

### ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ СПЛАВОВ Pb–62Sn, РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ИСТОРИЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*В.М. Аржавитин*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
г. Харьков, Украина; E-mail: arzhavitin@kipt.kharkov.ua*

Методом резонансных изгибных колебаний при амплитуде деформации  $10^{-3}$  получены временные зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$  сплавов Pb–62Sn (вес. %), различающихся историей пластического деформирования. Показано, что предварительная пластическая деформация путем прессования подобно закалке или облучению высокоэнергетическими элементарными частицами повышает степень неравновесности сплава и тем самым интенсифицирует его деформационное старение.

#### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] при комнатной температуре были изучены зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}$  от времени  $t$  циклического нагружения с амплитудой деформирования  $\epsilon_0 \approx 10^{-3}$  образцов бинарной эвтектики Pb–62Sn (вес. %). Измерения были проведены на литом сплаве, состаренном в естественных условиях в течение продолжительного времени (около двух лет) и затем обжатом на гидравлическом прессе на  $\approx 75\%$  непосредственно перед измерением внутреннего трения. Были обнаружены два типа особенностей внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$ : его падение в первые минуты циклического нагружения образцов, а позднее максимумы при определенных значениях  $t = t_m$ .

В работе [1] наличие перечисленных особенностей внутреннего трения сплава Pb–62Sn связывалось с фазовой неустойчивостью образцов под воздействием циклической пластической деформации. Подобно закалке или облучению высокоэнергетическими элементарными частицами пластическая и микропластическая деформации создают вакансии в металлических материалах. Вследствие пластической деформации сплавов образование неравновесных (избыточных для данной температуры) вакансий в сплавах происходит с большой лёгкостью. Концентрация одиночных вакансий тогда увеличивается в 10 и более раз. Образовавшиеся при пластической деформации неравновесные вакансии резко ускоряют диффузию растворённых атомов в сплавах. По этой причине в сплавах могут происходить структурно-фазовые превращения, образование выделений, расслоение и тому подобное при пониженных температурах, когда тепловая диффузия практически отсутствует [2].

Для временной зависимости внутреннего трения в [1] получено выражение:

$$Q^{-1}(t) = ZKnt^{n-1}\exp(-Kt^n).$$

Здесь  $Z(t) = \text{const}$ , а  $K$  и  $n$  – постоянные Аврами [3] фазового распада. При определённых числовых значениях  $K$  и  $n$  это выражение «предсказывает» все обнаруженные экспериментально особенности внутреннего трения Pb–62Sn.

В настоящем исследовании проведенные ранее [1] эксперименты продолжены на образцах сплава Pb–62Sn, различающихся историей пластического деформирования. Целью этого исследования было выявление закономерностей поведения внутреннего трения, отражающих историю протекания процессов пластической деформации Pb–62Sn во времени.

#### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На установке для измерения внутреннего трения материалов, описанной в [4], исследовались при комнатной температуре следующие сплавы Pb–62Sn:

– литой, не подвергавшийся предварительному механическому обжатию сплав, состаренный при комнатной температуре на воздухе в течение двух лет.

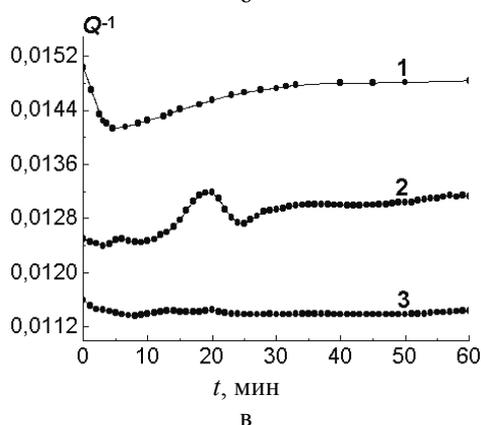
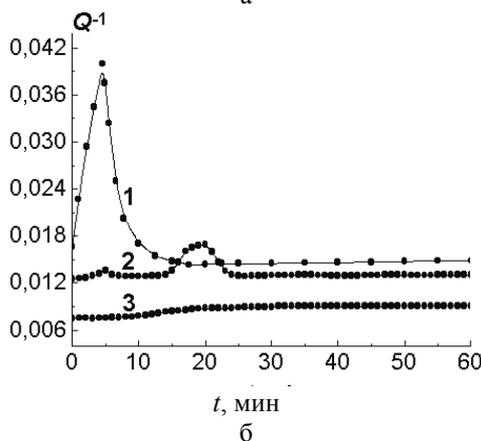
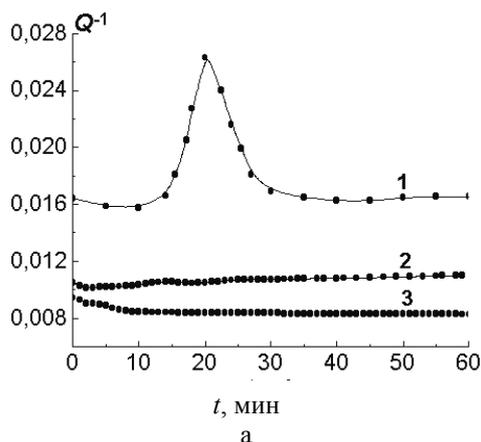
– обжатый на гидравлическом прессе на 75% сразу после литья, а затем состаренный в тех же температурно-временных условиях.

Образцы для исследования имели форму прямоугольной призмы размерами 2x2x20 мм. Непрерывное циклическое деформирование образцов осуществляли возбуждением резонансных изгибных колебаний частотой 90 Гц. Последующие измерения внутреннего трения одних и тех же образцов осуществлялись через каждые двое суток. Относительная циклическая деформация на поверхности образцов составила  $\epsilon_0 \approx 10^{-3}$ . Ошибка определения внутреннего трения не превышала 1,5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$  образцов исследуемого сплава Pb–62Sn в трёх его состояниях.

Как видно из рисунка а, большой пик внутреннего трения появляется при  $t_m = 19$  мин (кр. 1) только в сплаве, обжатом непосредственно перед началом процедуры первого измерения внутреннего трения. Напротив, в литом (не обжатом), а также в обжатом сразу после литья, но затем длительно состаренном при комнатной температуре сплаве Pb–62Sn столь явно выраженных особенностей на кривых внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$  нет (кр. 2 и 3).



Кинетические зависимости внутреннего трения сплавов Pb–62Sn в первом (а), втором (б) и третьем (в) измерениях при одинаковой амплитуде

$\varepsilon_0 \approx 10^{-3}$  и температуре 20 °C деформации в различных состояниях материала: 1 – сплав, длительно состаренный при 20 °C после литья и затем обжатый (кр. 1 взяты из работы [1]); 2 – литой длительно состаренный при 20 °C сплав; 3 – сплав, обжатый сразу после литья и затем длительно состаренный при 20 °C

Предварительная пластическая деформация является фактором, оказывающим существенное влияние на кинетику процессов, происходящих в сплаве Pb–62Sn в процессе старения. В соответствии с [5,6] в обжатых сразу после литья сплавах системы Pb–Sn появляются дополнительные границы зёрен, незаблокированные ("свежие") дислокации и неравновесные вакансии. Неравновесные сплавы Pb–Sn становятся ещё более неравновесными или энергонасыщенными (по терминологии [5]), что обуславливает увеличение скорости процессов возврата и релаксации напряжений в сплавах [5]. Согласно [6] время старения сплавов экспоненциально зависит от степени их предварительной деформации. Вследствие ускоренного обжатием старения сплава Pb–62Sn за два последующих года его выдержки при комнатной температуре он становится практически равновесным. По названной причине в ходе первого измерения внутреннего трения фазовый распад такого сплава незначителен (см. рисунок, а, кр. 3).

Если же медленно стареющий сплав подвергнуть обжатию спустя два года после литья, то степень его неравновесности резко повышается. И тогда в измерениях внутреннего трения, проведенных сразу же после обжатия, регистрируется интенсивный фазовый распад сплава (см. рисунок, кр. 1) под воздействием циклического нагружения.

Аналогичным образом интенсифицирует фазовый распад и предварительная пластическая деформация циклическим изгибом. Её испытывают [7] приповерхностные слои образцов Pb–62Sn в процессе измерения внутреннего трения. Так, при втором измерении внутреннего трения отчётливые пики  $Q^{-1}(t)$  при  $t_m \approx 5$  мин и  $t_m \approx 19$  мин регистрировались уже и в литом длительно состаренном сплаве (см. рисунок, б, кр. 2). В третьем измерении внутреннего трения пики  $Q^{-1}(t)$  при  $t_m \approx 5$  мин и  $t_m \approx 19$  мин в литом длительно состаренном сплаве (см. рисунок, б, кр. 2) заметно увеличились по сравнению с предыдущим случаем. Тогда же появился очень слабый пик  $Q^{-1}(t)$  при  $t_m \approx 19$  мин в обжатом сразу после литья, но затем длительно состаренном сплаве (см. рисунок, в, кр. 3).

Проведенный выше сравнительный анализ экспериментальных данных (см. рисунок) показывает, что на кинетику фазового распада исследуемых сплавов под воздействием циклического нагружения стимулирующее влияние оказывает предварительная пластическая деформация.

## ВЫВОДЫ

1. Методом резонансных изгибных колебаний при неизменной амплитуде деформации  $10^{-3}$  получены кинетические кривые внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$  сплавов Pb–62Sn, содержащие особенности (экспоненциальное падение и максимумы).

2. Показано, что степень выраженности особенностей внутреннего трения  $Q^{-1}(t)$  определяется всей историей пластического деформирования (как статического, так и динамического) образцов Pb–62Sn.

3. Полученные экспериментальные результаты объясняются стимулирующим влиянием предварительной пластической деформации на кинетику фазового распада сплавов Pb–62Sn под воздействием циклического нагружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Аржавитин, В.Ф. Коршак, А.Ф. Сиренко. Кинетика низкочастотной неупругости сверхпла-

стичного сплава Pb–62% Sn //ФММ. 2002, т. 94, №3, с. 80–84.

2. К.В. Чуистов. *Старение металлических сплавов*. Киев: «Наукова думка», 1985, 232 с.

3. *Физическое металловедение. Т.2. Фазовые превращения* /Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена /Пер. с англ. М.: «Металлургия», 1987, 623 с.

4. Б.И. Шаповал, В.М. Аржавитин. *Внутреннее трение некоторых чистых металлов и композиционных материалов*. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1984, 58 с.

5. А.С. Тихонов, М.А. Шоршоров, С.С. Дрюнин и др. Релаксация напряжений в сверхпластичных двухфазных сплавах //Механизмы релаксационных явлений в твёрдых телах. Каунас, 1974, с. 109–112.

6. Ван Бюрен. *Дефекты в кристаллах*. М.: «Иностранная литература», 1962, с. 389–390.

7. В.М. Аржавитин. Амплитудная зависимость внутреннего трения в сплаве Pb–62% Sn //ЖТФ. 2004, т. 74, № 6, с. 43–46.

## ЧАСОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ СПЛАВІВ Pb–62Sn, ЩО РОЗРІЗНЯЮТЬСЯ ІСТОРІЄЮ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

*В.М. Аржавитин*

Методом резонансних згинальних коливань при амплітуді деформації  $10^{-3}$  отримані часові залежності внутрішнього тертя  $Q^{-1}(t)$  сплавів Pb–62Sn (ваг. %), що розрізняються історією пластичного деформування. Показано, що попередня пластична деформація шляхом пресування подібно загартуванню чи опроміненню високоенергетичними мікрочастинками підвищує ступінь нерівноважності сплаву й тим самим інтенсифікує його деформаційне старіння.

## TIME DEPENDENCES OF INTERNAL FRICTION OF ALLOYS Pb–62Sn, DIFFERING BY THE HISTORY OF PLASTIC DEFORMATIONS

*V.M. Arzhavitin*

By the resonant bending vibrations method at amplitude of deformation  $10^{-3}$  the time dependences of internal friction  $Q^{-1}(t)$  of alloys Pb–62Sn (wt. %), differing by a history of plastic deformation, are received. It is shown, that preliminary plastic deformation by pressing method, as similar to heat hardening or irradiation by high-energy microparticles, raises a degree of alloy nonequilibrium and intensifies its strain aging.