

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ

С.А. Баранникова, С.В. Колосов, Исхакова П.В.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

В настоящее время проблема выяснения причин макроскопической неоднородности пластической деформации становится все более актуальной. Выполнены как экспериментальные, так и теоретические исследования, в которых изучается формирование пространственно-неоднородных структур за счет самоорганизации структурных дефектов [1]. Установлено, что возникающие при пластическом деформировании паттерны макроскопической локализации количественно зависят от структуры и типа кристаллической решетки исследуемого материала, а их вид полностью определяется действующими на данной стадии законами деформационного упрочнения [2]. Исследования, проведенные ранее [3] в сплавах Fe, показали зависимость механических свойств и параметров автоволн локализации пластической деформации от температуры на линейной стадии деформационного упрочнения. Настоящая работа посвящена исследованию параметров макроскопической локализации пластической деформации, возникающей на стадии параболического деформационного упрочнения алюминиевого сплава марки А5М в широком интервале температур ниже и выше комнатной.

Материалы и методы. Образцы с размерами рабочей части $40 \times 5 \times 2$ мм испытывали со скоростью ($\dot{\epsilon} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) на испытательной машине Instron-1185. Визуализация и эволюция полос макроскопической локализованной пластической деформации на разных стадиях нагружения осуществлялась методом двухэкспозиционной спекл-фотографии (DESP) с интервалом 30 с при нахождении образцов в рабочей камере. Температуру в рабочей камере поддерживали постоянной в течение всего эксперимента с помощью непрерывной подачи паров подогреваемого азота из сосуда Дьюара (ниже комнатной), или при помощи плоского нагревательного элемента (выше комнатной) и измеряли с помощью термопары закрепленной на образце.

Обсуждение результатов

Для обработки и описания деформационных кривых использовали уравнение Людвига-Холломоны [4]:

$$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n \quad (1),$$

где σ_0 – предел текучести, k – коэффициент деформационного упрочнения, n – показатель деформационного упрочнения. Полученные деформационные кривые в координатах напряжение деформация перестраивали в истинные логарифмические координаты $\ln(s-s_0)-\ln(e)$. Параболическая часть деформационной кривой в этих координатах разбивается на ряд прямолинейных отрезков с тангенсом угла наклона, равным n . В этом случае на деформационной кривой можно наблюдать несколько отрезков с дискретно изменяющимся наклоном. Наличие нескольких участков указывает на то, что кривую деформации можно описать системой из нескольких уравнений вида (1) с соответствующими значениями параметров k и n .

Для анализа были взяты участки с одним и тем же показателем параболичности $n=0,5$ (рис. 1). Линейная стадия пластического течения с $n=1$ из уравнения (1) в исследуемом материале отсутствует. Деформационные кривые при всех температурах испытания в целом подобны. На рисунке 1 показан пример обработки деформационных кривых для температур испытаний: 173 К, 297 К, 350 К.

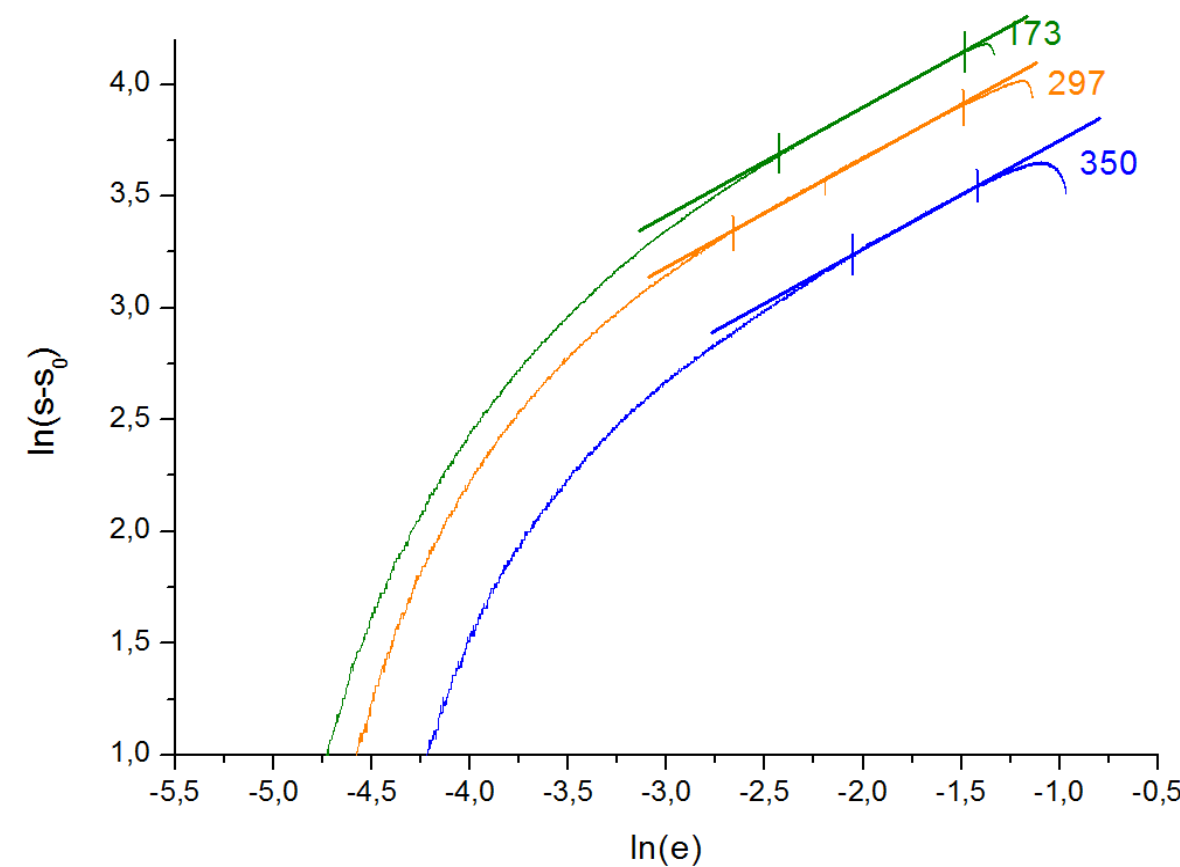


Рис. 1. Деформационные кривые в логарифмических координатах “истинное напряжение – истинная деформация” и участки параболического деформационного упрочнения с показателем параболичности $n=0,5$ (прямые линии).

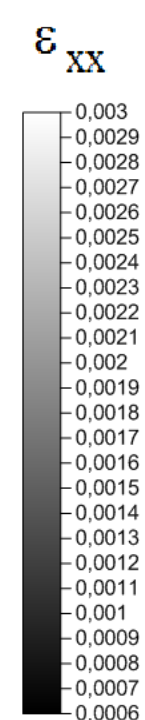
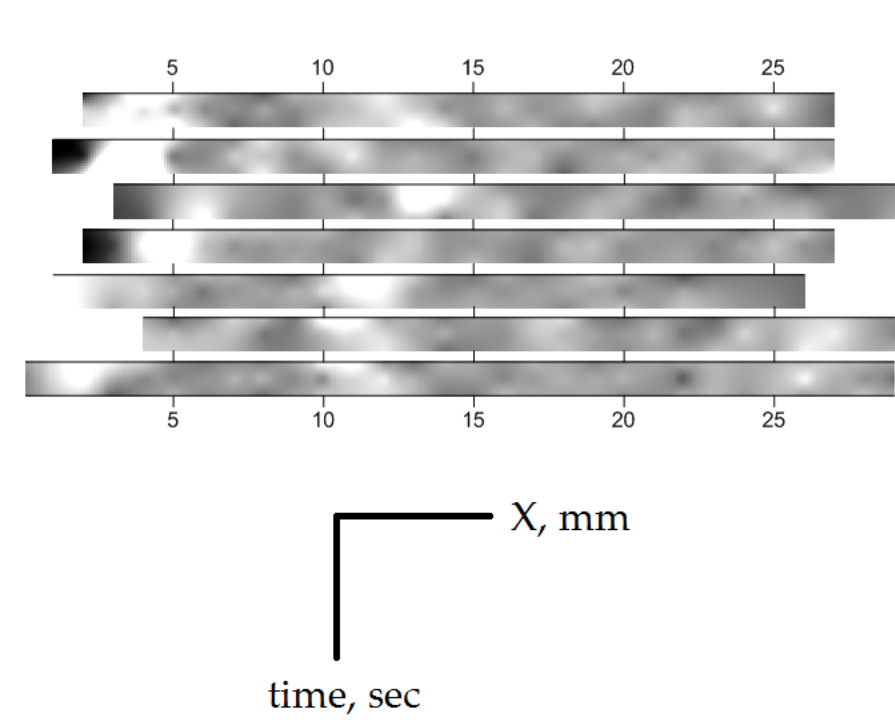


Рис. 2. Распределение компоненты локальных удлинений ϵ_{xx} при одноосном растяжении в виде полутонковой картины (а) и $X-t$ кинетическая диаграмма деформации: $T = 297 \text{ К}$; X — координата очага локализации, t — время (б), полученной из (а).

Анализ картин макроскопической локализации проводили на участках деформационной кривой с показателем параболичности $n=0,5$. Пример распределения локальных деформаций в виде полутонковых картин показан на рисунке 2а.

Для вычисления пространственного периода локализации деформации λ анализировали $X-t$ диаграммы, где X – координата очага локальной деформации, t – время. Характерная картина локализации деформации для параболической стадии пластического течения – стационарная система эквидистантных очагов локализации, когда с течением времени положение очага локализованной деформации не меняется во времени, при этом расстояние между очагами неизменно.

Пример $X-t$ диаграммы для исследуемого материала представлен на рисунке 2б. Пространственный период локализации λ оценивали как среднее расстояние между соседними очагами локализации на протяжении всей стадии пластического течения с показателем параболичности $n=0,5$.

В таблице представлены механические свойства сплава А5М. Обозначения: $T, \text{ К}$ – температура испытания, σ_B – предел прочности, ϵ_{tot} – относительное удлинение до разрыва, λ – пространственный период локализации. Установлено, что с ростом температуры испытания наблюдается уменьшение предела прочности, в то время как деформация до разрушения растет. Обнаружена обратно пропорциональная зависимость пространственного периода локализации деформации от температуры испытания (рисунок 3).

Таблица механических характеристик исследуемого сплава

$T, \text{ К}$	$\sigma_B, \text{ МПа}$	$\epsilon_{tot}, \%$	$\lambda \cdot 10^3, \text{ м}$
173	83	32	8,2
211	79	36	6,3
241	76	38	5,6
297	69	39	4,8
350	55	49	4,7

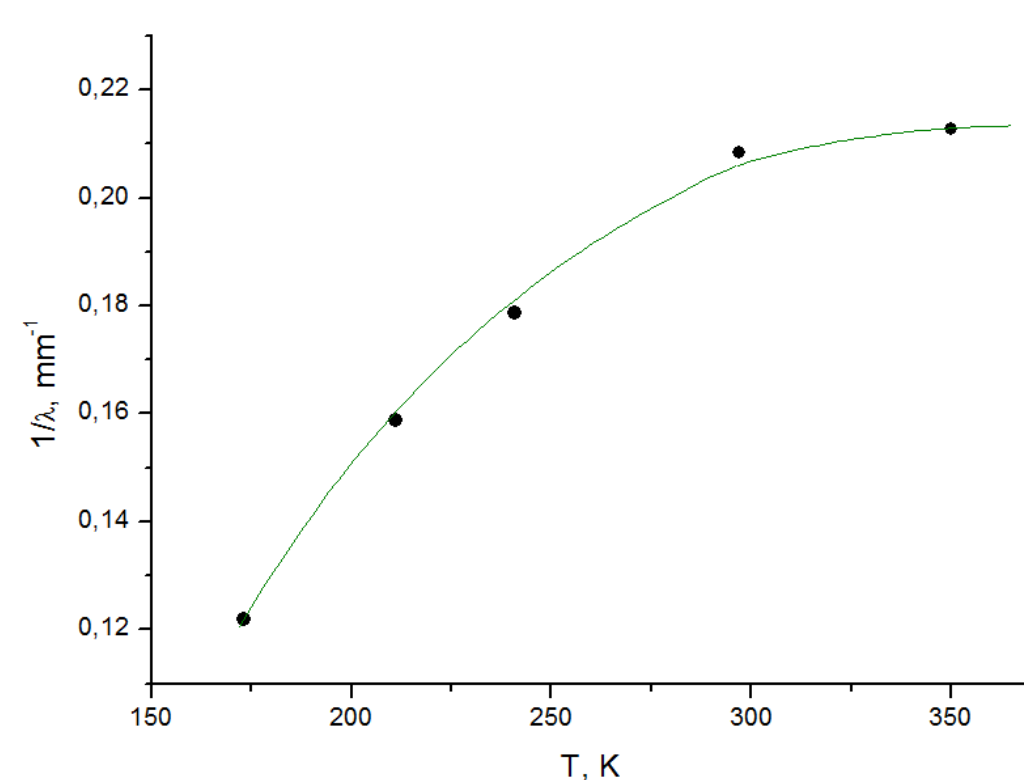


Рис. 3. Зависимость пространственного периода от температуры испытания.

Выводы:

1. Процесс растяжения образцов сплава А5М в исследуемом интервале температур сопровождается наличием на деформационной кривой стадий параболического деформационного упрочнения с показателем параболичности $n=0,5$ и предразрушения с показателем параболичности $n<0,5$.
2. Установлены температурные зависимости механических характеристик и параметров локализации пластической деформации. С ростом температуры увеличивается пластичность и уменьшается пространственный период локализации пластической деформации на фоне увеличения числа очагов локализации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0011

Список цитируемой литературы

1. Aifantis E.C. Acta Mechanica, Vol. 225 No. 4-5, P. 999-1012, (2014)
2. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Лунев А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации, 132 с, (2018).
3. Баранникова С.А., Никонова А.М., Колосов С.В. Вестник ПНИПУ. Механика, 1, сс. 22-30, (2021)
4. Трефилов В.И., Мойсеев В.Ф., Печковский Э.П. и др. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов // Киев: Наукова думка. 1987. С. 256.