

Особенности механического поведения магнитотвердого сплава 25X15K при не одноосном деформировании

Р.М. Кашаев, Г.Ф. Корзникова, А.В. Корзников

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

Проведено сравнение результатов испытаний магнитотвердого сплава 25X15K на растяжение, кручение и растяжение с одновременным кручением при температуре $T=800^{\circ}\text{C}$. Показано, что характер поведения кривых интенсивность напряжений – степень деформации « σ_e – e » при этих видах деформирования одинаков, влияние степени деформации на напряжение течения при постоянной скорости деформации незначительно.

Ключевые слова: механическое поведение, одноосное деформирование, двухосное деформирование

The results of tensile, torsion and simultaneous tensile and torsion tests of 25KH15K hard magnetic alloy at the temperature $T=800^{\circ}\text{C}$ are compared. It is established that the behavior of the curves stress intensity – deformation ratio « σ_e – e » is equal at these types of loading, the influence of deformation ratio at constant deformation rate is insignificant.

Keywords: mechanical behavior, uniaxial deformation, biaxial deformation

Введение

В большинстве технологических процессов формообразования и операций термомеханической обработки в обрабатываемой заготовке возникает сложное напряженное состояние, когда все три главных напряжения или два из них отличны от нуля. Между тем, обычно механическое поведение металлов исследуют в основном в условиях одноосного нагружения, прежде всего одноосного растяжения или сжатия. Поэтому неясно, в какой мере данные, полученные при одноосных испытаниях, можно распространить на случай многоосного нагружения. Кроме того, решение вопроса об оптимальном пути нагружения с целью получения заданной структуры и свойств материала требует изучения влияния не только степени деформации, но и схемы деформирования.

Для описания механического поведения материала в случае сложного напряженного состояния (многоосного нагружения) используют предположение о соосности тензоров напряжений и скоростей деформаций, а также наличие функциональной связи между вторыми инвариантами напряженного и деформированного состояний или «единой кривой») [1]. Опытные данные, относящиеся к пропорциональному нагружению материала в условиях холодной деформации, когда сопротивление деформации не зависит от ее скорости, довольно хорошо подтверждают существование единой для всех видов напряженного состояния зависимости интенсивности напряжений σ_e от интенсивности деформации e , а также пропорциональность между девиаторами напряжений и скоростей деформаций. В теории течения упрочняющихся материалов единая кривая (представляющая собой зависимость $\sigma_e - e$) определяет вид функции упрочнения и является по существу основной материальной функцией математической модели материала.

При высокотемпературной деформации материал проявляет реологические свойства, то есть чувствительность к скорости деформации. Учет этих свойств материала приводит к естественному обобщению гипотезы единой кривой: в пространстве переменных σ_e , e , ξ_e (ξ_e – интенсивность скоростей деформации) при постоянном значении температуры существует единая для всех видов напряженного состояния термомеханическая поверхность. Как правило, существование единой поверхности ограничивается некоторыми условиями, например, определенным диапазоном деформаций или скоростей деформаций. В случае развитых пластических деформаций и при существенной скоростной чувствительности материала зачастую можно пренебречь деформационным упрочнением или разупрочнением, и тогда гипотеза о существовании единой термомеханической поверхности сводится к

утверждению о существовании единой зависимости $\sigma_e - \xi_e$. Именно эта зависимость называется гипотезой единой кривой в обработке металлов давлением [2].

Сплавы системы FeCoCr являются магнитотвердыми сплавами дисперсионно твердеющего класса. Магниты из них получают как литьем, так и деформационными методами. Формирование высококоэрцитивного ($\alpha_1 + \alpha_2$) состояния в ходе спинодального распада приводит к резкому снижению прочностных и пластических характеристик из-за образования модулированной структуры, состоящей из когерентно связанных упорядоченных частиц α_1 фазы в α_2 матрице. Известно, что, изменяя размер и морфологию упорядоченных фаз, можно существенно поднять пластичность промышленных сплавов. Однако для получения мелкозернистого состояния деформационными методами необходимо знание общих закономерностей течения и структурообразования при получении технологических заготовок.

Целью настоящей работы было исследование механического поведения магнитотвердого сплава 25X15K (Fe-25 вес.% Cr 15% Co) при одноосном деформировании.

Материал и методы

Магнитотвердый сплав 25X15K (Fe-25Cr-15Co, масс. %) относится к сплавам дисперсионно твердеющего класса. Магниты из них получают как литьем, так и деформационными методами [3]. Испытания в условиях высокотемпературной деформации проводились на машине сложного нагружения СНТ10БД [4]. Деформацию сплава проводили при трех видах напряженно-деформированного состояния: растяжением, кручением и растяжением с одновременным кручением. При растяжении и кручении реализуется одноосное напряженное состояние, а при растяжении с одновременным кручением – двуосное. При растяжении, кручении и растяжении с одновременным кручением использовались одинаковые образцы с диаметром рабочей части 8 мм и длиной рабочей части 44 мм. В средней части образца, где деформация практически однородна, двумя рисками ограничивали расчетную длину. Для учета неравномерности удлинения по длине образца определяли приведенную начальную длину образца, которую определяли по формуле $L_0 = \frac{\Delta L_k \cdot l_0}{l_k - l_0}$, где l_0 , l_k – начальная и конечная расчетная длина, ΔL_k –

абсолютное удлинение образца после окончания деформации (расстояние между головками образца).

При кручении приведенную начальную длину определяли по формуле: $L_0 = \frac{\varphi \cdot l_0}{\psi}$, где ψ – угол поворота,

ограничивающего расчетную длину l_0 поперечных сечений образца относительно друг друга, φ – суммарный угол поворота всего образца, определенный по угловой измерительной линейке машины.

Накопленную деформацию e и интенсивность напряжений σ_e при одноосном растяжении, кручении и одновременном растяжении с кручением рассчитывали соответственно по следующим формулам:

$$e_1 = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right), \quad (1.1) \quad \xi_{e1} = \frac{V}{L}, \quad (1.2), \quad \sigma_{e1} = \frac{P_1}{\pi \cdot R^2}, \quad (1.3)$$

$$e_2 = \frac{\varphi \cdot R}{\sqrt{3} \cdot L_0}, \quad (2.1) \quad \xi_{e2} = \frac{\omega \cdot R}{\sqrt{3} \cdot L}, \quad (2.2) \quad \sigma_{e2} = \frac{\sqrt{3} \cdot M_3 \cdot (3 + m)}{2\pi \cdot R^3} \quad (2.3)$$

$$e_3 = \int_0^t \xi_e \cdot dt, \quad (3.1) \quad \xi_{e3} = \sqrt{\left(\frac{V}{L} \right)^2 + \left(\frac{\omega \cdot R}{\sqrt{3} \cdot L} \right)^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{e3} = \frac{P_4 \cdot (m+1) \cdot q^2 \cdot (1+q^2)^{\frac{m}{2}}}{2\pi \cdot R^2 \cdot \left[(1+q^2)^{\frac{m+1}{2}} - 1 \right]} \quad (3.3)$$

где L_0 и $(L=L_0+\Delta L)$ – соответственно приведенная начальная и текущая длина образца; $R = R_0 \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L}}$ – текущий радиус образца; ξ_{e3} – интенсивность скоростей деформации при одновременном растяжении с

кручением; V -осевая скорость деформирования, ω -скорость кручения, L и R -соответственно текущая длина и текущий радиус образца, $q = \frac{\omega \cdot R}{\sqrt{3} \cdot V}$ - кинематический параметр, характеризующий

соотношение сдвиговой и осевой составляющих скорости деформации на поверхности образца.

Формулы (1.1-3.1) и (1.2 -3.2) хорошо известны, а формула (3.3.) является обобщением формул (1.3) и (2.3) для процесса растяжения с одновременным кручением [4].

Коэффициент скоростного упрочнения m в формуле (2.3) определяли при испытании при разной скорости кручения:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{M_1}{M_2}\right)}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)} \text{ при } \varphi_1 = \varphi_2,$$

где M -крутящий момент, ω -скорость кручения. Для этого в процессе испытания скачкообразно изменяли скорость кручения в два раза;

Следует заметить, что при растяжении с кручением при $q=1$ влияние коэффициента скоростной чувствительности m на σ_{e4} незначительное, т.е. значимость m в точности определения σ_{e3} незначительна

[5]. Интегрирование интенсивности скорости деформаций по времени: $e_4 = \int_0^t \xi_e \cdot dt$ позволило учесть

ошибку $\xi_e = \text{const}$. Параметр скоростной чувствительности материала m при растяжении определяли по формуле:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_e'}{\sigma_e''}\right)}{\ln\left(\frac{\xi_e'}{\xi_e''}\right)},$$

где разным скоростям растяжения ξ_e' и ξ_e'' соответствуют интенсивности напряжений σ_e' и σ_e'' .

Результаты и обсуждение

Значение коэффициента скоростной чувствительности интенсивности напряжений определяли методом переключения скорости деформирования. На рис. 1 показана диаграмма растяжения при температуре 850°C со скачкообразным изменением скорости деформации. Видно, что влияние степени деформации на сопротивление деформации незначительно, но оно сильно зависит от скорости деформирования - снижается при ее уменьшении и повышается при ее увеличении.

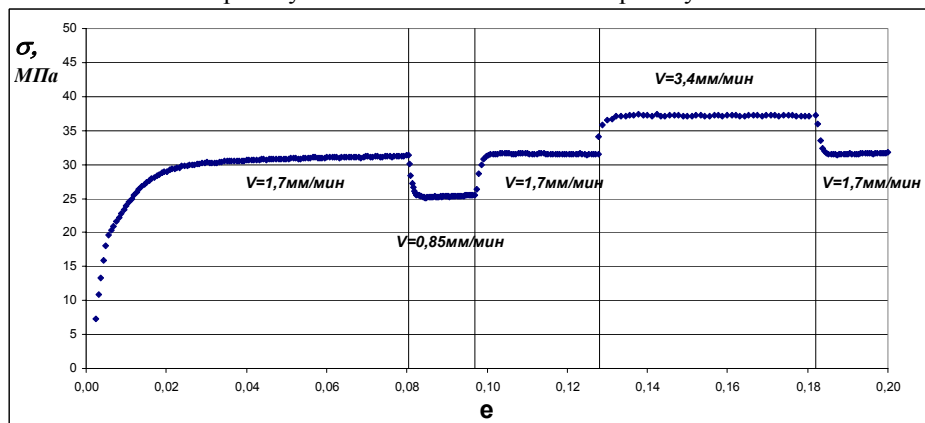


Рис.1. Диаграмма растяжения сплава 25X15K со скачкообразным изменением скорости деформирования при температуре 850°C

Экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением связи вида

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\xi}{\xi_0} \right)^m,$$

где σ_0 – напряжение течения при скорости деформации ξ_0 , m – коэффициент скоростного упрочнения. Для данного интервала изменения скорости деформации $m=0,30$ (рис. 2).

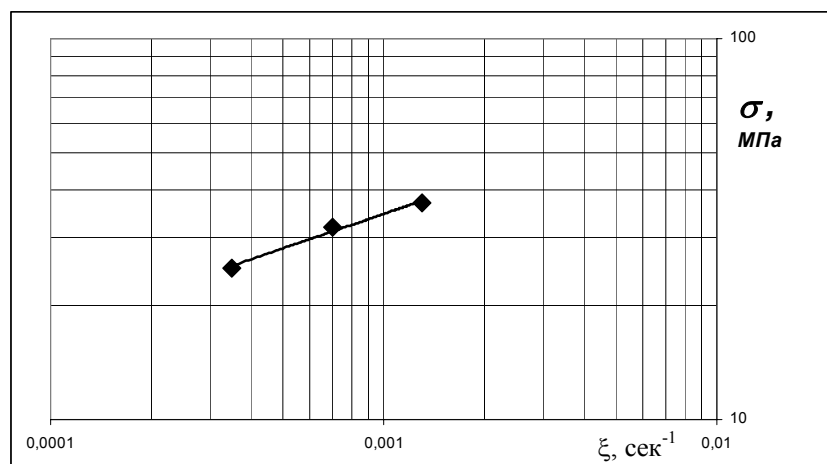


Рис.2. Зависимость напряжения течения от скорости деформации

Испытания при температуре 800°C показали, что при растяжении и кручении с интенсивностью скоростей деформации $\xi=7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ интенсивности напряжений практически одинаковы и равны $\sigma_e = 48 \text{ МПа}$. Чувствительность к скорости деформации сплав проявляет не только при растяжении, но и при кручении. Так, при скачкообразном уменьшении скорости деформации в 10 раз с $\xi=7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ до $\xi=7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ $m=0,27$ как при растяжении, так и при кручении. Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что для сплава 25X15K в исследованном скоростном интервале вид деформации оказывает слабое влияние на зависимость ($\sigma_e \sim \xi_e$).

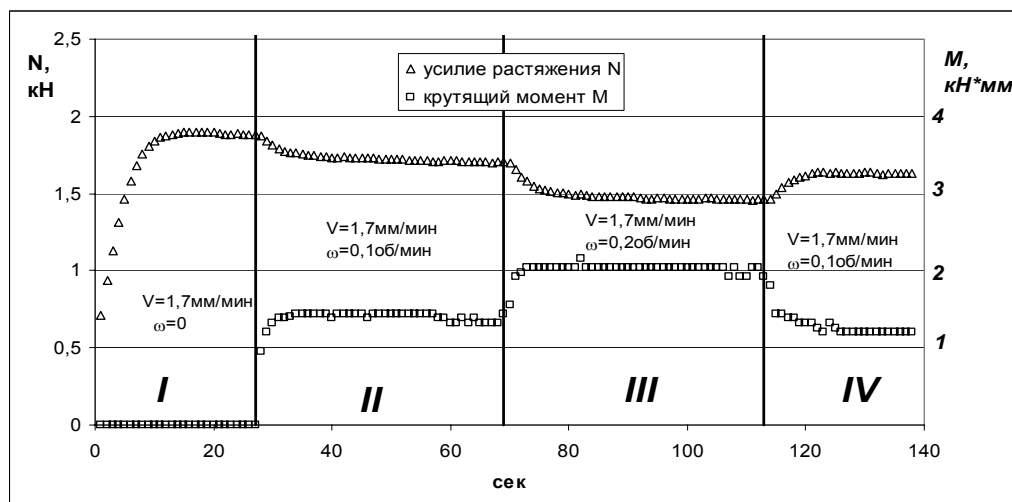


Рис.3. Изменение осевого усилия и крутящего момента при растяжении с кручением при температуре 800°C

Особенности неоднородного деформирования изучали при испытании по многозвенным траекториям деформаций (рис. 3). Образец был испытан по следующей программе: I звено – растяжение ($\dot{\epsilon}=6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{\epsilon}=48 \text{ МПа}$), II звено – растяжение + кручение с соотношением скорости кручения к скорости растяжения $q=1$ ($\dot{\epsilon}_{\epsilon}=8,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{\epsilon}=52 \text{ МПа}$), III звено - растяжение + кручение с $q=2$ ($\dot{\epsilon}_{\epsilon}=1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\sigma_{\epsilon}=64 \text{ МПа}$), IV звено - растяжение + кручение с $q=1$. Видно, что добавление кручения приводит к снижению осевой компоненты напряжения течения, несмотря на увеличение интенсивности скоростей деформации.

Как показал микроструктурный анализ, в результате сложного деформирования растяжением с кручением в образцах происходит уменьшение среднего размера зерен, причем формируется структура градиентного типа. В недеформированной зоне, снятой с сечения головки образца, структура однофазная и средний размер равноосных зерен α фазы составляет 40 мкм. В рабочей зоне образца произошло некоторое измельчение зерен, причем зерна приобрели вытянутую форму не только вблизи поверхности, но и в центре образца. Средний размер зерен в центре рабочей части составил 40 мкм, а около поверхности - не более 10 мкм. Сформировавшаяся при такой схеме деформирования градиентная структура дает возможность пластифицировать поверхностные слои заготовки для последующего волочения в предварительно состаренном состоянии с целью получения сильной одноосной текстуры, обеспечивающей максимальные магнитные свойства данного сплава.

Выводы

1. Установлено что в процессе деформации при трех видах напряженно-деформированного состояния: растяжении, кручении и растяжении с одновременным кручением образцов магнитотвердого сплава 25X15K для установившегося течения существует единая функциональная связь между интенсивностями напряжений и скоростей деформаций а также происходит трансформация структуры.

2. Установлено, что при деформации растяжением с последующим кручением формируется градиентная структура с постепенным переходом от крупнозернистой в центре образца к ультрамелкозернистой структуре в периферийной части. При этом с увеличением угла закручивания размер зерна уменьшается по всему сечению образца.

Литература

1. Ильющин А.А. Пластичность. Ч. 1. Теория малых упруго-пластических деформаций. М., ГИТТЛ, 1948, 388 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М., Металлургия, 1986, 688 с.
3. Смирнов О.Ю., Цепин М.А., Бегнарский В.В., Корзникова Г.Ф., Корзников А.В. Влияние комбинированного нагружения на получение нанокристаллической и субмикроструктурной структуры вблизи поверхности деформируемой заготовки. Кузнечно-штамповое производство, 2006, № 5, С. 19-24.
4. Кайбышев О.А., Васин Р.А., Бердин В.К., Кашаев Р.М. Установка для изучения больших пластических деформаций материалов в условиях сложного нагружения. Кузнечно-штамповочное производство, 1999, № 4, С.8-11.
5. Бердин В.К., Кашаев Р.М. Об определении напряженного состояния при растяжении с кручением сплошного цилиндра. Проблемы прочности, 2001, № 1. С. 28-37.

Кашаев Ришат Мавлявиевич — ИПСМ РАН, к.т.н., научный сотрудник, специалист по механике технологических процессов. Халтурина 39, 450001, Уфа, тел. (347) 282-37-57, факс (347) 282-37-59, rishat@kashaev.ru

Корзникова Галия Фердинандовна — ИПСМ РАН, д.т.н., в.н.с. Область интересов - материаловедение, магнитные материалы. Халтурина 39, 450001, Уфа, тел. (347) 282-37-57, факс (347) 282-37-59, korznikova@anrb.ru

Корзников Александр Вениаминович — ИПСМ РАН, д.т.н., ученый секретарь. Область интересов — материаловедение сталей и сплавов. Халтурина 39, 450001, Уфа, телефон (347) 282-37-57, факс (347) 282-37-59, korznikov@imsp.da.ru