**Лавинные явления в пластичности кристаллов: акустическая эмиссия при макроскопически устойчивой и неустойчивой пластической деформации**

М.А. Лебёдкин (M. Lebyodkin / M. Lebedkin)

**Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3),**

**Centre national de la recherche scientifique (CNRS) [Национальный центр научных исследований Франции (НЦНИ)] – Université de Lorraine – Arts et Métiers ParisTech**

Доклад посвящен некоторым аспектам коллективных эффектов при пластической деформации, т.е., проявлений самоорганизации в нелинейной системе взаимодействующих кристаллических дефектов. К примерам таких явлений относятся лавинообразное движение дислокаций, возникновение статичных или подвижных неоднородных полей локальных деформаций, детерминированный хаос и т. д. Очевидно, что их изучение необходимо для понимания перехода от микроскопического движения дефектов к макроскопическому механическому поведению материалов. Лавинобразная природа динамики дислокаций – одна из широко обсуждаемых особенностей пластического течения. Ее характерный признак – прерывистый (intermittent) характер и степенная, т.е. масштабно-инвариантная, статистика измеряемого отклика. Такое поведение было сначала найдено для различных механизмов макроскопической пластической неустойчивости, приводящих к скачкообразным кривым деформации. Увеличение разрешения измерений, в особенности применение метода акустической эмиссии (АЭ), продемонстрировало, что лавинообразное поведение внутренне присуще пластической деформации на соответствующих микроскопических масштабах. Позднее этот вывод был подтвержден прямыми исследованиями кривых деформации микроскопических образцов.

Насмотря на вышесказанное, коллективное поведение обычно не проявляется на макроскопическом масштабе кривых деформации, имеющих гладкий характер для объемных образцов большинства материалов. Скачкообразное пластическое течение занимает особое место, поскольку в этом случае коллективные эффекты настолько сильны, что вызывают макроскопические скачки деформации и приложенного напряжения. Более того, в отличие от АЭ, такие события могут подчиняться различным статистическим законам распределений. Поэтому исследования АЭ с обсуждаемой точки зрения первоначально обходили стороной случаи макроскопической неустойчивости. Однако исследования в условиях эффекта Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) в сплавах показали, что АЭ подчиняется степенной статистике и при скачкообразной деформации, включая и те условия, когда статистика скачков напряжения имеет качественно другую природу. Разнообразное поведение на разных масштабах и возможная природа масштабных переходов является предметом доклада.

В докладе будет дан краткий обзор различных проявлений самоорганизации в пластической деформации. Основной акцент в последующем изложении результатов будет сделан на данных статистического, а также мультифрактального анализа как АЭ, так и скачкообразных кривых деформации в условиях эффекта ПЛШ в модельных сплавах AlMg. В частности, такое сопоставление проливает свет на развитие макроскопических скачков нагрузки. Будут также представлены некоторые ранее не известные направления исследований. Например, неожиданный тип поведения – синий шум – наблюдался при анализе эволюции локальных скоростей пластической деформации в высокоэнтропийном сплаве на основе Al, измеренных с помошью метода корреляции цифровых изображений.

**Информация об авторе**

Михаил Александрович Лебёдкин, кфмн - 1989, дфмн – 2002.

1983 – окончил МФТИ

1983-2005 – Институт Физики Твердого Тела, РАН, Черноголовка

2006-н.в. – Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, CNRS, France

Ниже приведены примеры публикаций по теме доклада. Собственно работы по акустической эмиссии затронуты в статьях 4–8 и обзорах 11 и 12. В 1-й статье изучали статистику электрических импульсов при скачкообразной деформации; 2-я и 3-я статьи посвящены анализу макроскопических событий – скачков нагрузки при неустойчивости пластического течения, связанной с эффектом Портевена-Ле Шателье; статьи 9 и 10 содержат некоторые результаты, полученные с помощью оптических методов измерения эволюции скорости локальной деформации.

1. В.С. Бобров, С.И. Зайцев, М.А. Лебедкин, Статистика динамических процессов при низкотемпературной скачкообразной деформации металлов, ФТТ 32 (1990) 3060.

2. M.A. Lebyodkin, Y. Brechet, Y. Estrin and L.P. Kubin, Statistics of the catastrophic slip events in the Portevin-Le Chatelier effect, Phys.Rev.Lett., 74 (1995) 4758.

3. M.S. Bharathi, M. Lebyodkin, G. Ananthakrishna, C. Fressengeas, L.P. Kubin, Multifractal burst in the spatiotemporal dynamics of jerky flow, Phys. Rev. Lett., 87(16), 165508 (2001).

4. M. A. Lebyodkin, N. P. Kobelev, Y. Bougherira, D. Entemeyer, C. Fressengeas, T A Lebedkina, I.V. Shashkov, On the similarity of plastic flow processes during smooth and jerky flow in dilute alloys, Acta Mater. 60 (2012) 844.

5. M. A. Lebyodkin, N. P. Kobelev, Y. Bougherira, D. Entemeyer, C. Fressengeas, V.S. Gornakov, T. A Lebedkina, I.V. Shashkov, On the similarity of plastic flow processes during smooth and jerky flow in dilute alloys: statistical analysis, Acta Mater. 60 (2012) 3729.

6. M.A. Lebyodkin, I.V. Shashkov, T.A. Lebedkina, K. Mathis, P. Dobron,F. Chmelik, Role of superposition of dislocation avalanches on the statistics of acoustic emission during plastic deformation, Phys. Rev. E 88 (2013) 042402.

7. T.A. Lebedkina, D.A. Zhemchuzhnikova, M.A. Lebyodkin, Correlation versus randomization of jerky flow in an AlMgScZr alloy using acoustic emission, Phys. Rev. E 97 (2018) 013001.

8. T.A. Lebedkina, Y. Bougherira, D. Entemeyer, M.A. Lebyodkin, I.V. Shashkov, Crossover in the scale-free statistics of acoustic emission associated with the Portevin-Le Chatelier instability, Scripta Mater. 148 (2018) 47.

9. C. Fressengeas, A.J. Beaudoin, D. Entemeyer, T. Lebedkina, M. Lebyodkin, V. Taupin, Dislocation transport and intermittency in the plasticity of crystalline solids,Phys. Rev. B 79, 014108 (1-10) (2009).

10. J. Brechtl, R. Feng, P.K. Liaw, H. Jaber, T. Lebedkina, M. Lebyodkin, Mesoscopic-Scale Complexity in Macroscopically Uniform Plastic Flow of an Al0.3CoCrFeNi High-Entropy Alloy, Acta Mater. 242 (2023) 118445,

11. M.A. Lebyodkin, T.A. Lebedkina, J. Brechtl, P. Liaw, Serrated flow in alloy systems, In: High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications, Eds. J. Brechtl and P. Liaw, Springer Nature Switzerland AG, 2021, Chapter 11, pp. 523-644.

12. C. Fressengeas, T.A. Lebedkina, M.A. Lebyodkin, Complex patterning in jerky flow from time series analysis and numerical simulation, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 32 (2024) 035018.