

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАГРЕВА ТВЧ

Приведены результаты исследований термической обработки с использованием высокочастотного нагрева порошковых железоуглеродистых низколегированных сталей. Изучено влияние температуры нагрева под закалку, длительности нагрева под закалку и скорости охлаждения на физико-механические свойства порошковых железоуглеродистых низколегированных сталей.

Ключевые слова: порошковая металлургия, термическая обработка, закалка, высокочастотный нагрев.

Для повышения физико-механических свойств спеченных порошковых материалов применяются различные методы. Закалка является одним из наиболее эффективных и в то же время простых способов повышения твердости и прочности материала деталей, что в свою очередь в большинстве случаев обеспечивает повышение их работоспособности [1].

В некоторых случаях целесообразно производить поверхностную закалку. Поверхностная закалка обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с объемной закалкой. Так отсутствие необходимости прогрева всего объема материала детали до высоких температур позволяет экономить энергию и время, при этом сердцевина детали остается вязкой и хорошо воспринимает ударные и другие нагрузки [2].

Высокие скорости нагрева могут обеспечить некоторые прогрессивные способы, наиболее широко распространенным из которых является индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ).

Индукционный нагрев основан на следующем явлении. При прохождении переменного электрического тока высокой частоты по индуктору, представляющему собой, как правило, медный соленоид или одиночный виток, вокруг индуктора образуется переменное электромагнитное поле, пронизывающее деталь, помещенную в индуктор (рисунок 1). При этом в поверхностных слоях детали возникают вихревые токи (токи Фуко), вызывающие нагрев этих слоев материала детали до высокой температуры. Таким образом, главным отличием индукционного нагрева от нагрева внешними источниками тепла (в печах и других нагревательных устройствах) является выделение теплоты непосредственно в самом металле.

При индукционном нагреве ТВЧ реализуется возможность значительной концентрации электрической энергии в небольшом объеме нагреваемого металла, что позволяет осуществлять нагрев с большой скоростью [3].

В данной работе были проведены исследования по повышению прочности и твердости спеченных втулок (рисунок 2) из материалов СП100-2 и СП100Д2,5-2 ($D = 22$ мм, $d = 10,5$ мм, $H = 18$ мм) с использованием метода многофакторного планирования экспериментов [4]. В соответствии с традиционной матрицей планирования была произведена термообработка втулок, при этом в качестве переменных факторов рассматривали:

X_1 – температура нагрева перед закалкой ($T_n - 800 \div 1000$ °С);

X_2 – время выдержки ($\tau - 4 \div 10$ с);

X_3 – скорость охлаждения ($V_{охл} - 200 \div 600$ °С/с)

Выходные параметры:

Y_1 – предел прочности при растяжении СП100-2;

Y_2 – твердость СП100-2;

Y_3 – предел прочности при растяжении СП100Д2,5-2;

Y_4 – твердость СП100Д2,5-2.

Окончательные уравнения регрессии после отсева незначимых коэффициентов имеют вид:

$$Y_1 = 50,1 - 4,2x_1 - 4,2x_2 - 2,96x_3,$$

$$Y_2 = 87,7 + 2,1x_1 + 1,7x_2 + 0,9x_3,$$

$$Y_3 = 55,3 - 3,2x_1 - 3,8x_2 - 3,42x_3,$$

$$Y_4 = 76,8 + 3,2x_1 + 2,2x_2 + 1,5x_3.$$

Термообработку проводили в такой последовательности:

– образцы предварительно пропитывали маслом И-20 в течение суток;

– затем образцы помещали в индуктор, и производился нагрев под закалку на установке ВЧГ-2-100/0,066 [5];

– нагретые образцы погружали в закалочную среду.

Температуру нагрева под закалку контролировали оптическим пирометром ОППИР с точностью до $\pm 10^\circ\text{C}$.

Нагрев перед термической обработкой проводили при следующих режимах работы преобразователя ВЧГ-2-100/0,066: напряжение анодное 4,5 кВ, ток анодный 2,5 А, частота 66 кГц.

Время выдержки при температурах нагрева под закалку определяли с учетом величины прокаливаемости деталей (таблица 1).

Нагрев под закалку порошковых сталей ТВЧ сокращает время термообработки и позволяет отказаться от использования защитных сред, т. к. поверхность деталей за 4–10 с нагрева не успевает окислиться. Кратковременность нагрева обеспечивает мелкозернистую структуру и повышение механических свойств, тогда как нагрев в газовых средах приводит к длительным выдержкам при нагреве изделий под закалку, обезуглероживанию поверхностных слоев, росту зерна и снижению механических свойств.

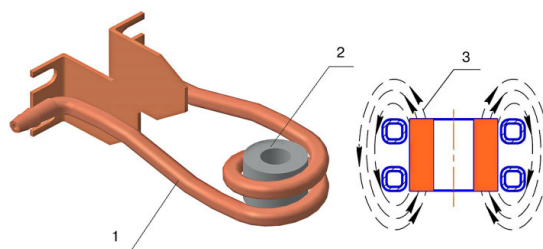
После закалки для всех режимов проводился отпуск при температуре $T_{\text{отп}} = 300^\circ\text{C}$, продолжительностью нагрева $t_{\text{отп}} = 30$ минут (нагрев в муфельной печи ПМ-14М).

Затем провели испытания на твердость, которую измеряли методом Виккерса при нагрузке 613 Н (62,5 кг), и предел прочности при растяжении. Результаты испытаний в исследуемых интервалах показаны на рисунках 3, 4 соответственно.

Из рисунка 3 следует, что с повышением температуры нагрева под закалку и скорости

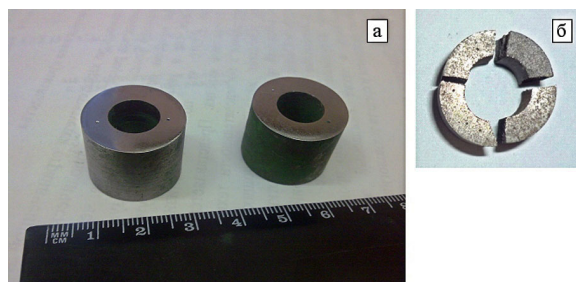
Таблица 1. Влияние длительности нагрева под закалку и закалочной среды на величину прокаливаемости стали СП100Д2,5-2

Время выдержки нагрева под закалку, с	Среда охлаждения	Твердость, НВ			
		на поверхности	на глубине, мм		
			0,1	0,3	0,5
4	вода	144	145	149	140
6	вода	380	385	390	320
8	вода	400	420	395	345
10	вода	оплавление			
4	масло И-20	130	135		125
6	масло И-20	320	320	300	290
8	масло И-20	352	352	333	310
10	масло И-20	оплавление			



1 – индуктор; 2 – нагреваемая заготовка; 3 – токи Фуко

Рисунок 1. Схема индукционной системы нагрева детали



а – исходных; б – после испытаний на сжатие

Рисунок 2. Внешний вид втулок

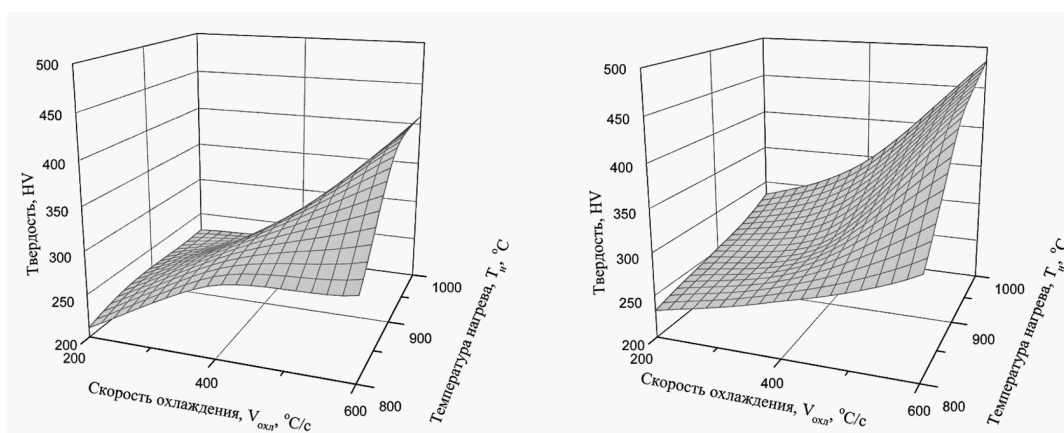


Рисунок 3. Графическая зависимость твердости, НВ от температуры нагрева под закалку, $T_n, ^\circ\text{C}$, и скорости охлаждения, $V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$, материалов СП100-2 (а) и СП100Д2,5-2 (б)

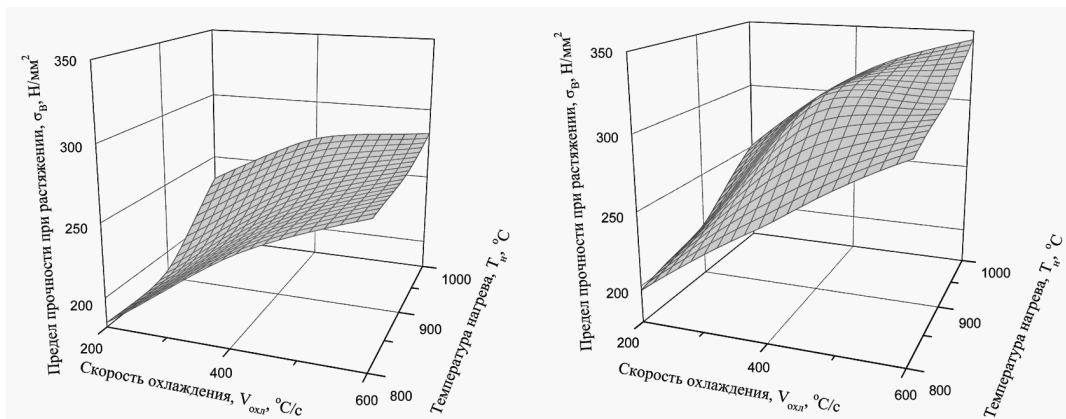


Рисунок 4. Графическая зависимость предела прочности на растяжение, $\sigma_{\text{в}}$, Н/мм², от температуры нагрева под закалку, $T_{\text{н}}$, °С, и скорости охлаждения, $V_{\text{охл}}$, °С/с, материалов СП100-2 (а) и СП100Д2,5-2 (б)



а – до термообработки (твердость 100 НВ; структура феррито-перлитная, поры);
б – после термообработки ($T_{\text{н}}$ – 1000 °С; t – 10 с; $V_{\text{охл}}$ – 600 °С/с; твердость 320 НВ; структура трооститно-сорбитная, поры)

Рисунок 5. Микроструктура порошкового материала СП100-2. Увеличение $\times 320$



а – до термообработки (твердость 120 НВ; структура феррито-перлитная, включения Си, поры);
б – после термообработки ($T_{\text{н}}$ – 1100 °С; t – 10 с; $V_{\text{охл}}$ – 400 °С/с; твердость 340 НВ; структура трооститно-сорбитная, включения Си, поры)

Рисунок 6. Микроструктура порошкового материала СП100Д2,5-2. Увеличение $\times 320$



а – до термообработки (твердость 100 НВ; структура феррито-перлитная, поры);
б – после термообработки ($T_{\text{н}}$ – 1000 °С; t – 10 с; $V_{\text{охл}}$ – 600 °С/с; твердость 320 НВ; структура трооститно-сорбитная, поры)

Рисунок 7. Фрактография излома образцов из порошкового материала СП100-2. Увеличение $\times 1000$

охлаждения твердость монотонно возрастает.

Из рисунка 4 следует, что с повышением температуры нагрева под закалку предел прочности на растяжение увеличивается незначительно, а с повышением скорости охлаждения существенно возрастает.

Была исследована микроструктура образцов, термообработанных по различным режимам (рисунки 5, 6). Изучение микроструктуры упрочненных образцов проводили на цифровом металлографическом комплексе ALTAMU MET3. Травитель 4% HNO_3 в спирте.

Фрактография излома образцов показана на рисунке 7. Микрорельеф поверхности имеет до термической обработки ямочное строение характерное для вязкого излома. Термическая

обработка уменьшает долю вязкой составляющей в изломе образцов после испытаний на сжатие. Излом имеет транскристаллитное хрупкое разрушение сколом. На фасетках скола видны поры и тонкие отщепления металла в виде ручьистого узора.

В результате проведенной научно-исследовательской работы по упрочнению изделий из порошковых сталей, с использованием нагрева ТВЧ установлено, что:

– твердость термообработанных изделий повышается от 2 до 4 раз по сравнению со спекленными изделиями без термообработки.

– повышаются прочностные свойства изделий из порошковых материалов в 1,5–2 раза.
19.05.2010 г.

Список литературы:

1. Богодухов С. И. Термообработка порошковых сталей / Богодухов С. И [и др.] М. Вестник ОГУ, 5'2004.150-153 с.
2. Богодухов, С.И. Исследование структурных процессов при скоростном спекании и термическая обработка порошковых сталей с использованием ТВЧ. С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Д.И. Чурносков. // Металловедение и термическая обработка. М.: Машиностроение – 2009. – С. 395 – 400
3. Слухоцкий, А.Е. Установки индукционного нагрева / А.Е.Слухоцкий и др. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
4. Вертинская Н.Д. Математическое моделирование многофакторных и многопараметрических процессов в многокомпонентных системах. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 286 с.
5. Пат. №2254692 РФ, МПК H05B6/03. Индуктор для методического нагрева изделий / Богодухов С.И. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ОГУ – №2003105274/09; заявл.25.02.2003; опубл.20.06.2005, Бюл №17. – 4 с.

Сведения об авторах

Козик Елена Станиславовна, доцент кафедры начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики Оренбургского государственного университета, канд. техн. наук, доцент
Чурносков Дмитрий Иванович, преподаватель кафедры материаловедения и технологии материалов
Оренбургского государственного университета,
460018, г. Оренбург пр-т Победы, 13, тел. 89033666678, e-mail: dimedrull@rambler.ru

Kozik E.S., Churnosov D.I.

THE THERMAL TREATMENT OF LOW-ALLOY POWDER STEELS WITH THE USE OF INDUCTION HEATING

There are the results of studies of thermal treatment with the use of high-frequency heating of the powder iron-carbide low-alloy steels. The effect of temperature of heating under quenching, heat time under quenching and rates of cooling to the physicomechanical properties of the powder iron-carbide low-alloy steels is studied.

The key words: powder metallurgy, heat working, hardening, high-frequency heating.

References:

1. Bogoduhov S.I. Heat treatment of powder steels. / Bogoduhov S.I. [i dr.] M. Vestnik OGU, 5'2004.150-153 s.
2. Bogoduhov S.I. Research of structural processes at high-speed sintering and thermal processing of powder steels with use of heating by currents of high frequency. S.I. Bogoduhov, E.S. Kozik, D.I. Churnosov. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. M.: Mashinostroenie – 2009. – S. 395 – 400
3. Sluhotsky A.E. Installations of induction heating / Sluhotsky A.E. i dr. – Leningrad: Energoizdat, 1981. – 328 s.
4. Vertinskaya N.D. Mathematical modelling of multifactorial and multiple parametre processes in multicomponent systems.–Irkutsk: Iz-vo IrGTU, 2000. – 286 s.
5. Patent №2254692 RF, MPK H05B6/03. Inducer for methodical heating products/ Bogoduhov S.I. i dr.; the applicant and the patentee GOU OGU №2003105274/09; zayavl.25.02.2003; opubl.20.06.2005, Bul №17. – 4 s.