

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

ПОЛЕТАЕВ В.А., д-р техн. наук, ПОТЕМКИН Д.А., асп.

Рассматривается проблема влияния магнитного поля на механические свойства металла. Описан процесс, который может возникнуть в металле под действием магнитного поля. Приведены данные по изменению плотности дислокаций в металле под действием магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитная анизотропия, механические свойства металла, импульсная магнитная обработка.

POWER ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON STRESS-STRAIN PROPERTIES OF STEEL

POLETAYEV V.A., Ph.D., POTYOMKIN D.A., postgraduate

The article deals with the problem of magnetic field influence on stress-strain properties of metal. It describes the process occurring in metals under the magnetic field action. The data on changes in metal dislocation density under magnetic action are listed.

Key words: magnetic field, magnetic anisotropy, stress-strain properties of metal, impulse magnetic treatment.

Проблема влияния магнитного поля на механические свойства металла тесно связана с процессами, происходящими при намагничивании магнетиков. Достаточно заметно это влияние проявляется в магнитомягких материалах с $H_c \leq 3,5$ А/м. В этом случае можно создать увеличение магнитного поля с напряженностью $H_0 \gg H_c$.

Технически достижимо даже при отсутствии специального охлаждения с помощью соленоидов получить магнитное поле напряженностью $H_0 \cong 10^5 \div 10^6$ А/м. В конкретном случае при обработке магнитным полем пыльчатой гарнитуры чесальных машин поле H_i внутри зуба уменьшается не более чем на порядок. Это дает объемную плотность магнитной энергии $W_0 \cong 10^5 \div 10^6$ Дж/м³. Данная величина является основной для сравнения с другими энергетическими показателями процесса намагничивания, в частности: энергией магнитной анизотропии; энергией магнитоstriction; энергией доменных стенок; энергией границ зерен; энергией дефектов и дислокаций [1–5]. Сравнение плотностей этих видов энергии с плотностью магнитной энергии W_0 дает возможность выявить основные причины и механизм влияния магнитного поля на механические свойства магнетика (металла).

Магнитная анизотропия определяется мерой энергии, которая необходима для поворота вектора намагниченности от трудной к легкой оси намагничивания кристалла. Порядок этой величины определяется константой $K_1 = (3 \div 5) \cdot 10^4$ Дж/м³ (для углеродистой стали с содержанием углерода 1 %). Если исходить только из соотношения энергий W_0 и энергии анизотропии W_a , то, поскольку $W_0 \gg W_a$, насыщение, безусловно, должно достигаться. Проверка кривой намагничивания на участке насы-

щения на линейность (парапроцесс) дает возможность определить влияние магнитного поля на дислокации (дефекты). Считается [5], что именно на этом участке намагничивание идет за счет разрушения (размножения) дислокаций при вращении вектора (спинов) спонтанной намагниченности.

Основным процессом, который может привести к разрушению межзеренных (межблочных) границ, является процесс вращения однодоменных зерен мартенсита [3]. Если обозначить через r_3 радиус зерна, h_{rp} – толщину его границы, $\gamma \approx e_{xy} \approx e_{xz} \approx e_{yz}$ – деформацию сдвига, то отношение максимальной энергии вращения к поверхностной энергии будет определяться формулой

$$\frac{W_0}{W_n} = \frac{B_i H_i \frac{4}{3} \pi r_3^2}{2G \gamma^2 4\pi r_3^2 h_{rp}} = \frac{B_i H_i r_3}{G \gamma^2 3h_{rp}}. \quad (1)$$

При $B_i = 1$ Тл, $H_i = 10^6$ А/м, $\gamma^2 = 10^{-7}$, $h_{rp} = 10^{-5}$ м, $r_3 = 10^{-4}$ м, $G = 10^{10}$ Н/м² получается, что $W_0/W_n \approx 1$, т.е. магнитная энергия вращения и энергия сдвига будут одного порядка. Если заменить модуль сдвига G модулем Юнга, то W_0 и W_n будут одного порядка при условиях углового рассогласования в несколько минут. Из формулы (1) видно, что решающее влияние на соотношение энергий оказывает величина углового сдвига γ между решетками зерен (фрагментов, блоков). Полученные данные говорят о высокой вероятности этого процесса, который, очевидно, является необратимым, так как связан с разрушением граничной структуры.

Другим аналогичным механизмом внутренних изменений структуры является разрушение границ зерен, блоков и фрагментов при движении доменных стенок. Давление, которое оказывает стенка на границу, определяется

плотностью магнитной энергии в единице объема $W_0 = B_i H_i$ [2]. Оценка плотности упругой энергии границы определяется величиной $E_{гр} = G\gamma_0$, где γ_0 – угол разориентирования (деформация сдвига) решеток соседних зерен (субзерен, блоков); G – модуль сдвига. Угол разориентирования зерен очень различен. Если для углеродистой стали $G = 10^{10}$ МПа, то для зерна с углом разориентирования $\gamma_0 \approx 3^\circ \approx 0,05$ рад. $E_{гр} = 2,7 \cdot 10^7$ Дж/м³.

Поскольку $W_0 = 10^5 \div 10^6$ Дж/м³, то, видимо, энергии магнитного поля с такой напряженностью недостаточно для разрушения границ между зернами. Если $\gamma_0 \leq 1^\circ$, то $E_{гр} \leq 2,8 \cdot 10^5$ Дж/м³, и энергии магнитного поля достаточно для магнитных превращений.

Явление магнитоэластики означает возникновение механических (упругих) напряжений, приводящих к изменению линейных размеров и объемов магнетика. Если сопоставить это явление с наклепом, то необходимо сравнить магнитоэластическое напряжение $\sigma_{м_1}$ с пределом текучести σ_0 . Принимая $\sigma_0 = 400$ МПа,

сравним эту величину с $\sigma_{м_1} = \frac{E_{м_1}}{\lambda}$, где

$E_{м_1} = E\lambda^2$ – энергия магнитоэластики; λ – относительное удлинение; E – модуль Юнга, равный 200 МПа.

Полагая $\lambda = 10^{-5} \div 10^{-6}$, находим, что $\sigma_{м_1} = E\lambda = 2$ МПа. Из этого следует, что даже при максимальной величине $\lambda = 10^{-5}$ величина $\sigma_{м_1}$ меньше σ_0 на два порядка. Однако следует учесть, что величина λ определяется напряжением сжатия (растяжения). Если ее сравнивать с напряжением сдвига $\sigma_{м_1}$, то, поскольку модуль сдвига на 1–2 порядка меньше модуля Юнга, получается, что эти величины могут быть близки. Необратимые изменения структуры, связанные с движением и размножением дислокаций, определяются именно сдвиговыми напряжениями, которые в силу специфической структуры металла всегда сопутствуют любой деформации сжатия и растяжения.

Как известно [4], сочленение блоков друг с другом происходит посредством дислокаций с энергией магнитного давления. Следуя [4], определим энергию краевой E_0 дислокации на единицу длины:

$$E_0 = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\mu)} \ln \frac{l_d}{r_0}, \quad (2)$$

где b – вектор Бюргера; μ – коэффициент Пуансона; l_d – длина дислокации; r_0 – размер ядра дислокации.

Длину дислокации можно принять равной радиусу зерна, т.е. $l_d = r_3$, так как длина дислокации ограничивается размерами кристаллита. Принимая $b = 10^{-10}$ м, $2r_3 = l_d = 10^{-5}$ м, $r_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ м,

получаем, что энергия краевой дислокации на единицу длины равна $e_0 = 0,33 \cdot 10^{-10}$ Дж/м. Число атомов в ядре дислокации равно $\mu = l_d \pi r_0^2 / a^3 = 7,5 \cdot 10^6$ при $a = 10^{-10}$. Энергия одной дислокации равна $E_0 l_d$. Тогда энергия дислокации, приходящаяся на один атом, определяется следующим образом:

$$E_0 l_d / N = 0,4 \cdot 10^{-22} \text{ Дж/м}^3. \quad (3)$$

Магнитная энергия, приходящаяся на один атом, определяется как:

$$W_0 / N = 10^6 / 2 \cdot 10^{30} = 0,5 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/м}^3. \quad (4)$$

Таким образом, плотность энергии в ядре дислокации примерно на два порядка превышает плотность магнитной энергии. Со статистической точки зрения это означает, что примерно одна из 100 дислокаций может заметно передвигаться за счет давлений магнитного поля. Энергия винтовой дислокации примерно в три раза меньше энергии краевой дислокации. Поэтому вероятность ее движения соответственно выше, чем у краевой. Кроме того, энергетический объем дислокации не ограничивается ее ядром. Он существенно больше, и потому гипотеза о воздействии поля на дислокацию представляется вполне оправданной.

Что касается дефектов (вакансий), то энергия их миграции не менее $1,4 \cdot 10^{-20}$ Дж. Сравнение этой величины с магнитной энергией, приходящейся на один атом ($\frac{W_0}{N} = 0,5 \cdot 10^{-24}$ Дж/м³), показывает, что эти величины несравнимы, когда энергия на один атом уменьшится на порядок. Например, тепловая энергия на один атом равна $\frac{1}{3} kT$, где $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана. Из этого следует, что энергия при закаливании (закалка) сравнима с энергией точечных дефектов.

Кроме оценок по энергии, целесообразно сравнить напряжения, создаваемые дислокациями, с магнитным давлением. Оценка напряжения, создаваемого дислокацией, дается следующим отношением:

$$\sigma_d = \frac{Gb}{4\pi l_d} \approx 10^4 \text{ Па}. \quad (5)$$

Сравнение с магнитным давлением ($P_m = W_0 = 10^5$ Па) показывает, что магнитное давление может существенно превышать локальные напряжения дислокаций и приводить к их разрушению.

Вклад дислокаций в упрочнение оценивается по формуле [5]

$$\tau = \tau_0 + kGb\sqrt{\rho}, \quad (6)$$

где τ_0 – начальное напряжение движения дислокаций (сдвиговое); k – коэффициент пропорциональности; b – вектор Бюргера; ρ – средняя плотность дислокаций; G – модуль упругости.

Полагаем $\rho_{\max} = 10^{18}$ м⁻², $\tau_{\max} = \sigma_0 = 400$ МПа. Тогда, поскольку $\tau_{\max} \gg \tau_0$, то

$$k = \frac{\sigma_0}{Gb\sqrt{\rho}} = 0,4. \quad (7)$$

Тогда при минимальной плотности дислокаций $\rho = 10^{12} \text{ м}^{-2}$ получаем, что

$$\tau_{\max} = kGb\sqrt{\rho} = 0,4 \cdot 10^{10} \cdot 10^{10} \cdot 10^6 = 0,4 \text{ МПа}.$$

Эту величину можно принять за τ_0 . В итоге формулу (6) можно заменить на формулу

$$\Delta\tau = kGb\sqrt{\rho}, \quad (8)$$

где $\Delta\tau_{\min} = \tau_0$; $\Delta\tau_{\max} = \sigma_0$.

По аналогии формулу для оценки влияния магнитного поля можно записать в виде

$$H = K_H Gb\sqrt{\rho}, \quad (9)$$

где K_H – новый коэффициент.

Вывод этой формулы состоит в следующем. Объемная плотность магнитной энергии W_0 определяется формулой

$$W_0 = \frac{BH}{2}.$$

$$\text{Энергия сдвига равна } W_{\Sigma} = G\gamma_0^2 = \tau\gamma_0^2.$$

Очевидно, что влияние магнитного поля возможно, если $BH/2 \approx \tau\gamma_0$. Отсюда $\tau = BH/\gamma_0 \cdot 2$,

если $B_{\max} = 2 \text{ Тл}$, то $\tau = H/\gamma_0$ и $H = K_H Gb\sqrt{\rho}$, где $K_H = K\gamma_0$.

При $\rho_{\min} = 10^{12}$ имеем $H = K\gamma_0 \cdot 10^6$, получается довольно малая величина магнитного поля, при котором возможен эффект упрочнения.

Если $\gamma_0 = 25^\circ = 0,42 \text{ рад}$. (угол разориентирования), то $H = 0,168 \cdot 10^6 \text{ А/м}$; если $\gamma_0 = 15^\circ = 0,25 \text{ рад}$., то $H = 0,1 \cdot 10^6 \text{ А/м}$; если $\gamma_0 = 1^\circ = 0,017 \text{ рад}$., то $H = 0,6 \cdot 10^4 \text{ А/м}$; если $\gamma_0 = 0,1^\circ = 0,001 \text{ рад}$., то $H = 0,4 \cdot 10^3 \text{ А/м}$.

Из этих сугубо приближенных оценок можно сделать вывод, что с точки зрения влияния магнитного поля на механические свойства металла наиболее вероятен механизм размножения дислокаций под действием магнитного давления.

Для подтверждения проведенных выше расчетов был проведен рентгеноструктурный анализ образцов из стали 65, обработанных импульсным магнитным полем. Образцы стали 65 с исходной структурой зернистого перлита были закалены в масле до структуры мартенсита при следующих режимах импульсной магнитной обработки: напряженность магнитного поля – 500 и 300 кА/м; количество импульсов – 5, 15, 30, 60 и 180; длительность импульсов – 1 с; интервал между импульсами – 1 с.

Анализ графиков изменения плотности дислокаций металлических образцов из стали 65, обработанных разной напряженностью магнитного поля (рис. 1), показывает, что величина плотности дислокаций изменяется в зависимости от количества импульсов.

Наибольшая плотность дислокаций в поверхностном слое деталей возникает при количестве импульсов ≈ 5 .



Рис. 1. Изменение плотности дислокаций на поверхности металла: 1 – $H = 300 \text{ кА/м}$; 2 – $H = 500 \text{ кА/м}$

При послойном снятии металла с поверхности образцов, обработанных импульсным магнитным полем, установлено, что глубина изменения плотности дислокаций (рис. 2) находится в пределах $60 \div 120 \text{ мкм}$ в зависимости от величины напряженности магнитного поля.

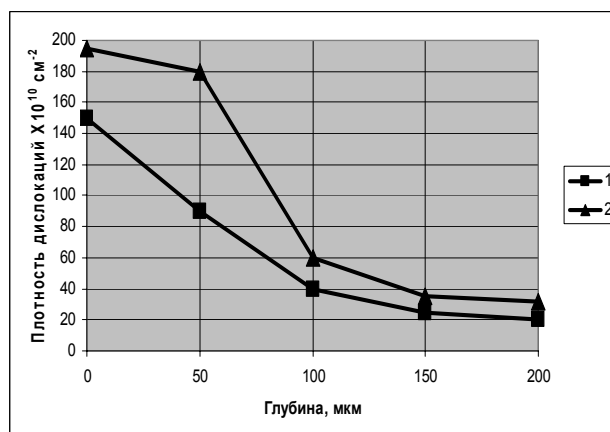


Рис. 2. Изменение плотности дислокаций при послойном снятии металла (количество импульсов – 5): 1 – $H = 300 \text{ кА/м}$; 2 – $H = 500 \text{ кА/м}$

Заключение

Исследования показали, что импульсная магнитная обработка влияет на механические свойства металлов.

Список литературы

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984.
2. Преображенский А.А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1972.
3. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980.
4. Мишин Д.Д. Магнитные материалы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991.
5. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения: Пер. с японского. – М.: Мир, 1987.

Полетаев Владимир Алексеевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-72,
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Потемкин Дмитрий Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-72,
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru