

Непригодность пластической деформации алюминиевого сплава, изготовленного по аддитивной технологии

П.В. Исхакова^{}, М.В. Надежкин, С.А. Баранникова*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

**iskhakova@ispms.ru*

Аннотация. Проведено исследование неоднородности пластического течения в виде полос Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) методом корреляции цифровых спекл-изображений при одноосном растяжении плоских образцов алюминиевого сплава АМг5, изготовленного по аддитивной электронно-лучевой проволочной технологии. Показано, что картины локализации деформации представляют собой непрерывное движение полос локализации А-типа на стадии линейного деформационного упрочнения и формирующиеся случайным образом по длине образца полосы локализации С-типа на стадиях параболического деформационного упрочнения и предразрушения. Установлен экспоненциальный характер изменения скорости полос ПЛШ с ростом общей деформации.

Ключевые слова: аддитивные технологии, деформационное упрочнение, алюминиевый сплав, локализация деформации, прерывистая текучесть, автоволны.

1. Введение

Явление прерывистой текучести – эффекта Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) в виде проявления неустойчивого пластического деформирования обнаруживается в ряде материалов [1–4]. Проблема исследований прерывистой текучести представляет интерес как для практического применения вследствие ухудшения механических свойств изделий и обрабатываемой поверхности за счет образования полос деформации, так и для углубления представлений о нелинейных эффектах в макрокинетике пластически деформируемого материала, обусловленных пространственно-временной самоорганизацией дислокационных ансамблей. Обычно различают три основных типа полос ПЛШ (типы А, В, С), каждый из которых соответствует вполне определенной форме и последовательности скачков напряжения на кривых нагружения. В [5–9] на примере поликристаллического алюминомо-магниевый сплава предложена классификация полос ПЛШ. В зависимости от характера взаимодействия с другими полосами и поверхностью образца выделяют следующие типы полос: первичные, растущие поперек фронтальной поверхности в направлении максимальных касательных напряжений; вторичные, растущие по границе предыдущей полосы; вторичные сопряженные, пересекающие предшествующие полосы под углом около 60°, и дугообразные, растущие в области лопаток. Установлено, что все типы зародышевых полос ПЛШ демонстрируют нелинейную динамику [5–9].

Закономерности формирования автоволн локализованного пластического течения в металлах при деформации Людерса и Портевена-Ле Шателье с учетом различия микроскопических механизмов пластического течения для этих явлений рассмотрены в [1]. Установлено, что особенности пластической деформации, характерные для них, определяются различием свойств активных сред, формирующихся в исследованных материалах при пластической деформации. Исследованы условия генерации автоволн переключения при деформации Людерса и автоволны возбуждения при деформации Портевена-Ле Шателье.

Основной проблемой при изготовлении изделий из алюминиевых сплавов методами аддитивного производства является получение бездефектной структуры и механической прочности сопоставимой с прочностью материала, изготовленного литьем, горячим прокатом и другими традиционными технологиями [10–15]. В связи с этим важной задачей является подбор оптимальных режимов 3D-печати с целью получения более высоких

эксплуатационных характеристик. Целью данной работы является исследование неоднородности пластического течения алюминиевого сплава АМг5, изготовленного по электронно-лучевой проволочной технологии [12, 15].

2. Материалы и методики

Механические испытания на одноосное растяжение на испытательной машине Walter+Bai AG серии LFM-125 со скоростью нагружения 0.2 мм/мин при комнатной температуре проводились на образцах сплава АМг5 в форме двусторонней лопатки. Размеры рабочей части образцов, изготовленных из аддитивного сплава в продольном направлении к печати, составляли $10 \times 1.3 \times 40$ мм³. Алюминиевый слиток АМг5 по электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии (ЭЛАП) был получен на лабораторной электронно-лучевой аддитивной установке [12, 14, 15]. Наплавка осуществлялась сварочной проволокой толщиной 1.2 мм. Ускоряющее напряжение электронного пучка составляло 30 кВ, ток пучка постепенно снижался по мере увеличения количества нанесенных слоев и варьировался в диапазоне 16–26 мА. Габаритные размеры выращенных таким образом слитков достигали $100 \times 70 \times 40$ мм³. Структура аддитивного Al-Mg сплава при данных режимах представляла собой сферические зерна и зерна вытянутой формы с размерами 50–150 мкм [12, 15].

Механические испытания дополнялись цифровыми вариантами анализа полей деформаций методом спекл-фотографии, которые позволяют *in situ* наблюдать фронты локализованной пластичности и получать количественную информацию о распределении компонент тензора пластической дисторсии по деформируемому образцу и их временной эволюции. Для создания спекл структуры образец освещался когерентным светом полупроводникового лазера с длиной волны 635 нм и мощностью 15 мВт. Полученные при таком освещении изображения деформируемого образца регистрировались цифровой видеокамерой PointGray FL3-GE-50S с периодичностью съемки кадров 5 Гц, оцифровывались и сохранялись в файл. Для анализа результатов использовались хронограммы распространения фронтов Портевена-Ле Шателье $X-t$ (зависимости положения центральной точки деформационного фронта X от времени t). Они содержат количественную информацию о величинах скоростей фронтов и режимах их движения. Реализация эксперимента осуществлялась с помощью разработанного в ИФПМ СО РАН измерительного комплекса ALMEC-*tv*, работающего в режимах реального времени, имеющего следующие технические характеристики: разрешение по деформациям 10^{-4} , частота регистрации 50 Гц, размер поля зрения 200×200 мм [16, 17].

3. Результаты и обсуждение

На кривых “напряжение σ – деформация ε ”, начиная с предела текучести, наблюдаются пилообразные участки падений напряжений, обусловленные проявлением эффекта прерывистой текучести. Величина скачков напряжений $\Delta\sigma$ постепенно увеличивается от 0.3 МПа до 4.5 МПа. Термическая обработка приводит к повышению предела прочности на 20 МПа и увеличению относительного удлинения до разрыва на 5%.

Анализ стадийности кривых $\sigma(\varepsilon)$ с использованием уравнения Людвиг-Холломона показал как в исходном состоянии, так и после термической обработки наличие линейной и параболической стадий деформационного упрочнения (Таблица 1).

Для аддитивного сплава АМг5 на стадии линейного деформационного упрочнения наблюдается непрерывное по длине образца движение полос ПЛШ А-типа (Рис. 1а), а при переходе к стадии параболического деформационного упрочнения – характер движения полос ПЛШ меняется на С-тип, который соответствует случайному зарождению полос ПШЛ с длиной пробега 3–20 мм (Рис. 1б). Скорости движения полос А-типа находятся в пределах

$V = 2.1\text{--}1.4$ мм/с. При достижении общей деформации 12% для полос С-тип а наблюдается V-образная траектория движения полос ПЛШ (Рис. 1б). Ранее подобный характер движения полос ПЛШ наблюдался в технически чистом никеле НП2 [18].

Таблица. 1. Стадийность аддитивно изготовленного сплава АМг5.

Стадии деформационного упрочнения	Продолжительность стадии, %	
	исходное состояние	после отжига
Линейная ($n = 1$)	1.3–4.2	1.6–4.4
Параболическая ($n = 0.5$)	4.2–20	4.4–20.2
Предразрушения ($n < 0.5$)	–	20.2–23.5

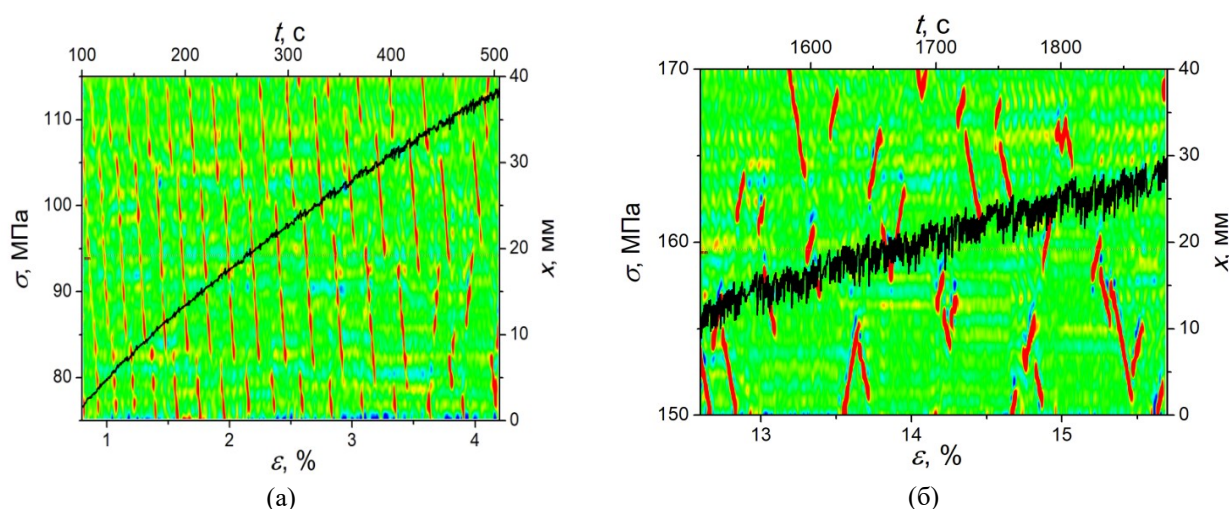


Рис. 1. Участок диаграммы растяжения $\sigma(\varepsilon)$ аддитивного сплава АМг5 в исходном состоянии, совмещенный с хронограммой X-t движения полос ПЛШ, на стадии линейного деформационного упрочнения (а) и стадии параболического деформационного упрочнения (б).

После термической обработки переход к случайному формированию полос С-типа происходит на стадии линейного деформационного упрочнения и сохраняется вплоть до шейки разрушения. На стадии линейного деформационного упрочнения скорости движения полос ПЛШ $V = 1.7\text{--}3.1$ мм/с, а в дальнейшем при переходе к параболической стадии деформационного упрочнения постепенно снижаются до значений 0.6 мм/с и на стадии предразрушения $V = 0.5\text{--}0.6$ мм/с.

Зависимость скорости распространения полос ПЛШ от общей деформации для аддитивно изготовленного сплава имеет экспоненциальный характер:

$$V = A \cdot \varepsilon^{(-\varepsilon/x)} + B, \quad (1)$$

где значения констант уравнения для исходного материала (кривая 1 на Рис. 2) $A = 1.9$ мм/с, $B = 0.6$ мм/с, $x = 5.1$, а для материала после термической обработки (кривая 2 на Рис. 2) $A = 3.6$ мм/с, $B = 0.6$ мм/с, $x = 2.8$.

В результате исследований было установлено, что в исследуемом алюминиевом сплаве АМг5, изготовленным по аддитивной технологии, реализуются режимы нестабильности пластической деформации автоколебательного типа [1, 16, 18] в условиях прерывистой текучести, обусловленной эффектом Портевена-Ле Шателье. Наблюдаемые автоволновые моды локализованной пластичности качественно совпадают с модами, наблюдаемыми на соответствующих стадиях процесса при деформационном упрочнении Al-Mg сплавов,

отличаясь от них только количественными характеристиками, и соответствуют различным А-, В- и С-типам движения полос ПЛШ, скорости которых уменьшаются с ростом деформирующих напряжений.

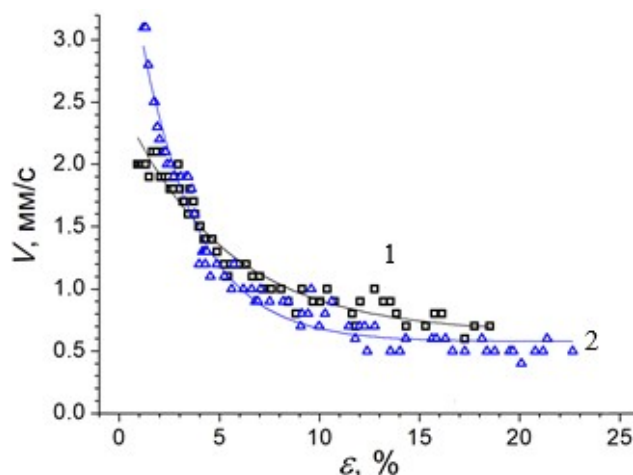


Рис.2. Зависимость скорости движения очага локализации пластической деформации от общей деформации для аддитивно изготовленного сплава АМг5: 1 – в исходном состоянии, 2 – после отжига.

3. Заключение

При растяжении образцов алюминиевого сплава АМг5, изготовленного аддитивным методом, наблюдается явление прерывистой текучести (эффект Портевена-Ле Шателье), при котором происходит зарождение и движение фронтов локализованной пластичности. Методом корреляции цифровых спекл-изображений проанализирована эволюция полос ПЛШ в процессе нагружения, начиная от предела текучести и вплоть до момента разрушения. На стадии линейного деформационного упрочнения наблюдается движение полос ПЛШ А-типа, при переходе к параболической стадии тап движения сменяется на С. После термической обработки в аддитивном сплаве переход к случайному формированию полос С-типа происходит на стадии линейного деформационного упрочнения и сохраняется вплоть до шейки разрушения. Скорости распространения полос ПЛШ в образцах, изготовленных по аддитивной технологии, уменьшаются с ростом деформации.

Благодарность

Авторы благодарны сотрудникам Лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях ИФПМ СО РАН за помощь в изготовлении материала исследований.

4. Список литературы

- [1] V.I. Danilov, et al., Autowave Description of the Lüders and Portevin–Le Chatelier Phenomena, *Russ. Phys. J.*, vol. **65**, no. 8, 1411, 2022; doi: 10.1007/s11182-023-02784-9
- [2] M. Lebyodkin, et al., Scaling in the Local Strain-Rate Field during Jerky Flow in an Al-3%Mg Alloy, *Metals. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. **10**, no. 1, 134, 2020; doi: 10.3390/met10010134
- [3] L.P. Kubin, K. Chihab, Y. Estrin, The rate dependence of the portevin-Le chatelier effect, *Acta Metallurgica*, vol. **36**, no. 10, 2707, 1988; doi: 10.1016/0001-6160(88)90117-4
- [4] P. Rodriguez, Serrated plastic flow, *Bull. Mater. Sci.*, vol. **6**(4), 653, 1984; doi: 10.1007/BF02743993

- [5] A.A. Shibkov, et al., Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal, *International Journal of Plasticity*, vol. **86**, 37, 2016; doi: 10.1016/j.ijplas.2016.07.014
- [6] M.A. Lebyodkin, et al., Kinematics of formation and cessation of type B deformation bands during the Portevin-Le Chatelier effect in an AlMg alloy, *Results in Physics*, vol. **12**, 867, 2019; doi: 10.1016/j.rinp.2018.12.067
- [7] D.A. Zhemchuzhnikova, et al., Unusual behavior of the Portevin–Le Chatelier effect in an AlMg alloy containing precipitates, *Materials Science and Engineering: A*, vol. **639**, 37, 2015; doi: 10.1016/j.msea.2015.04.094
- [8] H. Ait-Amokhtar, P. Vacher, S. Boudrahem, Kinematics fields and spatial activity of Portevin–Le Chatelier bands using the digital image correlation method, *Acta Materialia*, vol. **54**, no. 16, 4365, 2006; doi: 10.1016/j.actamat.2006.05.028
- [9] M.P. Tretyakov, T.V. Tretyakova, V.E. Wildemann, Influence of the loading system stiffness on the jerky flow in Al-Mg alloy at inelastic and postcritical deformation stages, *Procedia Structural Integrity*, vol. **33**, 1089, 2021; doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.121
- [10] V.M. Fomin, et al., Creation of functionally gradient material by the selective laser melting method, *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, vol. **61**(5), 878, 2020; doi: 10.1134/S0021894420050235
- [11] T. DebRoy, et al., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, vol. **92**, 112, 2018; doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
- [12] V.R. Utyaganova, et al., Controlling the porosity using exponential decay heat input regimes during electron beam wire-feed additive manufacturing of Al-Mg alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. **108**, no. 9, 2823, 2020; doi: 10.1007/s00170-020-05539-9
- [13] J.H. Martin, et al., 3D printing of high-strength aluminium alloys: 7672, *Nature. Nature Publishing Group*, vol. **549**, no. 7672, 365, 2017; doi: 10.1038/nature23894
- [14] E.A. Kolubaev, et al., Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing, *Phys. Mesomech.*, vol. **25**, no. 6, 479, 2022; doi: 10.1134/S1029959922060017
- [15] V. Utyaganova, et al., Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample, *Materials Characterization*, vol. **172**, 110867, 2021; doi: 10.1016/j.matchar.2020.110867
- [16] L.B. Zuev, S.A. Barannikova, Autowave Physics of Material Plasticity, *Crystals*, vol. **9**, no. 9, 458, 2019; doi: 10.3390/cryst9090458
- [17] L.B. Zuev, V.V. Gorbatenko, K.V. Pavlichev, Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses, *Measurement Science and Technology*, vol. **21**, no. 5, 054014, 2010; doi: 10.1088/0957-0233/21/5/054014
- [18] M.V. Nadezhkin, S.A. Barannikova, Loading Velocity and Kinetics of Localized Bands of Nickel Plastic Deformation, *Russ. Phys. J.*, vol. **64**(8), 1422, 2021; doi: 10.1007/s11182-021-02474-4