

УДК 537.622

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2011 г.

А.Н. Мушников

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

s@nek.cc

Поступила в редакцию 24.08.2011

Изучено влияние упругого деформирования (одноосным сжатием, растяжением, кручением, внутренним давлением в толстостенном полом цилиндра и различными их комбинациями) на магнитные характеристики конструкционных сталей 15ХН4Д и 11ХН3Д. По полученным данным строится модель гистерезиса, основанная на теории Джайлза–Атертона [1]. Анализ ряда магнитных характеристик в совокупности позволяет получить однозначную взаимосвязь механических напряжений и магнитных параметров материала и может использоваться для неразрушающего контроля напряжений в стальных конструкциях.

Ключевые слова: упругие деформации, напряжения, модель гистерезиса.

Материалы и методика исследования

Исследования проводили на полых цилиндрических образцах конструкционных сталей 15ХН4Д и 11ХН3Д. Химический состав и основные механические характеристики исследованных сталей приведены в таблице. Испытания проводились только в упругой области.

$$\tau = \frac{TR_{\text{внеш}}}{\pi/2(R_{\text{внеш}}^4 - R_{\text{внутр}}^4)}, \quad (2)$$

где T – текущее значение крутящего момента, $R_{\text{внеш}}$ – внешний радиус образца, $R_{\text{внутр}}$ – внутренний радиус образца. Определение механических напряжений, возникающих под действием гидростатического давления, является решением клас-

Таблица

	C, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Si, %	Cu, %	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа
11ХН3Д	0.11	0.68	0.88	2.96	0.27	0.28	0.7	680	760
15ХН4Д	0.15	0.34	0.69	4.11	–	0.13	1.23	820	895

Экспериментальная установка включала в себя компьютеризированный гистерезисграф, универсальную испытательную машину и малогабаритный гидравлический пресс. Остаточную индукцию (B_r) определяли по петле магнитного гистерезиса с напряженностью магнитного поля до 60 кА/м. Максимальную магнитную проницаемость ($\mu_{\text{макс}}$) получали по начальной кривой намагничивания. Коэрцитивную силу H_c определяли по предельной петле магнитного гистерезиса и по частным петлям.

Нормальные напряжения σ в рабочей части образца определяли по формуле:

$$\sigma = P/S, \quad (1)$$

где P – нагрузка, приложенная к образцу, S – площадь поперечного сечения рабочей части образца в исходном состоянии. Изменением сечения образца во время упругого деформирования растяжением или сжатием пренебрегали. Напряжения при кручении определяли по формуле:

сической задачи Ламе о толстостенной трубе. Под действием внутреннего давления возникают растягивающие окружные напряжения σ_{θ} и сжимающие радиальные напряжения σ_r . Их величины как функции от радиуса r определяются формулами:

$$\sigma_r = \frac{R_{\text{внутр}}^2}{R_{\text{внеш}}^2 - R_{\text{внутр}}^2} \left(1 - \frac{R_{\text{внеш}}^2}{r^2} \right) p, \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{R_{\text{внутр}}^2}{R_{\text{внеш}}^2 - R_{\text{внутр}}^2} \left(1 + \frac{R_{\text{внеш}}^2}{r^2} \right) p.$$

Здесь p – величина гидростатического давления, r может принимать значения от $R_{\text{внутр}}$ до $R_{\text{внеш}}$.

Модель гистерезиса

За основу взята одна из модификаций [2] модели Джайлза–Атертона, в которой частная петля магнитного гистерезиса не может выходить за

границы предельной петли:

$$\frac{dM}{dH} = \delta_m \frac{(1-c)(M_{an}-M)}{k(1-c)\delta - \alpha(M_{an}-M)} + c \frac{dM_{an}}{dH}, \quad (4)$$

где

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right],$$

$$\delta_m = \begin{cases} 0, & (H < 0 \wedge M_{an} \geq M) \vee (H \geq 0 \wedge M_{an} \leq M), \\ 1, & \end{cases}$$

$$\delta = \text{sign}\left(\frac{dH}{dt}\right). \quad (5)$$

По экспериментальным данным определяют следующие параметры модели: M_s – максимальная намагниченность, a – коэффициент формы, α – взаимодействие между доменами, c – коэффициент обратимости движения доменных стенок, k – потери на гистерезис. В параметр «эффективное поле» (H_e), согласно [3], добавляется слагаемое H_{σ} , зависящее от напряжений:

$$H_e = H + \alpha M + H_{\sigma}. \quad (6)$$

Решая дифференциальное уравнение (4) с начальными условиями $M(H_{\max}) = M_s$, можно получить функцию намагниченности от напряженности магнитного поля $M = M(H)$, а по ней определить интегральные магнитные характеристики.

Результаты

На рис. 1 приведена зависимость остаточной индукции B_r от нормальных (σ) и касательных (τ) напряжений без внутреннего давления для стали 11ХНЗД. Аналогичные зависимости получены для всех вышеперечисленных характеристик.

Исследование поведения коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости при комбинировании одноосного растяжения или сжатия с кручением показало, что комбинирование напряжений снижает чувствительность коэрцитивной силы, но одновременно с этим появляется реакция остаточной ин-

дукции на касательные напряжения, которой не наблюдается при $\sigma = 0$. Поведение максимальной магнитной проницаемости подобно остаточной индукции с тем отличием, что остаточная индукция практически не реагирует на касательные напряжения при $\sigma = 0$, а максимальная магнитная проницаемость – при $\sigma = 100$ –120 МПа.

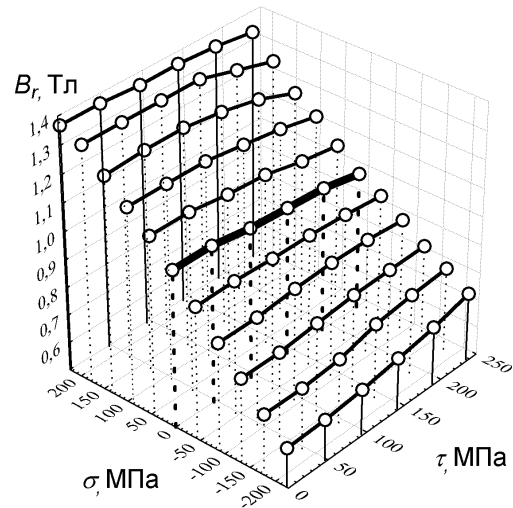


Рис. 1

Внутреннее давление оказывает малое влияние на магнитные характеристики. Это объясняется тем, что вызываемые им напряжения действуют в плоскости, перпендикулярной оси намагничивания.

Работа выполнена при поддержке молодежного гранта Президиума УрО РАН.

Список литературы

1. Jiles D.C., Atherton D.L. // Journal of Applied Physics. 1984. V. 17. P. 1265–1281.
2. Fecioru-Morariu M., Stancu A. // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2003. V. 5, No 4. P. 939–944.
3. Sablik M.J., Kwun H., Burkhardt G.L., Jiles D.C. // Journal of Applied Physics. 1987. V. 61. P. 3799–3801.

MODELING THE BEHAVIOR OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS UNDER ELASTIC STRESSES

A.N. Mushnikov

The influence of elastic deformation (uniaxial compression, tension, torsion, internal pressure, and their combinations) on the magnetic characteristics of structural steels 15CrNi4Cu and 11CrNi3Cu is studied. The data is obtained using the hysteresis model based on the theory of Jiles–Atherton. Analysis of several magnetic characteristics in aggregate provides a unique relationship between the mechanical stress and magnetic material parameters, and therefore can be used for nondestructive tests of stresses in steel structures.

Keywords: elastic deformation, stresses, hysteresis model.