

## ПОВЕДЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО - УПРОЧНЕННОГО СПЛАВА АМг6М В ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ И ПУТЕМ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Приведены результаты исследований по сравнительной оценке действия электрического тока высокой плотности и эквивалентного нагрева в печи сопротивления на изменение характеристик пластичности деформационно-упрочненного сплава АМг6М. Установлена зависимость релаксационных процессов в материале от температуры нагрева.

Приведені результати досліджень стосовно порівняльної оцінки дії електричного струму високої щільності та еквівалентного нагріву в печі опору на зміну характеристик пластичності деформаційно-зміцненого сплаву АМг6М. Встановлена залежність релаксаційних процесів в матеріалі від температури нагрівання.

Results of the research on comparable assessment of the effects of high-density electric current and equivalent heating in a resistance furnace on variations in plasticity characteristics of the АМg6М strained-hardened alloy are presented. The dependence of relaxation processes in material on the reheat temperature is revealed.

В современных технологических процессах обработки материалов и деталей машин весьма перспективным является использование пластифицирующего действия электрического тока высокой плотности. Однако до настоящего времени еще недостаточно разработаны его научные основы. В частности, нет единого мнения о том, какие факторы влияют на деформационные процессы в материалах под действием электрического тока, вызывая изменение их физико-механических характеристик. Одни авторы полагают, что основным фактором является термический эффект, т.е. под действием потока электронов повышается энергия колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Другие авторы считают, что в основе указанного процесса лежит электронно-дислокационное взаимодействие, т.е. электрический ток увеличивает скорость движущихся дислокаций, помогая им преодолевать потенциальные барьеры в плоскостях скольжения [1 – 5].

Для более глубокого понимания особенностей электропластических эффектов несомненный интерес могут представлять исследования по изучению сопротивления материала деформации, стимулированной нагревом электрическим током и в печи сопротивления в аналогичных условиях теплового нагружения.

Целью настоящей работы являлись исследования по сравнительной оценке термического действия электрического тока и эквивалентного косвенного нагрева на механические характеристики деформационно-упрочненного сплава АМг6М.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе изучалось влияние вида нагрева на релаксацию напряжений в сплаве АМг6М и изменение характеристик микротвердости и ползучести материала. На втором этапе исследовалось изменение пластичности деформационно-упрочненного сплава АМг6М в эквивалентных тепловых полях, инициируемых действием электрического тока и нагрева в печи сопротивления.

Объектом исследований являлись образцы сплава АМг6М, изготовленные в соответствии с требованиями инструкции к установке ИМАШ-20-78, предназначенной для термомеханических испытаний материалов.

Одноосное статическое растяжение осуществлялось со скоростью движения захватов от 2 до 4 мм/мин. Погрешность измерения деформации об-

© Е.С. Переверзев, Д.Г. Борщевская, С.П. Федий, В.Ф. Бутенко, 2009

разца в рабочей зоне составляла не более  $\pm 0,01$  мм, нагрузки –  $\pm 1,5\%$ , температуры –  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Испытания на сжатие проводились при нагрузке  $P = 5 \cdot 10^5$  Н с использованием специально изготовленной прессформы.

Нагрев образцов осуществлялся двумя способами: путем теплового воздействия пропускаемого через образец электрического тока плотностью  $200 \text{ А/см}^2$ , а также за счет излучения тепла в печи сопротивления. Измерение температуры осуществлялось с помощью хромель-алюмелевой термопары по показаниям записывающего потенциометра PS1.

Кинетика термического действия на материал различных видов нагрева оценивалась по изменению характеристик кратковременной прочности (предела прочности  $\sigma_B$ , предела текучести  $\sigma_{0,2}$ ), длительной прочности (времени до разрушения  $\tau$  в режиме ползучести) и микротвердости  $H_\mu$ , измеряемой с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Испытания на ползучесть проводились по ускоренному режиму: непрерывная выдержка под нагрузкой  $P = 2100$  Н при температуре  $160^\circ\text{C}$ . При испытаниях на ползучесть образцов, подвергнутых энергетической обработке, вносилась поправка в величину нагрузки с учетом изменившегося сечения образца.

Исследования релаксационных процессов в сплаве АМг6М, предусмотренные на первом этапе работ, проводились по данным испытаний образцов в условиях одноосного квазистатического растяжения вплоть до разрушения. Нагрев осуществлялся до  $250^\circ\text{C}$  с шагом  $50^\circ\text{C}$ . Для каждого значения температуры строились деформационные кривые и определялись характеристики кратковременной прочности. Степень релаксации напряжения  $S$  для каждого вида нагрева оценивалась из соотношения

$$S = \frac{\sigma_B^T - \sigma_B^{ucx}}{\sigma_B^{ucx}},$$

где  $\sigma_B^{ucx}$  – предел прочности сплава АМг6М в исходном состоянии;  $\sigma_B^T$  – предел прочности сплава АМг6М при заданной температуре  $T$ .

По результатам испытаний для каждого вида нагрева строились кривые релаксации напряжения  $S = f(T)$  в материале. На рисунке 1 для сравнения представлены кривые релаксации напряжения при нагреве электрическим током (кривая 1) и тепловым излучением (кривая 2), которые иллюстрируют нелинейный характер полученных зависимостей. Наглядно видно, что с повышением температуры действие электрического тока на релаксационные процессы заметно превышает тепловой эффект от нагрева в печи сопротивления.

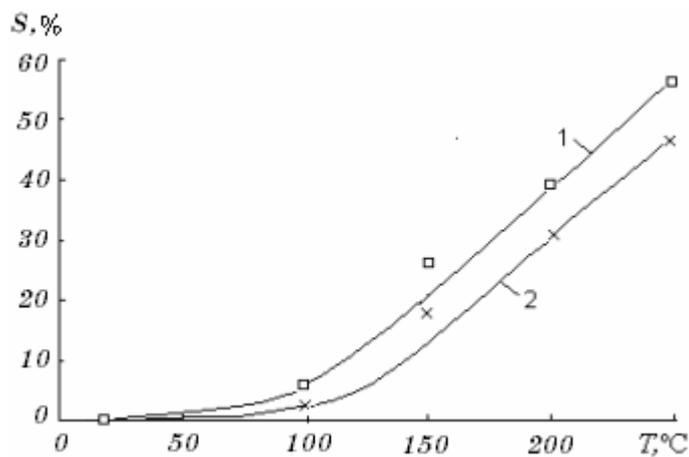


Рис.1

Одновременно исследовалось влияние вида нагрева на изменение характеристик микротвердости и ползучести сплава АМг6М. Экспериментально установлено, что кривые изменения микротвердости с увеличением температуры выше 100°C (рисунок 2), независимо от вида термического воздействия (кривая 1 – нагрев электрическим током, кривая 2 – нагрев в печи сопротивления), практически совпадают.

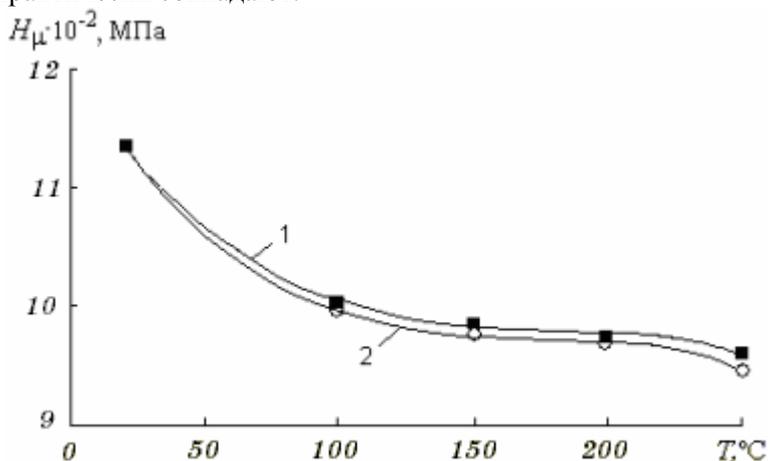


Рис. 2

Испытания на ползучесть проводились на образцах, предварительно подвергнутых деформационному упрочнению по следующему режиму: нагружение при одноосном растяжении до уровня  $P = 2100$  Н при температуре  $T = 160^\circ\text{C}$  с последующим действием сжимающей нагрузки  $P = 5 \cdot 10^5$  Н при температуре  $T = 250^\circ\text{C}$ . При этом одна часть образцов нагревалась путем пропускания электрического тока, другая – в печи сопротивления. Действие вида нагрева оценивалось по времени до разрушения образцов при аналогичных условиях выдержки в режиме ползучести.

Проведенная сравнительная оценка показала, что время до разрушения при тепловом излучении в среднем на 20% превышает этот показатель при нагреве материала электрическим током.

На втором этапе выполняемых работ исследовалось влияние вида нагрева на характеристики пластичности материала по данным испытаний на статическое растяжение образцов. С этой целью образцы подвергались деформационному упрочнению путем сжимающего нагружения до уровня  $P = 5 \cdot 10^5$  Н, после чего доводились до разрушения в условиях одноосного статического растяжения при температуре  $T = 250^\circ\text{C}$ .

Поскольку значения относительной деформации по длине рабочей части образца после его разрушения распределяются неравномерно, в качестве характеристик пластичности принимались величины поперечного сечения образца в области разрушения и на различном расстоянии от нее. Как правило, деформации по толщине и ширине в рабочей части образца не совпадают, поэтому для оценки влияния на материал вида нагрева использовались величины изменения толщины и ширины рабочей части образца относительно их первоначальных значений.

На рисунке 3 приведены зависимости относительной деформации образца по толщине  $\delta$  от расстояния  $L$  до места разрушения, полученные экспериментальным путем при испытании нескольких серий образцов (по 3 в каждой серии): после деформационного упрочнения (кривая 1), в исходном состоянии (кривая 2), после деформационного упрочнения при в печи сопротивления (кривая 3) и после деформационного упрочнения при эквивалентном нагреве электрическим током высокой плотности (кривая 4).

Проведенный сравнительный анализ кривых зависимости  $\delta = f(L)$  показал, что нагрев деформационно-упрочненных образцов электрическим током высокой плотности оказывает в большей степени пластифицирующее влияние на сплав АМгбМ, чем нагрев, стимулированный теплопередачей. Аналогичные результаты получены при оценке характера изменения относительной деформации материала по ширине рабочей части образца.

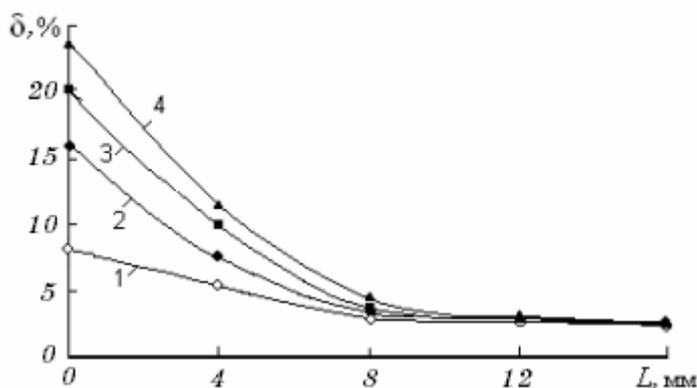


Рис. 3

Ввиду кратковременного действия повышенной температуры при нагреве электрическим током высокой плотности, можно сделать вывод, что вклад теплового эффекта в изменение свойств сплава АМгбМ в этом случае является пренебрежимо малым.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что нагрев путем пропускания электрического тока в большей степени влияет на релаксацию напряжений и восстановление пластичности в дефор-

мационно-упрочненном сплаве АМгбМ, чем нагрев в печи сопротивления при аналогичных температурных режимах. Другими словами, деформация, стимулированная нагревом электрическим током, больше деформации, вызванной эквивалентным тепловым излучением. Следовательно, можно предположить, что под действием электрического тока в сплаве АМгбМ на деформационные процессы влияют не только термические, но и электронно-дислокационные процессы.

1. *Спицын В. И.* Электропластическая деформация металлов / *В. И. Спицын, О. А. Троицкий.* – М. : Наука, 1985. – 160 с.
2. *Зуев Л. Б.* Действие процессов электрического тока на подвижность дислокаций в монокристаллах Zn / *Л. Б. Зуев, В. Е. Громов, Л. И. Гуревич* // *Металлофизика.* – 1990. – Т.12, №4. – С. 11 – 15.
3. *Степанов Г. В.* Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металле / *Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий* // *Проблемы прочности.* – 1996. – №2. – С. 68 – 72.
4. *Овчинников И. В.* Об определении ресурса пластичности при действии тока / *И. В. Овчинников* // *Пробл. прочности.* – 1993. – № 6. – С. 54 – 59.
5. *Степанов Г. В.* Изменение механических характеристик металлических материалов под действием импульсного электрического тока / *Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий* // *Проблемы прочности.* – 2002. – № 3. – С. 141 – 148.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 10.10.08  
в окончательном варианте 20.01.09