

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

УДК 519.95:681.303

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СПЛАВА АМг6М С ПОЗИЦИИ
СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Д.Г. Борщевская, ст. науч. сотр., к.ф.-м.н., В.Д. Рябчий, ст. науч. сотр., к.т.н.,
В.Ф. Бутенко, науч. сотр., И.И. Телегина, мл. науч. сотр.,
Институт технической механики НАНУ и НКАУ, г. Днепропетровск

Аннотация. Исследованы закономерности влияния различных видов промежуточной пластической деформации (ППД) на ползучесть сплава АМг6М. Показано, что ППД ведет к заживанию микроскопических дефектов и повышению плотности дислокаций, что способствует упрочнению материала. Дана количественная оценка вклада каждого из приведенных факторов. Разработаны и запатентованы технологические способы комбинированной энергетической обработки сплава АМг6М, повышающие его долговечность (время до разрушения в режиме ползучести).

Ключевые слова: конструкционные материалы, промежуточная пластическая деформация, долговечность, комбинированное энергетическое нагружение, синергетический подход.

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СПЛАВУ АМг6М З ПОЗИЦІЇ
СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ

Д.Г. Борщевська, ст. наук. співр., к.ф.-м.н., В.Д. Рябчій, ст. наук. співр., к.т.н.,
В.Ф. Бутенко, наук. співр., І.І. Телегіна, мол. наук. співр.,
Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ, м. Дніпропетровськ

Анотація. Досліджено закономірності впливу різних видів проміжної пластичної деформації (ППД) на повзучість сплаву АМг6М. Показано, що ППД веде до заліковування микроскопічних дефектів і підвищення густини дислокацій, що сприяє зміцненню матеріалу. Дано кількісну оцінку внеску кожного з наведених факторів. Розроблено й запатентовано технологічні способи комбінованої енергетичної обробки сплаву АМг6М, що підвищують його довговічність (час до руйнування в режимі повзучості).

Ключові слова: конструкційні матеріали, проміжна пластична деформація, довговічність, комбіноване енергетичне навантаження, синергетичний підхід.

INCREASE OF SERVICE LIFE OF AMg6M ALLOY FROM THE POINT OF VIEW
OF SYNERGETIC APPROACH

D. Borschevska, senior researcher, Candidate of Mathematical-Physical Science,
V. Ryabchiy, Candidate of Technical Science, senior researcher,
V. Butenko, researcher, I. Telegina, junior researcher,
Institute of Technical Mechanics of NASU and NSAU, Dnepropetrovsk

Abstract. The regularities of various intermediate plastic deformations (IPD) effects on AMg6M alloy creep are studied. It is shown that IPD leads to healing microscopic defects and increasing the dislocation density that contributes to material hardening. A quantitative assessment of the contribution of each of the above factors is made. Technological ways of a combined energy processing AMg6M alloy that improves its life (time to failure in creep mode) are developed and patented.

Key words: structural materials, intermediate plastic deformation, service life, combined energy load, synergetic approach.

Введение

Повышение надежности и долговечности элементов конструкций является одной из важнейших задач современного машиностроения. Особую актуальность эта проблема представляет для изделий долгосрочного функционирования при постоянных нагрузках и повышенных температурах, что приводит к накоплению внутренних микроочагов повреждения и, как следствие, к преждевременному разрушению узлов. Поэтому чрезвычайно важной является проблема создания новых технологий упрочняющей обработки конструкционных материалов с целью улучшения их показателей долговечности. Перспективными в этом аспекте являются технологические разработки, базирующиеся на использовании принципов синергетики [1, 2, 3]. Здесь речь идет о том, что в экстремальных условиях внешнего энергетического нагружения за счет непрерывного притока энергии в материале, приведенном в термодинамически неравновесное состояние, инициируются самоорганизационные процессы с образованием новых диссипативных структур, следствием чего и является скачкообразное изменение качественного состояния материала.

При выборе конструкционного материала для некоторых ответственных узлов авиакосмических аппаратов предпочтение отдается алюминиевым сплавам, в частности алюминивно-магниевым, которые, наряду с достаточно высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, менее склонны к хрупкому разрушению, чем стали [4, 5]. Однако увеличение эксплуатационных нагрузок и гарантийных сроков эксплуатации указанных конструкций вынуждает вести постоянный поиск путей совершенствования используемых конструкционных материалов. Широкие возможности по управлению их свойствами открываются с позиции синергетического подхода.

Анализ публикаций

Одним из способов энергетического нагружения, способного инициировать самоорганизационные процессы в металлических материалах, является применение комбинированного энергетического нагружения, вклю-

чающего воздействие высоких механических нагрузок при электростимулированном нагреве и высокочастотных колебаний (ударных ультразвуковых и электромагнитных) [6].

Известно, что в условиях деформации поле напряжения неоднородно, пластическая деформация тоже неоднородна и развивается локально в областях концентрации напряжения. При достижении критических уровней напряжения в локальных зонах происходит диссипация упругой энергии.

Это позволяет использовать синергетический подход к описанию пластической деформации и рассматривать нагружаемый объект как далекую от равновесия диссипативную систему [7]. Образующиеся волны пластичности (известно, что пластическая деформация носит волновой характер) являются результатом самоорганизации элементарных актов пластического течения в локальных зонах концентрации напряжения.

При электростимулированном нагреве за счет пропускания тока через образец имеет место как интегральный джоулевый разогрев материала, так и электронно-дислокационное взаимодействие, что интенсифицирует процесс пластической деформации [8].

При ударном ультразвуковом воздействии энергия удара выделяется в небольшом поверхностном объеме, измельчая структуру и перераспределяя напряжения [9]. Поверхностный слой становится наноструктурированным.

Воздействуя на материал электромагнитными колебаниями в диапазоне частотной синхронизации с частотой релаксационных актов деформируемого материала, можно вызвать акустопластический резонанс, что является эффективным средством интенсификации процесса пластического деформирования, способным вызвать самоорганизационные явления [10].

Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы являлось повышение долговечности алюминивно-магниевого сплава АМг6М с позиции синергетического

подхода за счет введения промежуточного комбинированного энергетического нагружения в условиях ползучести.

Объектом проводимых исследований были образцы, изготовленные в соответствии с требованием инструкции к установке ИМАШ-20-78, предназначенной для термомеханических испытаний и включающей в себя систему приборов, которые обеспечивают контроль и автоматическое поддержание режимов нагрузки и нагрева.

Промежуточная пластическая деформация включала действие высоких сжимающих нагрузок в условиях повышенных температур, а также ударных ультразвуковых и электромагнитных колебаний.

Одноосное статическое растяжение осуществлялось со скоростью движения захватов от 2 до 4 мм/мин. Погрешность измерения деформации образца в рабочей зоне составляла не более $\pm 0,01$ мм, нагрузки – $\pm 1,5$ %, температуры – $\pm 1,5$ °С.

Испытание на сжатие проводилось при нагрузке $P=5 \cdot 10^5$ Н на образцы, находящиеся в нагретом состоянии ($t=300$ °С). При этом, в среднем, толщина образца уменьшалась на 35 %, ширина увеличивалась на 57 %, длина – на 4 %.

Нагрев образцов проводился двумя способами: путем теплового воздействия электрического тока, пропускаемого через образец, и за счет теплопередачи от печи сопротивления.

Ударные ультразвуковые колебания с частотой 20 кГц создавались с помощью генератора ударного ультразвука УЗГ 250 и передавались образцу посредством сканирования бойком ударника по его поверхности. При этом оптимальная амплитуда колебаний излучателя составляла 19,8 мкм.

Предварительно экспериментальным путем был установлен оптимальный по частоте режим обработки ($f=250$ кГц).

Испытания на ползучесть проводились по ускоренному режиму: выдержка под нагрузкой $P=2100$ Н в условиях одноосного растяжения при температуре $t=160$ °С. В случае

испытаний образцов, подвергнутых энергетической обработке, вносились поправки в величину нагрузки с учетом изменившегося сечения образца.

Действие энергетических потоков на материал оценивалось по изменению характеристик кратковременной (предела прочности σ_B , предела текучести $\sigma_{0,2}$) и длительной (времени τ до разрушения при ползучести) прочности, а также работы разрушения W образца, которая измерялась площадью под кривой деформации.

Промежуточная пластическая деформация при испытаниях на ползучесть проводилась по двум схемам. Согласно первой образцы, которые выработали приблизительно половину своего ресурса в условиях ползучести, после разгрузки и охлаждения подвергались высокотемпературному сжатию, а также действию ударных ультразвуковых и электромагнитных колебаний в упругой зоне деформации при одноосном растяжении. Затем образцы вновь выводились на режим ползучести, с целью определения времени до разрушения.

Согласно второй схеме после высокотемпературной сжимающей нагрузки проводился отжиг образцов с последующим воздействием высокочастотных колебаний.

Обсуждение результатов эксперимента

Путем варьирования параметров воздействующих энергетических потоков, а также схемами их совмещения был разработан и запатентован [11] способ комбинированной энергетической обработки сплава АМг6М, повышающий прочностные характеристики и долговечность материала.

Общая схема нагружения (схема I) следующая:

- электростимулированная растягивающая нагрузка в зоне пластической деформации ($P=2100$ Н, $t=160$ °С), до выработки примерно половины ресурса;
- высокотемпературная сжимающая нагрузка ($P=5 \cdot 10^5$ Н, $t=300$ °С);
- ударное ультразвуковое (с частотой 20 кГц) и электромагнитное (с частотой 250 кГц) воздействия в упругой зоне деформации ($P=1300$ Н).

Результаты механических испытаний, проведенных согласно выбранной схеме, представлены в табл. 1.

Таблица 1 Характеристики прочности сплавов

Сплав	Режим	$\frac{\sigma_{\text{обр}}}{\sigma_{\text{исх.}}}$	$\frac{\sigma_{0,2}^{\text{обр}}}{\sigma_{0,2}^{\text{исх.}}}$	$\frac{W^{\text{обр}}}{W^{\text{исх.}}}$	τ , мин	$\frac{\tau_{\text{обр.}}}{\tau_{\text{исх.}}}$
АМг6М	Исх.	—	—	—	5	—
	Схема I	ув. в 1,5	ув. в 2,6	ум. в 3,0	150	30
	Схема II	ув. в 1,1	ув. в 1,6	ум. в 1,2	40	8
01570	Контр.	ув. в 1,2	ув. в 1,8	без изм.	—	—

Из табл. 1 следует, что показатель долговечности сплава АМг6М существенно увеличивается (время до разрушения при ползучести повышается, в среднем, в 30 раз) при одновременном повышении, в среднем, предела прочности в 1,5 раза и предела текучести – в 2,6 раза. Однако при этом заметно уменьшается (примерно в 3 раза) характеристика пластичности материала.

Известно, что высокие прочностные характеристики не являются достаточными показателями качества материала. Эффективность методов упрочнения следует оценивать не только по приросту характеристик прочности и ползучести, но и по показателям пластичности и вязкости. Поэтому был проведен комплекс исследований с целью поиска способа упрочняющей обработки сплава АМг6М, позволяющего, наряду с характеристиками прочности и ползучести, повысить пластичность материала. Это позволило разработать вторую схему комбинированного энергетического нагружения (схема II), на которую был получен патент [12].

Пластичность сплава была увеличена (см. табл. 1) за счет введения в условиях промежуточной пластической деформации отжига при температуре $t=320^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов после действия сжимающей нагрузки для снятия напряжения в зоне залечиваемых пор и миграции границ, с целью перемещения дефектов в тело зерна.

На рис. 1 показан ход кривых разрушения сплава АМг6М в исходном состоянии (кривая 1), а также после обработки по схемам 1 (кривая 2) и 2 (кривая 3).

ся в том, что обработка по схеме 2 существенно повышает пластичность материала, по сравнению с обработкой по схеме 1.

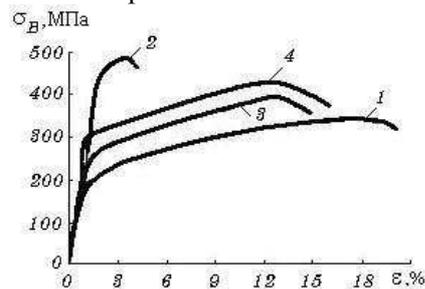


Рис. 1. Ход кривых разрушения сплава АМг6М

Для сравнения в табл. 1 и на рис. 1 приведены характеристики сплава 01570 на основе той же системы Al-Mg, но легированного скандием [1]. Этот сплав, как и сплав АМг6М, содержит около 6 % Mg и близок к нему по технологическим свойствам в металлургическом производстве.

В настоящее время сплав 01570 является самым прочным из числа термически неупрочняемых свариваемых алюминиевых сплавов. Однако он относится к разряду дорогостоящих сплавов, что ограничивает его широкое применение. Обработка сплава АМг6М по схеме II позволила приблизить его по прочностным характеристикам к сплаву 01570, что, в перспективе, открывает возможность замены последнего на более дешевый сплав АМг6М.

Сравнительный анализ результатов испытаний образцов в исходном состоянии и после энергетической обработки показал, что введение промежуточной пластической деформации в условиях ползучести существенно повышает ресурс долговечности сплава АМг6М (табл. 1). Рис. 2 иллюстрирует кривые ползучести сплава АМг6М в исходном состоянии (кривая 1) и после обработки по схемам 1 (кривая 2) и 2 (кривая 3).

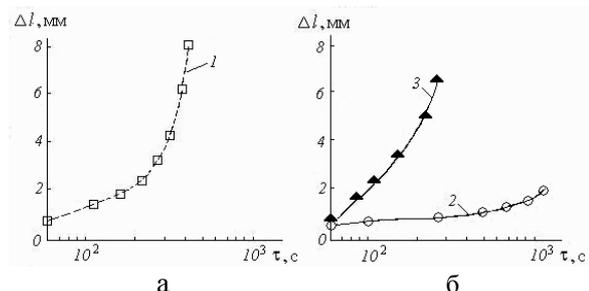


Рис. 2. Кривые ползучести сплава АМг6М в исходном состоянии (а) и после обработки по схемам 1 (кривая 2) и 2 (кривая 3)

Согласно разработанным технологическим схемам, промежуточная пластическая деформация включала действие высокотемпературной сжимающей нагрузки. Упрочнение материала вследствие такой обработки обусловлено как залечиванием дефектов, так и ростом плотности дислокаций [13, 14]. Для разделения вклада каждого из указанных факторов был проведен следующий эксперимент. Образцы, подвергнутые сжимающей нагрузке, отжигались в течение 1 часа при разных значениях температуры с последующим измерением характеристик кратковременной прочности. На рис. 3 приведены кривые зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (1), предела прочности σ_B (2) и работы разрушения W (3) сплава АМг6М от температуры отжига образцов, подвергнутых высокотемпературной сжимающей нагрузке.

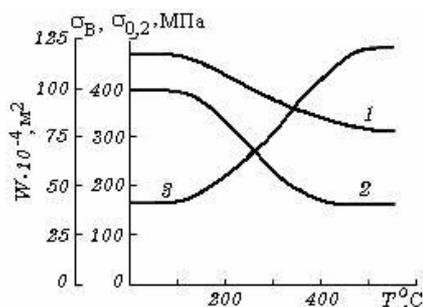


Рис. 3. Кривые зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (1), предела прочности σ_B (2) и работы разрушения W (3) сплава АМг6М

Исследования показали, что с повышением температуры не происходит полного отжига материала, т.е. прочность материала не восстанавливается до первоначального уровня. Поскольку прочность определяется двумя процессами, а именно, залечиванием дефектов и повышением плотности дислокаций, то отмеченную разницу между показателями прочности в исходном и отожженном состоянии следует отнести за счет залечивающего действия, поскольку избыточные дислокации должны полностью устраняться при повышении температуры отжига. Как следует из рис. 3, в интервале температур от 20 до 100 °С предел прочности составляет приблизительно 493 МПа. Начиная с $t=100$ °С, происходит заметное уменьшение

величины σ_B . При температуре отжига 400 °С и выше кривая прочности, как и кривые текучести и работы разрушения, выходят на горизонталь. Последнее свидетельствует о том, что при указанных условиях происходит, очевидно, полное исчезновение дислокаций, которые появились в результате обработки давлением. Однако в интервале температур от 400 °С до 450 °С прочность образцов не восстанавливается до своего первоначального уровня, равного 333 МПа, а остается на уровне 363 МПа. Итак, повышение предела прочности, которое обусловлено залечиванием дефектов, составляет 30 МПа, а изменение σ_B , связанное с деформационным упрочнением, – 130 МПа. Другими словами, упрочнение сплава АМг6М при воздействии сжимающей нагрузки на 81,25 % обусловлено изменением плотности дислокаций и лишь на 18,75 % – залечивающим эффектом. В пользу того, что рост прочности в условиях сжимающего нагружения определяется, в основном, деформационным упрочнением, свидетельствует уже отмеченное выше снижение пластичности образцов при испытаниях по первой схеме промежуточной деформации.

Аналогичным образом была проведена количественная оценка вклада указанных выше факторов в упрочнение образцов сплава АМг6М, обработанных по схемам 1 и 2. По результатам экспериментальных исследований были построены кривые зависимости предела прочности от температуры отжига образцов, обработанных по схемам 1 и 2 (рис. 4). При энергетическом нагружении по схеме 1 упрочнение сплава на 84,3 % обусловлено ростом плотности дислокаций и на 15,7 % – залечиванием дефектов; по схеме 2 – на 73,2 % и 26,8 % соответственно.

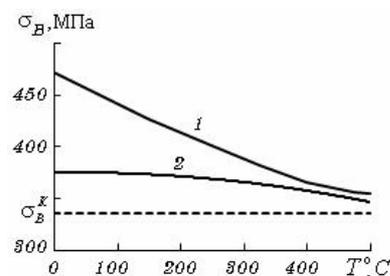


Рис. 4. Кривые зависимости предела прочности от температуры отжига образцов

Выводы

Предложен способ повышения ресурса долговечности сплава АМг6М в условиях ползучести за счет введения промежуточной пластической деформации, включающей действие высоких сжимающих нагрузок в тепловом поле, а также ударных ультразвуковых и электромагнитных колебаний.

Показано, что повышение прочности исследуемого сплава достигается за счет залечивания дефектов и повышения плотности дислокаций. Проведен расчет вклада каждого из указанных эффектов.

Литература

1. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 2001. – 413 с.
2. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
3. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.М. Буши, А.А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
4. Иванова В.С. Синергизм механических свойств и экстремальных технологий управления структурой материала / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, О.А. Банных // Металлы. – 1992. – № 2. – С. 11–27.
5. Куликов В.Д. Физическая природа разрушения / В.Д. Куликов, Н.В. Мекалова, М.М. Закриничная. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – 421 с.
6. Фролов К.В. Релаксационные волны при пластической деформации / К.В. Фролов, В.Е. Панин, Л.Б. Зуев и др. // Известия высших учебных заведений. – 1990. – №2. – С. 19.
7. Спицин В.И. Электропластическая деформация металлов / В.И. Спицин, О.А. Троицкий. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
8. Петров В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструктивных материалов / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень. – С.-Петербург: Политехника, 1993. – 475 с.
9. Гегузин Я.Е. Диффузионно-дислокационный механизм залечивания изолированных пор / Я.Е. Гегузин, В.Г. Кононенко // Физика и химия обработки материалов. – 1982. – № 2. – С. 60–74.
10. Горюшин В.В. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства поверхностных слоев железа и некоторых сталей / В.В. Горюшин, В.П. Кривых, Г.И. Прокопенко и др. // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. – К.: Наукова думка, 1980. – С. 137–140.
11. Баранов Ю.В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов. – М.: МГПИУ, 2001. – 844 с.
12. Патент № 46841 Україна С21D1/04, С21D9/22, С22F1/00. Спосіб зміцнення металевих матеріалів / Є.С. Переверзев, Д.Г. Борщевська, В.Д. Рябчій, В.Ф. Бутенко; Заяв. та патентовласник Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – U200906775; заяв. 30.06.2009; опубл. 11.01.2010. – Бюл. № 1. – 3 с.
13. Патент № 5674 Україна С21D1/04, С21D9/22, С22F1/00.0 Спосіб підвищення довговічності металевих матеріалів Україна / Д.Г. Борщевська, В.Д. Рябчій, В.Ф. Бутенко, А.В. Ханнанов; Заяв. та патентовласник Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – U201008347; заяв. 05.07.2010; опубл. 25.01.2011. – Бюл. № 2. – 3 с.

Рецензент: Л.А. Тимофеева, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 1 августа 2011 г.