

05

## Определение вида гидродинамического течения при ползучести аморфного металлического сплава на основе кобальта в переменном температурном поле

© В.А. Федоров<sup>1</sup>, А.Д. Березнер<sup>1,¶</sup>, А.И. Бескровный<sup>2</sup>, D. Neov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия

¶ E-mail: qwert1009@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2018 г.

Исследована деформация аморфного кобальтового сплава ленточной конфигурации при испытаниях на ползучесть в переменном температурном поле. Найден аналитический вид кривой ползучести, а также осуществлен прогнозный расчет величины удельного сопротивления с помощью предложенной функции ползучести. Установлен физический смысл параметров уравнения ползучести и найдена их размерность. Показано, что при воздействии переменного температурного поля ползучесть исследуемого сплава не является ньютоновской и при деформации материал проявляет псевдопластические свойства. Обнаружено, что при отсутствии нагрева вязкость аморфных ленточных сплавов можно рассматривать в рамках модели бингамовских пластиков.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46440.17274

Аморфные металлические сплавы (металлические стекла) являются предметом активного исследования в различных областях физики, химии и инженерии ввиду их уникальных механических, магнитных и антикоррозионных свойств. Один из подходов к количественному и качественному описанию механических свойств металлических стекол заключается в аналитическом моделировании, в рамках которого предлагается некоторая переменная величина, связывающая проявление механических свойств со структурным состоянием материала [1,2].

Однако, несмотря на наличие работ [3,4], в которых осуществляется поиск опорных величин состояния, установление количественной связи предлагаемых параметров со свойствами материала осложнено отсутствием явного вида функции ползучести. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное и аналитическое исследование деформационного поведения аморфного металлического сплава при комбинированном воздействии переменного температурного поля и постоянной нагрузки.

В экспериментах использовался аморфный металлический сплав на основе кобальта размером  $50 \times 3.5 \times 0.02$  mm (температура кристаллизации сплава  $T_{cryst} = 743$  K) со следующим соотношением атомных весов составляющих: Co (85.41%), Fe(2.27%), Si (5.15%), Mn (4.07%), В (2%), Cr (1.1%). К образцам подвешивался статичный груз массой  $m = 0.1$  kg, затем образцы нагревались в печи с постоянной скоростью  $\sim 0.9-1$  K/s. При этом сила натяжения, действующая на образец со стороны груза, оставалась постоянной на протяжении всего эксперимента. Температура образца фиксировалась лазерным пирометром Testo-845. Удлинение образцов измерялось лазерным триангуляционным датчиком Riftek. Для оценки аморфности структуры выполнялись исследования на дифрактометре тепловых нейтронов DN-2 по методике [5,6].

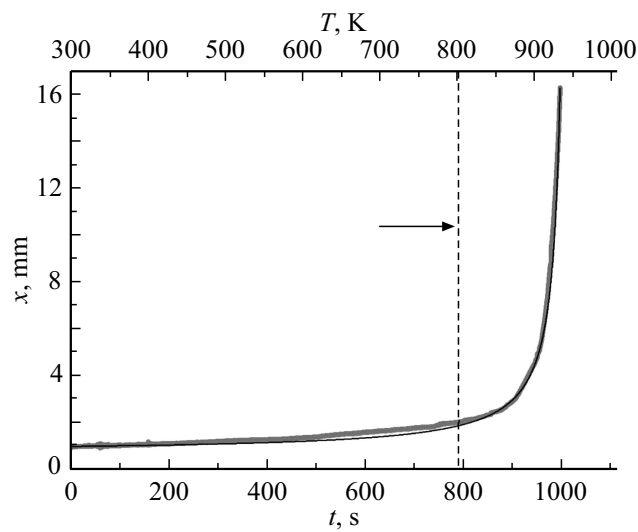
На рисунке представлена характерная кривая ползучести аморфного ленточного образца, полученная при воздействии переменного температурного поля и постоянной нагрузки.

Установлено, что для экспериментальных кривых удлинения образца  $x(t)$  возможен подбор гиперболической зависимости вида

$$x(t) = x_0 + \frac{Ct}{B^2 - Bt}, \quad (1)$$

где  $x_0$  — начальное показание триангуляционного датчика;  $C$ ,  $B$  — аналитические параметры, имеющие фиксированные значения;  $t$  — время деформации. При нагреве образца с постоянной скоростью  $V$  время  $t$ , затраченное на процесс ползучести, может быть определено через начальные условия эксперимента (начальную  $T_0$  и конечную  $T$  температуры нагрева) с помощью линейного соотношения

$$t = \frac{T - T_0}{V}. \quad (2)$$



Кривая ползучести аморфного металлического сплава. Теоретическая кривая показана черным цветом, экспериментальная — серым. Температура кристаллизации сплава отмечена стрелкой.

Соответствие между аналитически предложенной функцией (1) и статистическими данными, полученными в эксперименте, проверялось с помощью ковариации и коэффициента корреляции. Было рассчитано значение коэффициента корреляции  $r$  данных:  $0.9 < r < 1$  ( $r_{\max} = 0.9972$ ). Значения  $x(t)$ , отдельно рассчитанные по формуле (1), в максимально точном случае совпадают с экспериментальными (табличными) данными на 99.97% (с точностью до приборной погрешности триангуляционного датчика  $\pm 0.001$  mm). Таким образом, применение корреляционного метода к выражению (1) и экспериментальным данным является адекватным, и предложенная формула (1) действительно описывает процесс ползучести в масштабе, для которого этот процесс имеет смысл (масштабы континуальной механики). Необходимо отметить, что в случае интерполяции экспериментальных кривых ползучести линейной зависимостью расхождение между аналитическими и экспериментальными значениями возрастает на несколько порядков, что указывает на сравнительно большую применимость уравнения (1)

по отношению к линейной интерполяции. При анализе зависимости (1) был установлен физический смысл величины  $B$ : она принимает значения времени, при котором происходит разрыв ленты, и ее величина зависит от начальных условий эксперимента (качества образца и др.), а также от режима нагрева. Величина  $C$  является коэффициентом с размерностью  $m \cdot s$ , и ее значение зависит только от начальных условий эксперимента. Для дополнительной проверки аналитического уравнения (1) был проведен прогнозный расчет средней величины удельного сопротивления по закону Ома, который показал, что удельное сопротивление образцов при ползучести варьируется в интервале значений от  $10^{-5}$  до  $10^{-4} \Omega \cdot m$ . Этот результат подтверждается с помощью методик мостового и четырехзондового измерений в интервале сохранения площади поперечного сечения образца, соответствующего докристаллизационному интервалу температур. Таким образом, уравнение (1) не только описывает процесс ползучести, но и позволяет прогнозировать поведение величин, не входящих в первоначальное рассмотрение.

Из литературы [7] известно, что ползучесть аморфных образцов при постоянной температуре протекает гомогенно или негомогенно в зависимости от величины напряжения сдвига и геометрических размеров. Это позволяет исследовать деформацию аморфных металлов с позиций гидродинамики ньютоновской или неньютоновской жидкости, обладающей высокой вязкостью. При этом в случае термоактивируемой ползучести с переменной температурой вязкость является функцией температуры, и деформация материала не может рассматриваться с позиций течения ньютоновской жидкости [8]. Однако наличие явного вида закона ползучести позволяет аналитически установить тип негомогенного течения материала в процессе его деформации при нагреве.

Исходя из определения сдвигового напряжения ламинарного слоя с квазипостоянной силой  $F$  по площади сдвига  $A$ , а также с учетом наличия модуля чистого сдвига  $G$  при деформации твердого аморфного образца можно записать

$$\tau = \frac{F}{A} = G \operatorname{arctg} \varepsilon, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \Delta x/x_0$ .

С учетом сохранения гиперболического вида функции ползучести (1) при дифференцировании было найдено рекуррентное соотношение

между удлинением  $\varepsilon$  и скоростью одноосного удлинения лент  $\dot{\varepsilon}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{C\dot{\varepsilon}}{x_0} - \frac{C}{Bx_0}}. \quad (4)$$

Поскольку выражение (4) сохраняет размерность и точность при экспериментальной оценке скорости ползучести, то без увеличения погрешности, путем подстановки (4) в (3), можно найти условие связи сдвигового напряжения и скорости ползучести аморфных лент вдоль оси  $x$  в случае малых углов сдвига

$$\tau(\dot{\varepsilon}) \approx G \left( \sqrt{\frac{C\dot{\varepsilon}}{x_0} - \frac{C}{Bx_0}} \right). \quad (5)$$

Согласно определению величины скорости сдвига ламинарных слоев „жидкости“  $\dot{\gamma}$  вдоль оси  $x$  относительно оси  $y$ ,

$$\dot{\gamma} = \frac{d\dot{\varepsilon}}{dy} = \frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} \frac{dt}{dy}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет найти связь между скоростью одноосной деформации  $\dot{\varepsilon}$  и скоростью течения плоских слоев „жидкости“

$$\dot{\varepsilon} = \int \dot{\gamma} dy. \quad (7)$$

Поскольку величина  $y$  меняется во времени  $t$  и первообразная (7) зависит также от переменной  $t$ , можно предположить, что скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  после интегрирования либо пропорциональна  $\dot{\varepsilon}$  (ввиду рекуррентного свойства производных от выражения (1)), либо находится в более сложной зависимости от скорости одноосной ползучести  $\dot{\varepsilon}$ .

Таким образом, условие (5) сопоставимо с общим условием неньютоновского течения [8], идентичного псевдопластическому течению Прандтля:

$$\begin{aligned} \tau(\dot{\gamma}) &= G \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{C \int \dot{\gamma} dy}{x_0} - \frac{C}{Bx_0}} \right) \\ &\approx G \left( \sqrt{\frac{C \int \dot{\gamma} dy}{x_0} - \frac{C}{Bx_0}} \right) \Leftrightarrow \tau(\dot{\gamma}) = \mu(\dot{\gamma})^n, \end{aligned} \quad (8)$$

в котором параметр  $\mu$  является мерой консистенции сплава, связанной линейно с вязкостью, и  $n = 1/2$ . На основании условия (8) можно

сделать вывод о присутствии в неомогенной деформации аморфного сплава составляющей доли псевдопластического „течения“. Необходимо также отметить, что „течение“ может считаться полностью псевдопластическим при условии равенства нулю величины  $C/Bx_0$ , что неосуществимо в процессе ползучести. Это означает, что при отсутствии нагрева поведение аморфного сплава может рассматриваться как упругое течение бингамовского пластика [8], а при влиянии температуры деформация сплава совмещает в себе суперпозицию режимов неньютоновских течений (псевдопластическое течение).

Представленные в работе зависимости могут быть использованы при построении теории и методики вискозиметрии аморфных металлических сплавов, изготовленных в ленточной конфигурации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00513-а) и госзадания 3.8515.2017/БЧ.

## Список литературы

- [1] Бетехтин В.И., Глезер А.М., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю. // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 1. С. 85–89.
- [2] Бетехтин В.И., Гюлиханданов Е.Л., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю., Толочко О.В. // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 8. С. 1420–1424.
- [3] Berlev A.E., Bobrov O.P., Khonik V.A., Csach K., Jurikova A., Miskuf J., Neuhäuser H., Yazvitsky M.Yu. // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 132203 (1–4).
- [4] Kassner M., Smith K., Eliasson V. // J. Mater. Res. Technol. 2015. V. 4. P. 100–107.
- [5] Fedorov V., Berezner A., Pluzhnikova T., Beskrovnyi A. // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1899. P. 030001 (1–6).
- [6] Балагуров А.М., Бескровный А.И., Журавлев В.В., Миронова Г.М., Бобриков И.А., Неов Д., Шевелев С.Г. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 5. С. 3–16.
- [7] Luborsky F. Amorphous metallic alloys. London: Butterworths, 1983. 534 p.
- [8] Wilkinson W. Non-newtonian fluids. London: Pergamon Press, 1960. 216 p.