

01;05

## Корреляция характеристик макролокализованной пластической деформации и параметров электронной структуры металлов

© Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, Н.А. Плосков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: lbz@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2017 г.

Рассмотрена корреляция между решеточными характеристиками деформируемой среды и параметрами автоволн локализованного пластического течения в металлах на стадии линейного деформационного упрочнения. Такая корреляция свидетельствует в пользу существования тесной взаимосвязи между упругими и пластическими деформациями среды и в более общем смысле между характеристиками пластичности и электронным строением элементов.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46330.17088

Экспериментальные исследования развития пластического течения [1–5] показали, что оно протекает локализованным образом на всем протяжении деформационного процесса. На каждой стадии деформационного упрочнения специфическая картина локализации — паттерн локализованного пластического течения — приобретает форму, которая определяется действующим на этой стадии законом упрочнения. Каждому наблюдаемому паттерну отвечает определенная автоволновая мода локализованной пластической деформации. Возникающие во всех исследованных материалах на стадии линейного деформационного упрочнения, когда напряжение течения пропорционально деформации ( $\sigma \sim \varepsilon$ ), фазовые автоволны характеризуются длиной  $\lambda \approx 10^{-2}$  м и скоростью распространения  $10^{-5} \leq V_{aw} \leq 10^{-4}$  м · с<sup>-1</sup> [1–3]. Произведение этих величин  $\lambda V_{aw}$ , имеющее размерность коэффициента переноса (коэффициента диффузии или кинематической вязкости) — м<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>, естественным образом количественно характеризует про-

Исследованные металлы

| Период | Металлы                  |          |          |          |          |          |          |          |
|--------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        | Элемент<br>Атомный номер | Ti<br>22 | V<br>23  | Fe<br>26 | Co<br>27 | Ni<br>28 | Cu<br>29 | Zn<br>30 |
| 4      | Элемент<br>Атомный номер | Zr<br>40 | Nb<br>41 | Mo<br>42 | Cd<br>48 | In<br>49 | Sn<br>50 |          |
| 5      | Элемент<br>Атомный номер | Hf<br>72 | Ta<br>73 | Pb<br>82 |          |          |          |          |
| 6      | Элемент<br>Атомный номер |          |          |          |          |          |          |          |

цесс распространения автоволн локализованной пластической деформации [2,3].

Экспериментальные исследования локализованного пластического течения были проведены на разных металлах, относящихся к периодам 4–6 Периодической системы элементов Менделеева (см. таблицу). Характеризующие процесс локализованной пластической деформации величины — длина и скорость распространения фазовой автоволны — измерялись с помощью методики, описанной в [1]. Анализ массива данных, полученных для стадий линейного деформационного упрочнения, позволил установить, что по мере роста номера элемента в пределах  $22 \leq Z \leq 82$  зависимость  $(\lambda V_{aw})^{-1}$  от атомного номера элемента  $Z$  осциллирует относительно среднего значения. Выяснилось, что эти осцилляции коррелируют с закономерностями поведения при росте  $Z$  ряда независимо определенных решеточных характеристик, таких, например, как характеристическая температура Дебая  $\Theta_D \approx \hbar\omega_D/k_B$  ( $\hbar = h/2\pi$  — постоянная Планка,  $\omega_D$  — дебаевская частота,  $k_B$  — постоянная Больцмана) [6], плотность, температура плавления, упругие модули, потенциал ионизации и некоторые другие [7]. В качестве примера корреляция обсуждаемых зависимостей проиллюстрирована показанным на рис. 1 синфазным поведением величин  $(\lambda V_{aw})^{-1}$  и  $\Theta_D$  как функций атомного номера исследованных элементов.

Кроме того, анализируя поведение произведения  $\lambda V_{aw}$  в пределах каждого периода системы элементов Менделеева, удалось установить, что величина  $(\lambda V_{aw})^{-1}$  линейно растёт с числом электронов проводимости, приходящихся на элементарную ячейку металла  $n$ [8], так что в

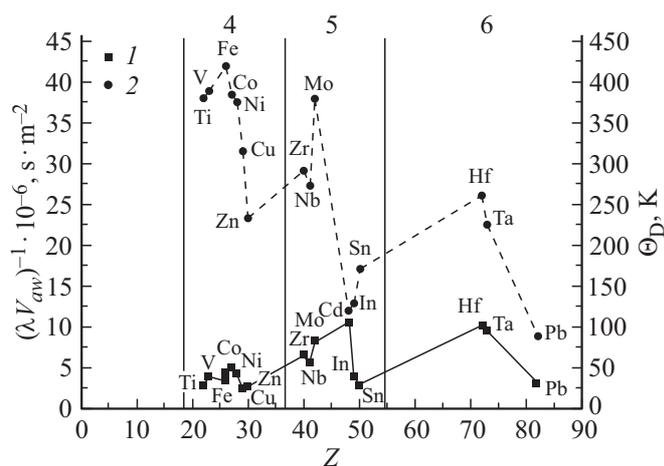


Рис. 1. Зависимости величины  $(\lambda V_{ав})^{-1}$  (1) и температуры Дебая  $\Theta_D$  (2) от атомного номера элементов  $Z$ . 4, 5 и 6 — номера периодов.

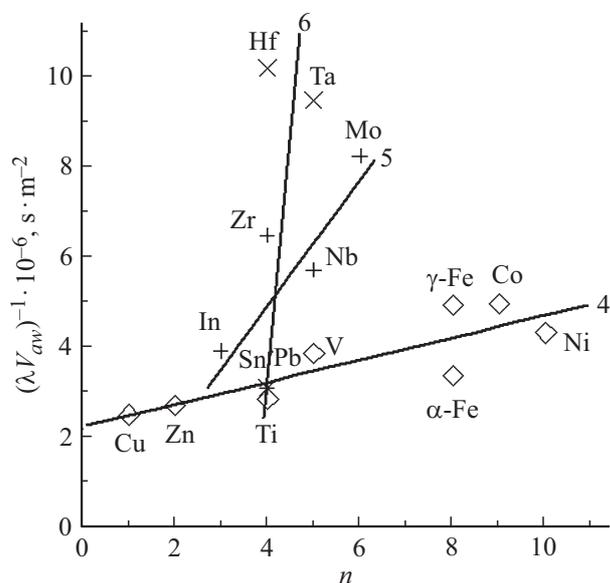
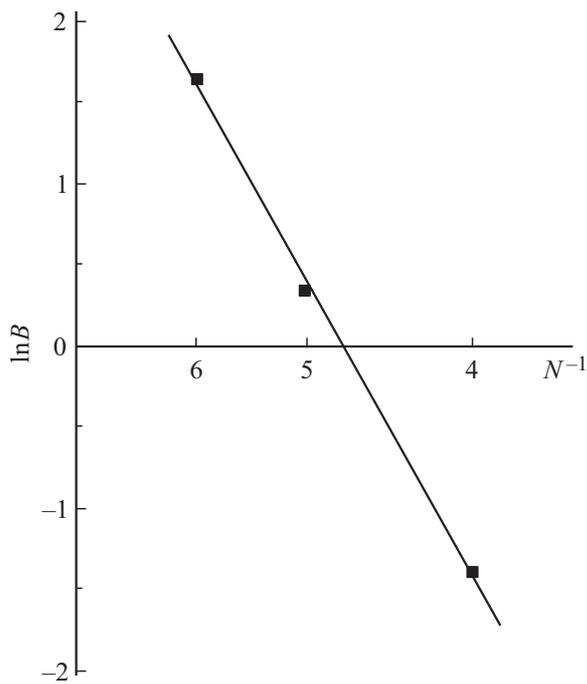


Рис. 2. Зависимости величины  $(\lambda V_{ав})^{-1}$  от числа электронов проводимости на элементарную ячейку  $n$ . 4, 5 и 6 — номера периодов.



**Рис. 3.** Зависимость (2) в координатах  $\ln B - N^{-1}$ .

каждом периоде выполняется соотношение

$$(\lambda V_{aw})^{-1} = A + Bn, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  — константы, различные для периодов 4, 5 и 6. Установленные для названных периодов зависимости показаны на рис. 2.

На существование линейного соотношения типа (1) ранее уже указывалось [9], но разделение по периодам системы элементов ранее не отмечалось. Обработка экспериментальных данных для элементов периодов 4–6 показала, что, как это следует из рис. 3,

$$B \sim \exp(\beta/N). \quad (2)$$

В соотношении (2)  $N = 4, 5, 6$  — номер периода в системе элементов Менделеева, который, как известно [10], совпадает с числом

электронных оболочек входящих в него атомов, а  $\beta$  — константа. Коэффициент корреляции величин, представленных на рис. 3, составляет  $\sim -1$ , что указывает на существование функциональной связи между ними [11].

Полученные данные свидетельствуют о том, что при деформации твердого тела параметры локализации пластического течения на стадии линейного деформационного упрочнения тесно связаны с характеристиками электронной структуры металлов. Эта связь проявляется как зависимость макроскопических характеристик распространения автоволны локализованной пластичности на стадии линейного деформационного упрочнения от номера периода в системе элементов Менделеева. Кроме того, эти характеристики зависят от числа валентных электронов, которое для большинства металлов, кроме переходных, совпадает с номером группы в Периодической системе. Полученные данные прямо указывают на то, что природа вклада электронного газа в торможение дислокаций является более сложной, чем это предусматривается имеющимися теориями [12] этого эффекта.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

## Список литературы

- [1] Зувев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
- [2] Zuev L.B. // Ann. Phys. 2007. V. 16. N 4. P. 286–310.
- [3] Zuev L.B. // Phys. Wave Phenom. 2012. V. 20. N 3. P. 166–173.
- [4] Asharia A., Beaudoin A., Miller R. // Math. Mech. Solids. 2008. V. 13. N 2. P. 292–315.
- [5] Roth A., Lebedkina T.A., Lebyodkin M.A. // Mater. Sci. Eng. A. 2012. V. 539. N 1. P. 280–284.
- [6] Newnham R.E. Properties of materials. Oxford: University Press, 2005. 378 p.
- [7] Григорович В.К. // Металловедение и термическая обработка. Справочник. Т. 1 / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургиздат, 1961. С. 387–436.
- [8] Крэкнелл А., Уонг Н. Поверхность Ферми. М.: Атомиздат, 1978. 350 с.
- [9] Zuev L.B. // Int. J. Solids Struct. 2005. V. 42. N 11. P. 943–949.
- [10] Шпольский Э.В. Атомная физика. Т. 1. М.: Наука, 1974. 571 с.
- [11] Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967. 242 с.
- [12] Судзуки Т., Ёсинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989. 294 с.