

Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур

В. А. Стрижало, Е. В. Воробьев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Представлены результаты исследования низкотемпературной скачкообразной деформации и влияния магнитно-импульсного циклирования на закономерности деформирования бронзы БрХ08Цр. Установлены закономерности прироста деформации от напряженности поля и приложенной нагрузки.

Показана возможность экспериментального моделирования эффекта прерывистой текучести методом наложения импульса магнитного поля и получена соответствующая математическая модель процесса деформирования.

Ключевые слова: скачкообразная деформация, импульс магнитного поля, импульсное воздействие, прирост деформации, циклирование, прерывистая текучесть.

При практическом использовании эффекта сверхпроводимости требуется учитывать влияние мощных магнитных полей (МП) на прочность и особенности деформирования конструкционных материалов в условиях глубокого охлаждения [1, 2]. Такой учет необходим также при разработке методов магнитно-импульсной обработки металлов и реализации других практических приложений.

Ранее [3–5] исследовалось влияние постоянного МП и единичных импульсов на сопротивление деформированию и механические характеристики металлов при криогенных температурах. В данной работе представлены новые результаты исследования влияния магнитно-импульсного циклирования на закономерности деформирования металлов, в том числе применительно к задаче моделирования низкотемпературной прерывистой текучести.

Объектом исследования служила бронза БрХ08Цр, перспективная для применения в термоядерных реакторах и электрофизических установках со сверхпроводящими магнитами. Использовали стандартные пятикратные образцы с диаметром рабочей части 3 мм.

Эксперименты проводили при температуре 293, 77 и 4,2 К на установке УМН-10 [2], в которой модернизирована система создания импульсного МП – в качестве накопителя энергии использовался промышленный энергетический модуль “Импульс БМ”. Емкость батареи высоковольтных конденсаторов 1800 мкФ, напряжение заряда до 6 кВ, что дает возможность накапливать энергию до 30 кДж, преобразуемую в энергию поля. Система позволяет генерировать сильное МП напряженностью $H \leq 24,4$ МА/м. Напряженность поля пропорциональна напряжению заряда, задаваемому в интервале 1...6 кВ с шагом 0,1 кВ. По достижении заданного напряжения происходит разряд батареи через соленоид, на оси отверстия которого расположен образец. Кроме того, с помощью системы можно генерировать как отдельные импульсы

сы, так и их непрерывные серии. Круговая частота поля $\omega = 13,1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, соответственно длительность импульса (первого полупериода) $\tau = 0,24 \text{ мс}$.

Испытания на растяжение показали, что с понижением температуры от 293 до 4,2 К увеличиваются как прочностные, так и пластические характеристики бронзы: предел прочности σ_B – от 280 до 320 МПа, относительное удлинение δ – от 28,0 до 42,5%.

Низкотемпературная прерывистая текучесть бронзы реализуется при температуре 4,2 К и напряжениях течения, близких к пределу прочности. При этом большая часть диаграммы растяжения является гладкой, амплитуда скачков по напряжению очень мала и не превышает 1% напряжения начала скачка; в то же время для аустенитных сталей амплитуда скачков составляет $\sim 20\%$ [2].

Диффузия МП в проводящий материал сопровождается потерями энергии поля на электродинамическое сжатие и нагрев проводника в результате действия пондеромоторного и термического эффектов. В случае используемой методики первый преимущественно проявляется для материалов с довольно высокой электропроводностью, к которым относятся и бронзы, второй – при температурах 20 К и ниже, когда теплоемкость металлов близка к нулю [3–5].

Эксперименты с наложением серии импульсов МП проводили при $\sigma = \text{const}$ на трех уровнях напряжений: $\sigma = 0$, $\sigma = 0,8\sigma_T$ и $\sigma = \sigma_T$ ($\sigma_T = \sigma_{0,2}$) при температуре 293 и 77 К. Создавалось МП напряженностью 8,3; 12,4 и 16,6 МА/м, причем в каждой серии импульсов она не изменялась. При $\sigma = 0$ остаточная деформация появлялась после серии импульсов лишь при максимальной напряженности. В случае если образец предварительно нагружен, приросты деформации $\Delta\epsilon_i$ регистрировались после каждого импульса (рис. 1). В условиях жесткого нагружения процесс деформирования сопровождался резким спадом нагрузки. После подгрузки производился следующий импульс. При определенном числе импульсов приращение деформации затухает, и она достигает величины насыщения $\Delta\epsilon_\Sigma$.

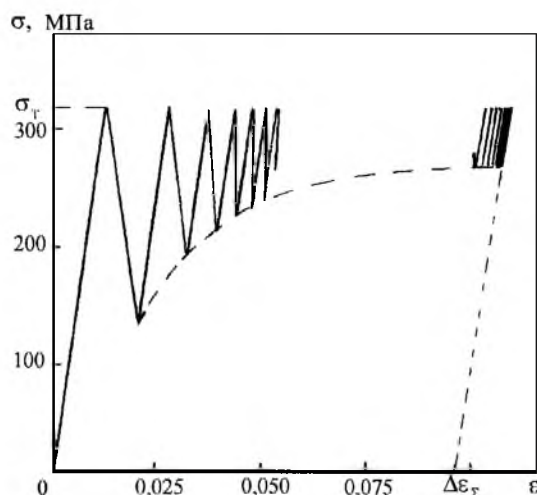


Рис. 1. Деформирование образца бронзы БрХ08Цр под действием импульсного МП при температуре 77 К.

Как отдельные приросты деформации $\Delta\varepsilon_i$, так и их суммарная величина $\Delta\varepsilon_\Sigma$ возрастают с увеличением σ . При $T = 77$ К повышение напряжения от уровня $0,8\sigma_T$ до σ_T сопровождается ростом $\Delta\varepsilon_\Sigma$ на 40% (здесь и далее подразумеваются истинные деформации и напряжения).

Ранее показано [3, 4], что воздействие импульса МП при сильном или умеренном скинировании поля (рассматриваемый случай) на уровне напряжения течения σ_f дает прирост деформации образца $\Delta\varepsilon_1 = k_\varepsilon H^2 / \sigma_f$, где $k_\varepsilon = [\Gamma/\text{м}]$ – коэффициент пропорциональности, при $\sigma = 0$ – $\Delta\varepsilon_1 = (k_\varepsilon H^2 - W_d) / \sigma_T$, где W_d – дополнительная удельная энергия. Полагая, что эта энергия пропорциональна энергии упругого деформирования, из условия энергетического баланса при $\sigma \leq \sigma_T$ получаем

$$\Delta\varepsilon_1 = [k_\varepsilon H^2 - k_y(\sigma_T^2 - \sigma^2)E^{-1}] / \sigma_T, \quad (1)$$

где k_y – безразмерный коэффициент пропорциональности; E – модуль упругости материала. Согласно (1), на величину $\Delta\varepsilon_1$ и соответственно $\Delta\varepsilon_\Sigma$ существенное влияние оказывает напряженность МП (рис. 2).

Некоторое снижение эффективности импульсных воздействий МП с повышением температуры до 293 К (примерно на 25%) является следствием увеличения удельного электрического сопротивления металла и соответственно глубины проникновения поля [3, 4].

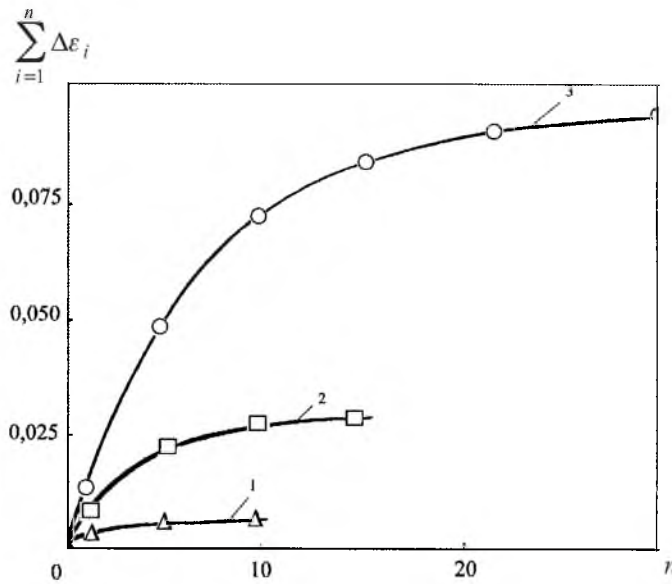


Рис. 2. Зависимости суммарного прироста деформации образца от числа импульсов при напряженности поля 8,3 (1), 12,4 (2) и 16,6 МА/м (3), $T = 77$ К и $\sigma = \sigma_T$.

Аппроксимируя диаграмму растяжения степенной зависимостью $\sigma = \sigma_T + A\varepsilon^m$, где A и m – постоянные, с использованием энергетического подхода получаем, что при $\sigma = \sigma_T$ после серии из n импульсов следующий импульс даст прирост деформации

$$\Delta\varepsilon_{n+1} = \left[k_\varepsilon H^2 - k_y A^2 \left(\sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_i \right)^{2m} / E \right] \left[\sigma_T + A \left(\sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_i \right)^m \right]^{-1}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при насыщении, когда $\Delta\varepsilon_{n+1} = 0$, соотношение между общим приростом деформации и напряженностью МП имеет вид

$$\Delta\varepsilon_\Sigma = \left(\frac{H}{A} \sqrt{Ek_\varepsilon/k_y} \right)^{1/m}. \quad (3)$$

При достаточно больших величинах H и n под действием серии импульсов МП произойдет разрушение образца, т.е. общий прирост деформации превысит деформацию ε_B , соответствующую пределу прочности $\bar{\sigma}_B$. С учетом того что $\bar{\sigma}_B = \sigma_T + A\varepsilon_B^m$, из (3) получаем условие разрушения $H \geq (\bar{\sigma}_B - \sigma_T) / \sqrt{k_y/Ek_\varepsilon}$.

Согласно (3), $\Delta\varepsilon_\Sigma \sim H^{1/m}$ и соответственно $(\Delta\varepsilon_\Sigma)_H / (\Delta\varepsilon_\Sigma)_{H_1} \sim (H/H_1)^{1/m}$. При $H_1 = 8,3$ МА/м, $T = 77$ К ($m = 0,21$ с учетом $\varepsilon_B = m$ [6]) для использованного ряда величин напряженности 8,3; 12,4 и 16,6 МА/м соотношения $(H/H_1)^{1/m}$ составляют соответственно 1,0; 7,1 и 28. Полученные экспериментально соотношения $(\Delta\varepsilon_\Sigma)_H / (\Delta\varepsilon_\Sigma)_{H_1}$ составляют 1,0; 6,3 и 23,0, т.е. они довольно близки к расчетным значениям.

После магнитно-импульсного циклирования изменяются механические характеристики материала: предел текучести возрастает, относительное удлинение снижается. При $T = 77$ К их наибольшие изменения достигают 36,0 и 23,0% соответственно.

Поскольку импульс МП вызывает резкий скачок деформации и напряжения, такой процесс деформирования, как и основанный на импульсном механическом подгружении образца [7], можно рассматривать как модель отдельного акта низкотемпературной прерывистой текучести.

Для описания этого процесса используем уравнение состояния для одномерного упрочняющегося вязкопластического тела [8]:

$$\sigma = \sigma_0 + \varepsilon\theta + \dot{\varepsilon}\mu, \quad (4)$$

где θ – модуль упрочнения; μ – коэффициент вязкости; $\sigma_0 \geq \sigma_T$. С использованием (4) составим уравнение равновесия в напряжениях для неподгружаемой системы образец–машина при воздействии импульса МП в виде $\sigma + \dot{\varepsilon}ML/F = \sigma_0 - K\varepsilon + p \sin \omega t$, или

$$\dot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon}\mu/u + \varepsilon(\theta + K)/u = \frac{p}{u} \sin \omega t, \quad (5)$$

где M – масса подвижных частей; L – длина рабочей части образца; F – площадь ее поперечного сечения; $K = (1/E + F/CL)^{-1} \approx CL/F$ – эффектив-

ный модуль системы образец–машина; C – жесткость системы; $p = k_p H^2$ – амплитудное значение давления МП; k_p – коэффициент пропорциональности; t – время; $u = ML/F$. Длительность процесса деформирования соответствует времени нарастания нагрузки, т.е. $\tau_c/2$. При сильном скинировании поля можно принять $k_p = \mu_0$, где μ_0 – магнитная постоянная.

Преобразовывая (5) к виду $\ddot{\varepsilon} + a\dot{\varepsilon} + b\varepsilon = c \sin \omega t$, получаем дифференциальное уравнение, аналогичное полученному для описания процесса прерывистой текучести [9], что служит теоретическим подтверждением возможности предлагаемого моделирования.

Следует отметить, что при $\omega > \omega_c$, где $\omega_c \approx \sqrt{C/M}$ – собственная частота колебаний системы образец–машина, в процессе импульсного деформирования происходит размыкание силовой цепи, поскольку скорость перемещения головки образца превышает скорость упругого возврата захвата машины. В этом случае, в отличие от моделируемого процесса ПТ силы упругости не участвуют в работе деформирования, а сопротивление сил инерции уменьшается на несколько порядков, и адекватность модели на количественном уровне существенно снижается. Восстановление адекватности возможно путем изменения соотношения между коэффициентами при ε и $\dot{\varepsilon}$ в (5) или между ω и ω_c . Модельные материалы выбираются из числа обладающих малым удельным электрическим сопротивлением.

Таким образом, экспериментально изучено влияние сильных магнитных полей, действующих в режиме магнитно-импульсного циклирования, на закономерности низкотемпературного деформирования металла при постоянных уровнях нагрузки. Установлены закономерности прироста деформации от напряженности поля и механического напряжения. Расчетные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными.

Показана возможность экспериментального моделирования эффекта прерывистой текучести методом воздействия на нагружаемый образец импульса МП и получена математическая модель данного процесса.

Резюме

Наведено результати дослідження низькотемпературної стрибкоподібної деформації та впливу магнітно-імпульсного циклювання на закономірності деформування бронзи БрХ08Цр. Установлено закономірності приросту деформації від напруженості поля та прикладеного навантаження.

Показано можливість експериментального моделювання ефекту переривчастості текучості методом накладання імпульсу магнітного поля і отримано відповідну математичну модель процесу деформування.

1. Георгиевский А. В., Максименко Б. П. Магнитные системы термоядерных реакторов // Атом. техника за рубежом. – 1982. – № 5. – С. 9 – 20.
2. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.

3. *Воробьев Е. В.* О влиянии импульсных магнитных полей на закономерности деформирования металлов при низких температурах // Пробл. прочности. – 1986. – № 4. – С. 42 – 45.
4. *Воробьев Е. В.* Деформирование меди при воздействии сильных магнитных полей и криогенных температур // Там же. – 1989. – № 12. – С. 32 – 36.
5. *Воробьев Е. В.* Низкотемпературное упрочнение конструкционных сплавов в условиях воздействия сильных магнитных полей // Там же. – 1990. – № 6. – С. 48 – 52.
6. *McClintock F. A. and Argon A. S.* Mechanical Behavior of Materials. – Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1966. – 443 p.
7. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Моделирование низкотемпературной прерывистой текучести методом импульсного подгружения // Пробл. прочности. – 1997. – № 3. – С. 83 – 89.
8. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 285 с.
9. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* Развитие низкотемпературной скачкообразной деформации металлов и возможности ее устранения // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 41 – 52.

Поступила 25. 04. 2002