

01,07

Спектральный и динамический анализ пластических неустойчивостей при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава

© А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Тамбов, Россия

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 5 ноября 2013 г.)

Методами спектрального и динамического анализа исследован силовой отклик на развитие макроскопического скачка пластической деформации в условиях прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМгб. Выявлена фликкер-шумовая структура силового отклика, свидетельствующая о состоянии самоорганизующейся критичности. Обнаружено, что в ходе развития макроскопического деформационного скачка спонтанно возникает кратковременное состояние флаттера пластических неустойчивостей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-08-33052).

1. Введение

В работе [1] было экспериментально установлено, что сплав АМгб при высоких напряжениях и комнатной температуре демонстрирует макроскопические (амплитудой несколько процентов) скачки пластической деформации на кривой ползучести. Установлено, что макроскопический скачок деформации возникает в результате спонтанного зарождения и развития сложной пространственно-временной структуры полос макролокализованной деформации, которые сопровождаются нелинейными колебаниями в силовом отклике $\sigma(t)$ механической системы машина–образец. В [1] показано, что временной ряд $\sigma(t)$ является отображением на одну степень свободы эволюции пространственно-временной структуры деформационных полос, распространяющихся в образце в ходе развития макроскопического скачка пластической деформации. Такое отображение дает возможность: а) непосредственно в ходе деформирования контролировать популяцию деформационных полос и типы деформационного поведения (А, В и С); б) использовать для обработки временного ряда $\sigma(t)$ методы статистического, спектрального и динамического анализа для исследования в деформационном поведении явлений самоорганизации, динамического хаоса, самоорганизующейся критичности и т.д. Цель настоящей работы состоит в изучении методами спектрального, фрактального и динамического анализа структуры силового отклика $\sigma(t)$ на развитие макроскопического скачка пластической деформации в условиях холодной (при комнатной температуре) ползучести сплава АМгб.

2. Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования был выбран типичный сигнал $\sigma(t)$ датчика усилия при зарождении и распространении пространственно-временной структуры деформационных полос в ходе развития макроскопиче-

ского деформационного скачка амплитудой $\Delta\varepsilon = 4\%$ в условиях прерывистой ползучести образца сплава АМгб с размером рабочей части $0.7 \times 3 \times 40$ mm по данным работы [1] (рис. 1). Было установлено, что временной ряд $\sigma(t)$ содержит ~ 100 скачков напряжения, отвечающих зарождению и расширению отдельных полос в распространяющейся структуре деформационных полос (см. рис. 4 в работе [1]), а распределение амплитуд скачков $\Delta\sigma$ подчиняется степенной зависимости с показателем степени 1.23.

Степенное распределение амплитуд лавин с показателем степени порядка единицы, как известно, характерно для землетрясений (закон Гуттенберга–Рихтера [2]) и является парадигмой (точнее, одним из признаков) состояния самоорганизующейся критичности (СОК). К другим признакам относится фликкер-шумовая структура сигнала и пространственно-временная фрактальность системы в состоянии СОК. Рассмотрим эти признаки СОК применительно к силовому отклику $\sigma(t)$. Согласно [3], спектр мощности сигнала $S_p(\nu)$ в состоянии СОК описывается степенной зависимостью $S_p(\nu) \sim \nu^{-\beta}$ от частоты ν с показателем степени β порядка единицы. На рис. 2 представлен спектр мощности $S_p(\nu)$ силового отклика $\sigma(t)$ в двойных логарифмических координатах.

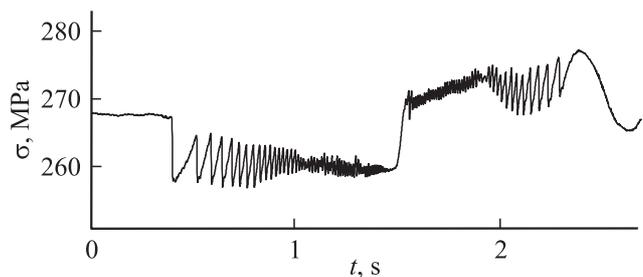


Рис. 1. Силовой отклик $\sigma(t)$ на развитие скачка деформации амплитудой 4% в условиях ползучести образца размером $0.7 \times 3 \times 40$ mm сплава АМгб.

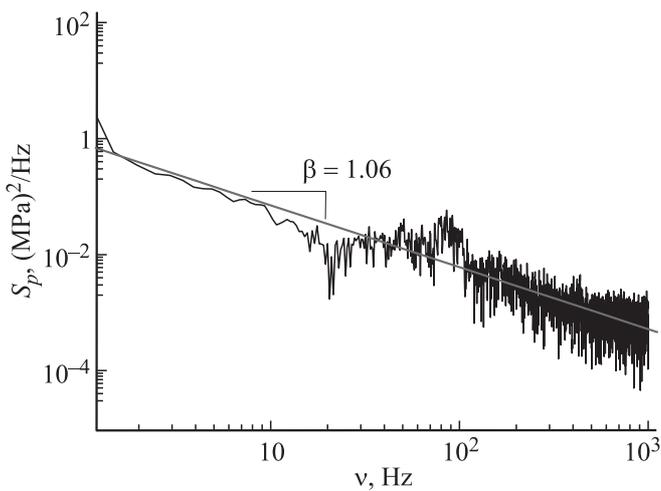


Рис. 2. Спектр мощности $S_p(v)$ силового отклика $\sigma(t)$, представленного на рис. 1.

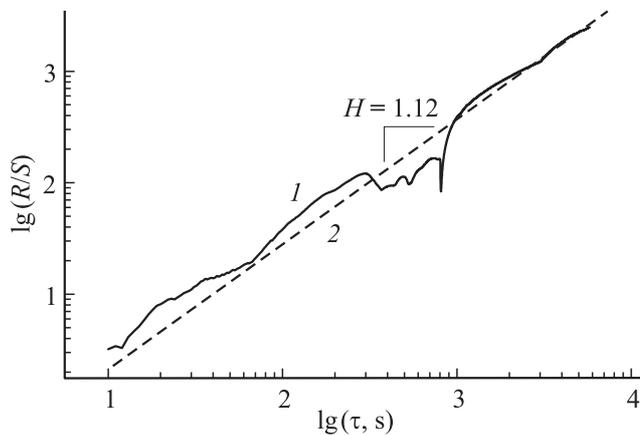


Рис. 3. Результаты R/S -анализа Хёрста. 1 — зависимость R/S от τ в двойных логарифмических координатах, 2 — линейная аппроксимация. $H = 1.12$ — показатель Хёрста.

Наилучшая линейная аппроксимация этой зависимости дает $\beta = 1.06$, что является признаком фликкер-шума и состояния СОК.

Другим признаком СОК является пространственно-временная монофрактальность системы. Фрактальную размерность временного ряда $\sigma(t)$ вычисляли с помощью R/S -анализа по методу Хёрста [4], используя выражение

$$R/S \sim \tau^H, \quad (1)$$

где $R(\tau) = \Delta\sigma_{\max} - \Delta\sigma_{\min}$ — размах временного ряда $\sigma(t)$ на интервале τ ; S — среднее квадратичное отклонение амплитуды скачка $\Delta\sigma$ на интервале τ ; H — показатель Хёрста. Согласно [4], фрактальная размерность временного ряда определяется как $d_t = 2 - H$.

На рис. 3 представлена зависимость нормированного размаха R/S от временного интервала τ в двойных логарифмических координатах. Линейная аппроксимация этой зависимости дает значение показателя Хёр-

ста $H = 1.12 \pm 0.185$. Силовой отклик, как видно, имеет почти монофрактальный характер со скейлингом около трех порядков. Отметим, что для случайного процесса $\beta = 0$ (белый шум) и $H = 0.5$, а $\beta \approx 1$ соответствует фликкер-шумовой структуре сигнала („коричневый“ шум [5]), свидетельствующей о наличии дальнедействующих корреляций в системе [4]. В то же время относительно высокое значение показателя Хёрста $H = 1.12$ характерно для персистентного поведения стохастического процесса. Персистентность означает, что если в течение некоторого интервала времени величина $\Delta\sigma$ увеличивалась, то можно ожидать ее увеличения в течение последующего интервала времени примерно такой же длительности. И наоборот, если значение $\Delta\sigma$ уменьшалось в течение промежутка времени t , следует ожидать ее уменьшения в течение последующего такого же интервала времени. Другими словами, персистентные стохастические процессы обнаруживают тенденцию к изменению при относительно малом шуме, что также свидетельствует о наличии долговременных корреляций в системе.

Таким образом, силовой отклик механической системы мягкая деформационная машина-образец на развитие макроскопического скачка деформации в условиях ползучести сплава АМг6 имеет характер фликкер-шума со степенной зависимостью от частоты спектра мощности с показателем степени $\beta \sim 1$ и относительно высоким показателем Хёрста $H \sim 1$, что свидетельствует о наличии дальних корреляций дислокационной динамики на макроуровне. Природа пространственной связи, обеспечивающей такую корреляцию, как экспериментально установлено в [1,6], связана с каскадным механизмом размножения деформационных полос, когда каждая полоса, за исключением первичной, зарождается на границе предшествующей полосы, обеспечивая эстафетную передачу скачкообразно распространяющейся макролокализованной деформации (дислокационной „лавины“) вдоль оси растяжения образца. Корреляционным полем являются локальные внутренние напряжения на фронте останавливающейся границы деформационной полосы, а также дальнедействующие напряжения изгиба, обусловленные тем фактом, что отдельные полосы в пространственно-временной структуре полос переносят механический заряд, т.е. имеют избыток дислокаций одного механического знака (источник дальнедействующих напряжений [6]).

Фликкер-шумовая структура и почти монофрактальность силового отклика являются его интегральными характеристиками. Рассмотрим теперь отдельные стадии развития деформационного скачка и пространственно-временной структуры деформационных полос, отмеченные деформационным поведением типа В и А. Для исследования корреляций и хаоса в силовом отклике будем использовать методы динамического анализа хаотических колебаний, основанные на построении и анализе фазовых портретов временных рядов [7].

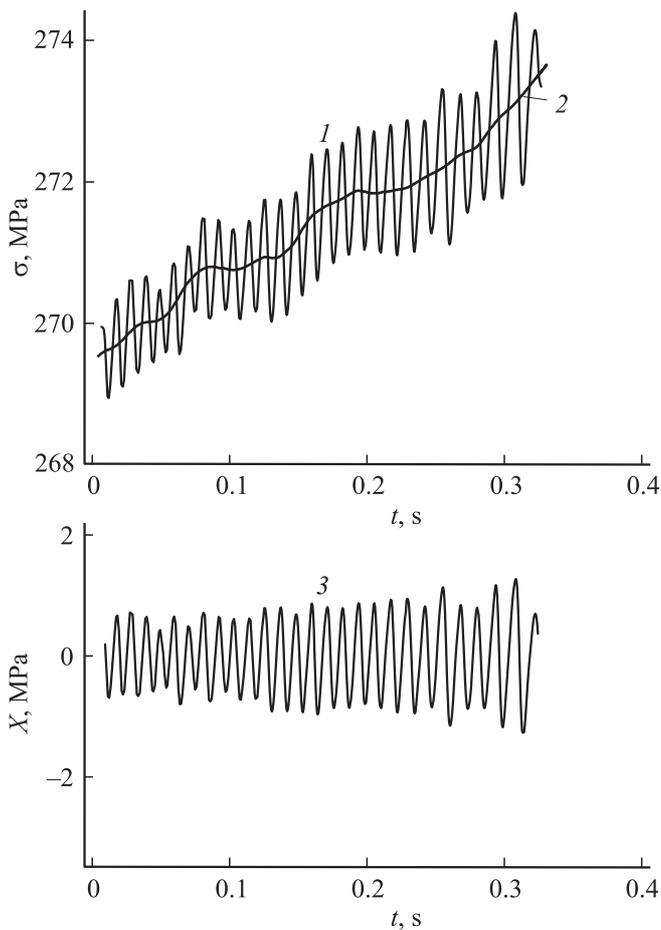


Рис. 4. Пример построения обобщенной координаты $X(t)$. 1 — фрагмент записи силового отклика $\sigma(t)$ на стадии распространения полосы типа A, 2 — монотонная составляющая сигнала $\bar{\sigma}(t)$, 3 — скачкообразная составляющая сигнала (обобщенная координата) $X(t) = \sigma(t) - \bar{\sigma}(t)$.

Для характеристики скачкообразной составляющей силового отклика удобно ввести новую обобщенную координату

$$X(t) = \sigma(t) - \bar{\sigma}(t), \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}(t)$ — монотонная (без скачков) составляющая силового отклика, которая строится путем вычитания средних значений вдоль кривой $\sigma(t)$. Другой путь получения монотонной составляющей состоит в вариационном нахождении $\bar{\sigma}(t)$ в виде полинома, минимизирующего среднее значение координаты X , т. е.

$$\bar{X} = \int_0^{t_{\text{fr}}} [\sigma(t) - \bar{\sigma}(t)] dt = 0, \quad (3)$$

где t_{fr} — длительности переднего фронта макроскопического скачка деформации. Монотонная составляющая $\bar{\sigma}(t)$ находилась в два этапа. На первом этапе кривая $\bar{\sigma}(t)$ строилась как геометрическое место точек середин скачков напряжения; на втором этапе она корректировалась

по формуле (3) с помощью численной минимизации. Пример построения временного ряда $X(t)$ на этапе FD (см. рис. 4 в [1]), соответствующего деформационному поведению типа A, представлен на рис. 4; на рис. 5 показана скачкообразная составляющая $X(t)$ силового отклика всего деформационного скачка, а на рис. 6 — фазовые портреты на плоскости $\dot{X}-X$ четырех стадий процесса, которые характеризуются, как установлено в [1], неустойчивостями типов $B-A-A-B$ соответственно.

Из рис. 5 и 6 видно, что на стадиях OM и DG , где наблюдается скачкообразное распространение „полос типа B“, а в силовом отклике — колебания релаксационного типа, фазовые портреты $\dot{X}-X$ характеризуются заполнением большого объема фазового пространства, наличием тонкой структуры почти параллельных незамкнутых траекторий, т. е. имеют признаки хаотического аттрактора со слабым затуханием, что свидетельствует о хаотических колебаниях напряжения на этих стадиях (рис. 6, a и d соответственно). Этот вывод подтверждается сравнительно широким спектром времени релаксации — от ~ 5 до 100 ms.

При переходе от деформационного поведения типа B к поведению типа A в окрестности точки M происходит резкое сжатие фазового объема с сохранением признаков хаотического аттрактора со слабым затуханием (рис. 6, b), но после точки перегиба зависимости $\Delta\varepsilon(t)$ (см. рис. 4 в [1]), когда скорость деформации образца достигает максимума, происходит дальнейшее сжатие фазового объема, и фазовый портрет на стадии $F'D'$ приобретает вид предельного цикла (рис. 6, c), а колебания напряжения происходят соответственно почти по гармоническому закону (на рис. 6, c исключен временной интервал FF' продолжительностью 40 ms, соответствующий стартовой стадии „обратной“ полосы типа A, а также интервал $D'D$ длительностью также около 40 ms, связанный с завершающей стадией эволюции этой полосы типа A и начальной стадией развития полосы типа B, т. е. с переходом $A-B$; рис. 5). В окрестности точки D (точнее, на интервале $D'D$) происходит переход от гармонических колебаний к релаксационным колебаниям с растущим временем релаксаций, фазовый объем, занимаемый колебаниями, резко возрастает, и фазовый портрет вновь становится хаотическим аттрактором со слабым затуханием (рис. 6, d).

Спонтанное возникновение предельного цикла из состояния, характеризуемого хаотическими колебаниями, в теории нелинейных колебаний называется бифуркацией Андронова–Хопфа [7,8], а в механике — флаттером [7]. Таким образом, в условиях ползучести в ходе развития макроскопического скачка деформации (деформационного „взрыва“) амплитудой несколько процентов спонтанно возникает и исчезает состояние флаттера в силовом отклике механической системы машина–образец, которое связано с почти гармоническими процессами зарождения и расширения деформационных полос в структуре макрополосы типа A.

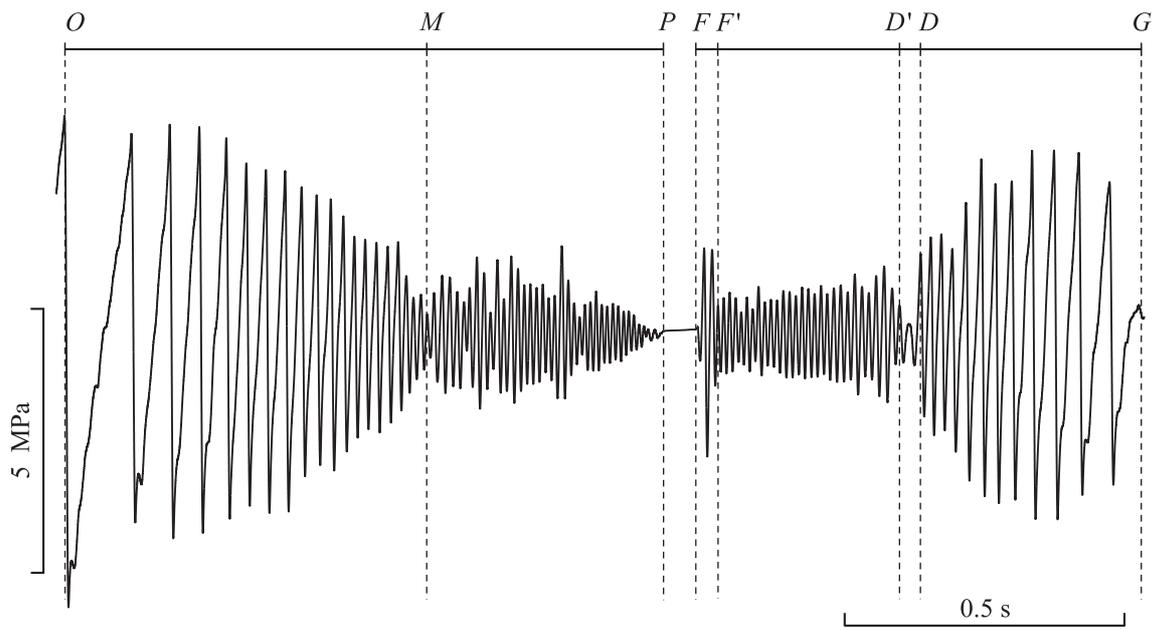


Рис. 5. Скачкообразная составляющая $X(t)$ силового отклика деформационного скачка, представленного на рис. 1. Вертикальными штриховыми линиями отмечены границы различных типов пластических неустойчивостей типов B и A .

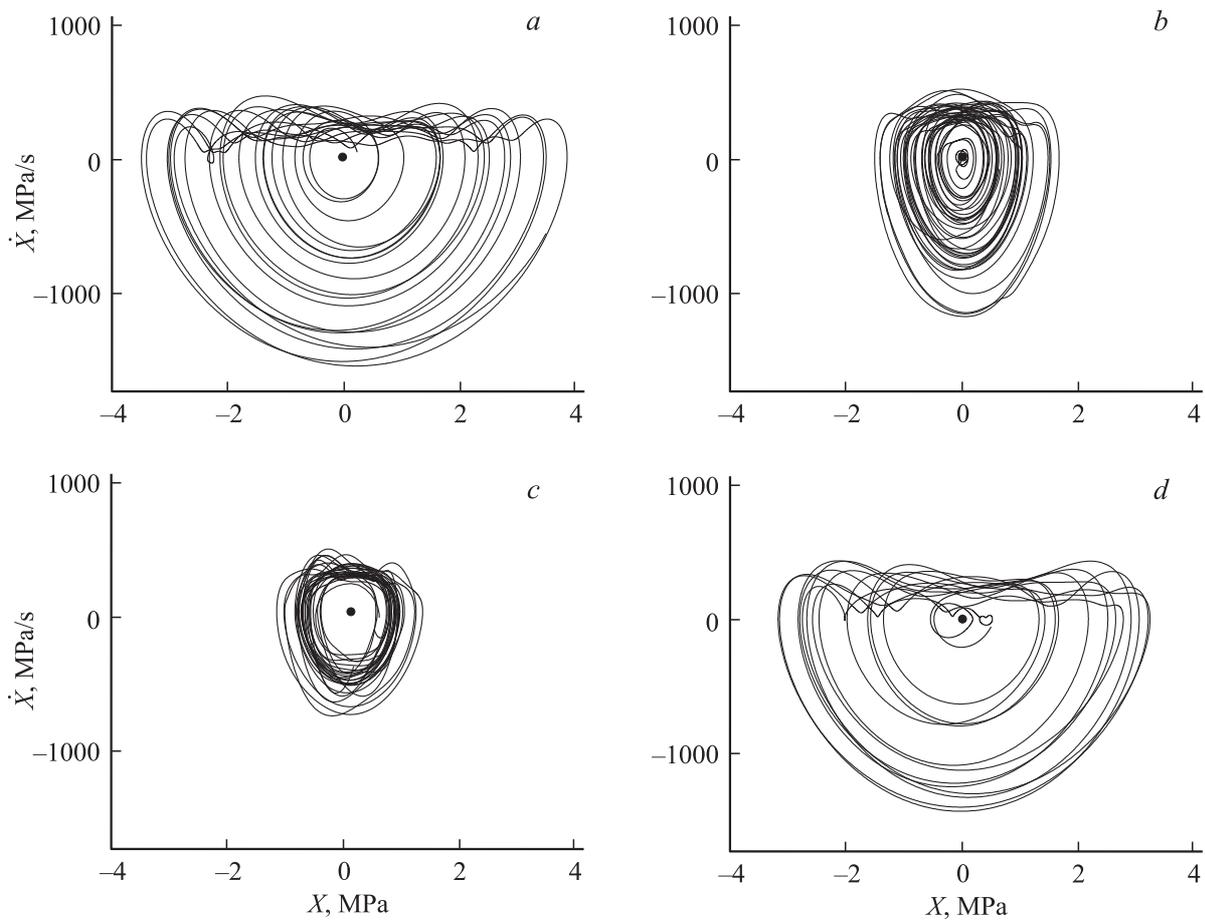


Рис. 6. Фазовые портреты $\dot{X}-X$, соответствующие различным стадиям деформационного скачка. $a - OM$, $b - MP$, $c - F'D'$, $d - D'G$. На стадии $F'D'$ возникает предельный цикл.

3. Заключение

Промышленный алюминий-магниевый сплав АМг6, широко используемый при производстве летательных аппаратов и автомобилей, демонстрирует макроскопическую прерывистую деформацию не только при активном деформировании (т.е. эффект Портевена–Ле Шателье), но и в условиях ползучести при комнатной температуре [1]. В настоящей работе на основе проведенного спектрального и динамического анализа силового отклика $\sigma(t)$ на развитие деформационного скачка при высоком напряжении ползучести $\sigma_0 \sim 0.8\sigma_B$ выявлено состояние самоорганизующейся критичности, что подтверждает выводы работы [1]. Состояние СОК выражается во фликкер-шумовой структуре сигнала $\sigma(t)$ и его почти монофрактальности. Кроме того, обнаружено спонтанное кратковременное возникновение флаттера пластических неустойчивостей. Условия возникновения „пластического“ флаттера при ползучести и степень его опасности для развития “катастрофы” — макроскопического разрушения материала — являются предметом дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов, М.Ф. Гасанов. ФТТ **56**, 848 (2014).
- [2] В. Gutenberg, С.F. Richter. Ann. di Geophysica. **9**, 1 (1956).
- [3] P. Bak, С. Tang, K. Wiessenfeld. Phys. Rev. A **38**, 364 (1988).
- [4] Е. Федер. Фракталы. Мир, М. (1991). 254 с.
- [5] М. Шредер. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, Ижевск. (2001). 528 с.
- [6] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. Письма в ЖЭТФ **90**, 412 (2009).
- [7] Ф. Мун. Хаотические колебания. Мир, М. (1990). 312 с.
- [8] А. Андронов, А. Витт, С. Хайкин. Теория колебаний. Наука, М. (1981). 918 с.