <https://orcid.org/0009-0002-4874-4482>  sov23@mail.ru

^{e)}  <https://orcid.org/0000-0003-0645-548X>  khotinov@yandex.ru

*Corresponding author. E-mail: sov23@mail.ru

Address for correspondence: ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia

Tel.: +7 (912) 246-6755

The structure and mechanical properties of low- and medium-carbon steels quenched and tempered with different isothermal holding times at temperatures ranging from 250 to 650 °C are studied. It is shown that, for the steels under study, three stages can be distinguished on the curves of hardness as a function of isothermal holding at different temperatures. Hardness testing is used to determine tempering conditions leading to a comparable level of hardness. To calculate the tempering parameter, the constant *C* in the Hollomon–Jaffe equation is determined for the steels in question.

Keywords: steel, quenching, martensite, tempering parameter, hardness, dislocation density, carbides

Acknowledgment

The work financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the Ural Federal University Development Program within the framework of the Priority 2030 program). The equipment of the UrFU's shared research facilities was used in the testing.

References

1. Skorokhodov, V.N., Odessky, P.D., and Rudchenko, A.V. *Konstruksionnaya stal* [Structural Steel]. Metallurgizdat Publ., Moscow, 2002, 622 p. (In Russian).
2. *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1976. (In German).
3. Zhang, Y., Yang, J., Xiao, D., Luo, D., Tuo, C., and Wu, H. Effect of quenching and tempering on mechanical properties and impact fracture behavior of low-carbon low-alloy steel. *Metals*, 2022, 12 (7), 1087. DOI: 10.3390/met12071087.
4. Ju, Y., Goodall, A., Strangwood, M., and Davis, C. Characterization of precipitation and carbide coarsening in low carbon low alloy Q&T steels during the early stages of tempering. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 738, 174–189. DOI: 10.1016/j.msea.2018.09.044.

Подана в журнал: 18.12.2023



УДК 620.172


DOI: 10.17804/2410-9908.2024.1.006-010



ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОТПУСКА НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ



К. В. Махнева^{а)}, И. Б. Кинзин^{б)}, М. А. Шабанов^{в)},
О. В. Селиванова^{г)},*, В. А. Хотин^{д)}



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, 19 г. Екатеринбург, 620002, Россия

^{а)}  <https://orcid.org/0009-0004-5000-1164>  kristina.mahneva.2000@mail.ru;

^{б)}  kinzin.2000@mail.ru

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0009-6725-1724>  m.a.shabanov@urfu.ru

^{г)}  <https://orcid.org/0009-0002-4874-4482>  sov23@mail.ru

^{д)}  <https://orcid.org/0000-0003-0645-548X>  khotinov@yandex.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: sov23@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Мира, 28, г. Екатеринбург, 620002, Россия

Тел.: +7 (912) 246-67-55

Исследованы структура и механические свойства сталей 09Г2С и 38Г2Ф после закалки и отпуска с различным временем изотермической выдержки в температурном интервале 250–650 °С. Показано, что для изученных в работе сталей на кривых изменения твердости в зависимости от изотермической выдержки при разных температурах можно выделить три стадии. С помощью дюрOMETрического метода определены режимы отпуска, приводящие к сопоставимому уровню твердости. Для исследуемых сталей определена константа C в уравнении Холломона – Яффе для расчета параметра отпуска.

Ключевые слова: среднеуглеродистые стали, мартенсит, разупрочнение при отпуске, прочностные свойства, компоненты упрочнения, плотность дислокаций, карбиды, субструктура

1. Введение

Прочность, пластичность и ударная вязкость являются наиболее важными показателями стали. Повышенный комплекс прочностных свойств низколегированных сталей может быть достигнут за счет дисперсионного и зернограничного упрочнения [1]. Для достижения оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости конструкционные стали подвергаются закалке с последующим отпуском по различным температурно-временным режимам ($t_{отп}$, $\tau_{отп}$).

При выборе параметров отпуска применяется подход, при котором взаимосвязь температуры отпуска и его продолжительности выражена через параметр отпуска P в уравнении Холломона – Яффе [2]:

$$P = T \cdot (C + \lg \tau) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где T – температура отпуска в Кельвинах; τ – время отпуска в часах; C – константа, зависящая от химического состава стали и режима ее термообработки.

Константа C для группы подобных марок сталей имеет определенное значение. Например, для конструкционных сталей $C = 20$. Величина P связана прямой зависимостью с

твердостью или прочностью стали. Кроме того, температура отпуска оказывает большее влияние на разупрочнение, чем время выдержки, поэтому последнее входит в эмпирическое уравнение в виде логарифма. Если выбранная температура отпуска занижена, для достижения требуемого уровня, например, прочности, необходимо значительно увеличить время выдержки. Таким образом, назначение как температуры, так и продолжительности отпуска является важным фактором для достижения оптимального соотношения прочностных и пластических свойств.

В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение взаимосвязи особенностей структурных превращений и изменения механических свойств, происходящих при отпуске конструкционных сталей.

2. Материал и методика

Материалом исследования были конструкционные стали 09Г2С (масс. %: 0,09 С; 1,28 Mn; 0,35 Si; 0,17 Cu) и 38Г2Ф (масс. %: 0,42 С; 1,3 Mn; 0,09 V) промышленной выплавки. Образцы сталей подвергали закалке от 900 °С в воде и отпуску в температурном интервале 250–650 °С с различным временем выдержки в диапазоне 2–150 минут с последующим охлаждением на воздухе.

3. Результаты и обсуждение

На зависимостях изменения твердости исследуемых в работе сталей от продолжительности изотермической выдержки в температурном интервале 250–650 °С можно выделить три стадии отпуска (рис. 1):

– I стадия ($t_{\text{отп}} \leq 200\text{--}250$ °С), соответствующая низкотемпературному отпуску. В температурном интервале этой стадии происходит зарождение частиц цементита на дислокациях, величина плотности дислокаций сопоставима с таковой в закаленном состоянии.

– II стадия ($250 \leq t_{\text{отп}} \leq 400$ °С), соответствующая среднетемпературному отпуску. В структуре сохраняется исходная речечная структура, сформировавшаяся в ходе мартенситного превращения, частицы Fe₃C выделяются как внутри рек, так и по их границам (рис 2 а).

– III стадия ($t_{\text{отп}} \leq 450\text{--}550$ °С), соответствующая высокотемпературному отпуску. На этой стадии происходит формирование субзерен α -фазы и сфероидизированных частиц Fe₃C (рис. 2 б).

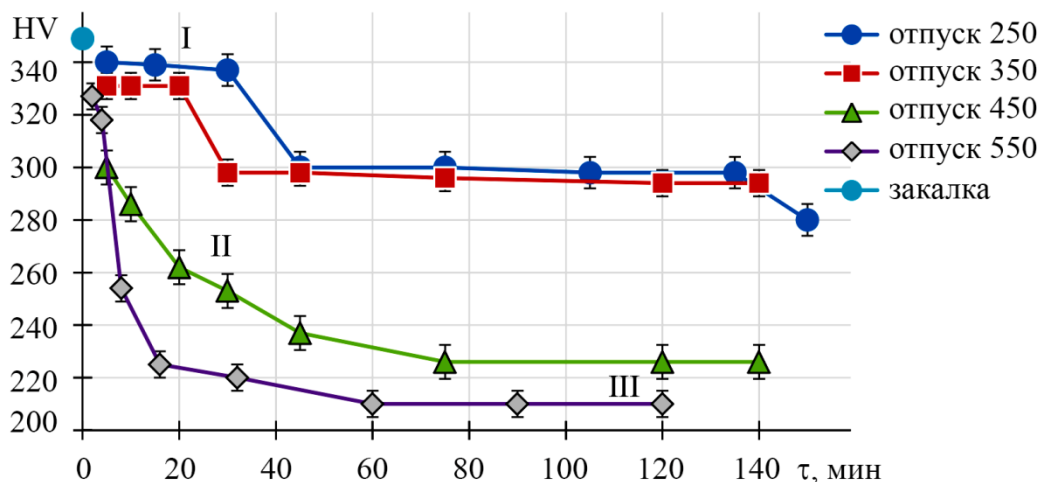


Рис. 1. Зависимость уровня твердости стали 09Г2С от времени выдержки при различных температурах отпуска

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, полученным при изучении стали 38Г2Ф, установлено, что после отпуска при 650 °С в течение 4 минут наблюдается речная структура, унаследованная от мартенсита (рис. 2 а).

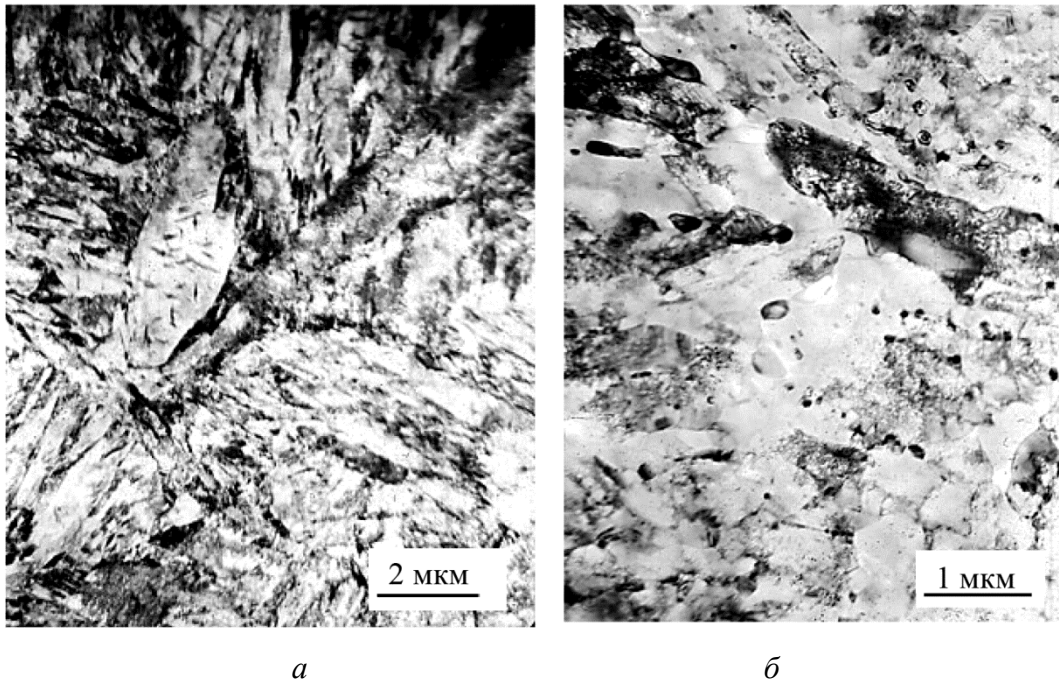


Рис. 2. Микроструктура стали 38Г2Ф после закалки и отпуска при 650 °С с различным временем изотермической выдержки: $\tau_{\text{отп}} = 4$ мин (а); $\tau_{\text{отп}} = 64$ мин (б)

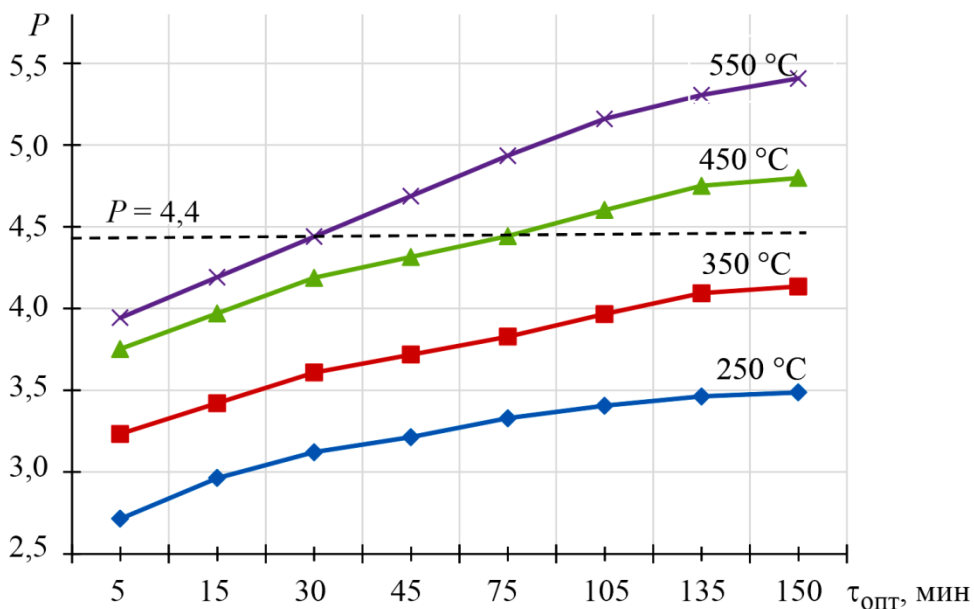


Рис. 3. Зависимость параметра отпуска в стали 09Г2С от температуры и времени выдержки

Увеличение выдержки до $\tau_{\text{отп}} = 64$ мин вызывает коагуляцию цементита: постепенное растворение внутриречных частиц и рост вдоль их границ почти сплошных лентообразных выделений, которые закрепляют границы, препятствуя стоку в них дислокаций (рис. 2 б). В отдельных участках начинается сфероидизация частиц Fe_3C [3, 4].

С помощью дюрометрического метода были определены режимы отпуска на II стадии, приводящие к сопоставимому уровню твердости, что позволило рассчитать константу C для исследуемых сталей, в результате чего уравнение Холломоны – Яффе приняло вид $P = t_{\text{отп}} \cdot (6 + \lg t_{\text{отп}}) \cdot 10^{-3}$. Расчетные значения P позволяют выявить режимы, проведение которых даст сопоставимые величины параметра отпуска, а следовательно, и близкий уровень механических свойств (рис. 3).

4. Заключение

Результаты измерения твердости свидетельствуют о том, что разупрочнение закаленных образцов сталей 09Г2С и 38Г2Ф при отпуске в температурном интервале 250–650 °С происходит в три стадии. При этом I стадия отпуска, связанная со снятием внутренних напряжений в мартенсите, наблюдается только при $t_{\text{отп}} = 250–350$ °С. Распад мартенсита при повышении температуры и продолжительности отпуска приводит к интенсивному падению твердости (II стадия), а при более длительных выдержках – к ее постоянному уровню (III стадия).

Методом ПЭМ установлено, что на II стадии отпуска происходит коагуляция ранее сформировавшихся частиц цементита, речная структура сохраняется. На III стадии идет сфероидизация цементита и формирование субзерен феррита. Варьирование режимов отпуска для получения заданного уровня твердости позволило экспериментально установить, что для всех исследованных сталей на II стадии отпуска коэффициент C в уравнении Холломоны – Яффе равен 6.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Программа развития Уральского федерального университета в рамках программы «Приоритет-2030»). Испытания проведены с использованием оборудования ЦКП УрФУ.

Литература

1. Скороходов В. Н., Одесский П. Д., Рудченко А. В. Строительная сталь. – М. : Металлургиздат, 2002. – 624 с.
2. Технология термической обработки стали / Р. Бернст и др. / пер. с нем. – М. : Металлургия, 1981. – 607 с.
3. Effect of quenching and tempering on mechanical properties and impact fracture behavior of low-carbon low-alloy steel / Y. Zhang, J. Yang, D. Xiao, D. Luo, C. Tuo, H. Wu // Metals. – 2022. – Vol. 12 (7). – P. 1087. – DOI: 10.3390/met12071087.
4. Characterization of precipitation and carbide coarsening in low carbon low alloy Q&T steels during the early stages of tempering / Y. Ju, A. Goodall, M. Strangwood, C. Davis // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 738. – P. 174–189. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.09.044.