

Государственный контракт
от 26 ноября 2009 г. № П2600.

«Структурно-чувствительные эффекты скачкообразной деформации сплавов системы Al-Mg-Mn на субмикроскопическом и наноуровне».

Цель работ по проекту состоит в исследовании взаимосвязи динамических характеристик деформационных полос, их роли в образовании шейки и макроразрушении с микроструктурой материала в полосах и со структурой поверхности разрушения рекристаллизованного и искусственно состаренного алюминий-магниевого сплава, демонстрирующего прерывистую деформацию Савара-Массона.

В результате работ, проведенных по проблеме «Структурно-чувствительные эффекты скачкообразной деформации сплавов системы Al-Mg-Mn на субмикроскопическом и наноуровне», получены следующие основные результаты.

1. Разработана методика остановки полосы деформации в условиях мягкого режима нагружения, т.е. нагружения с постоянной скоростью возрастания напряжения в мягкой деформационной машине. Данная методика позволяет останавливать полосу макролокализованной деформации на фронте деформационного скачка для последующего исследования микроструктуры сплава Al-Mg в полосе деформации.
2. С помощью сканирующей электронной микроскопии рельефа поверхности деформированного образца алюминий-магниевого сплава АМг6 с полосой макролокализованной деформации установлено, что для структуры полосы характерны следы перерезания дислокациями крупных, размером около 1 мкм включений – частиц $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$ - фазы и наличие на границе между включениями и матрицей микротрещин размерами до ~ 1 мкм.
3. Исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии поверхности разрушения сплавов АМг5 и АМг6 с преципитатной микроструктурой, полученной искусственным старением при температуре 250 °С показали, что излом чашечный, характерный для вязкого разрушения сплава. Средний размер чашек около 1 мкм, т.е. значительно меньше размера зерна ~ 10 мкм. На дне крупных чашек, размером 2-4 мкм обнаружены частицы β -фазы размерами 0.3-0.8 мкм.
4. Исследование поверхности разрушения свежезакаленных образцов сплавов АМг5 и АМг6 со структурой собирательной рекристаллизации показали, что излом этих сплавов также чашечный, приблизительно с таким же средним размером чашек ~ 1 мкм, но с меньшим разбросом размеров чашек и отсутствием на дне чашек крупных частиц – частиц β -фазы. На дне некоторых чашек обнаружены частицы размером 80-

200 нм – видимо частиц Al_6Mn , которые растворяются в результате высокотемпературного отжига при 550 °С.

5. Установлено, что в сплаве АМг6 с преципитатной микроструктурой позиция магистральной трещины совпадает с начальной полосой локализованного сдвига – триггера развития последнего скачка деформации. Предполагается, что полоса-триггер, распространяющаяся со скоростью ~ 1 м/с при взаимодействии с преципитатами – частицами вторичной β (Al_3Mg_2)-фазы, – создает в плоскости распространения систему микротрещин, по которым пройдет магистральная трещина. Роль полос деформации состоит в том, что при пересечении границы распространяющейся полосы с этой системой микротрещин происходит их рост и последующее слияние в магистральную трещину.
6. Основные особенности пространственно-временной картины полос деформации и разрушения в сплаве АМг6 со структурой собирательной рекристаллизации состоят в том, что позиция магистральной трещины: 1) всегда совпадает с минимальным сечением шейки образца; 2) никогда не совпадает с позицией первичной полосы-триггера, с которой начинается последний скачок деформации, 3) проходит через сечение, наиболее интенсивно «обработанного» полосами деформации.
7. Разрушение рекристаллизованного сплава Al-Mg происходит как результат («катастрофа») каскадного размножения полос деформации – «цепной реакции» с коэффициентом около двух.
8. С помощью видеосъемки со скоростью 5000 кадр/с установлено, что трещина зарождается в центральной области шейки, где происходит наиболее интенсивная пластическая деформация, и выходит на поверхность образца со средней скоростью около $v_{cr} \approx 5$ м/с, соизмеримой со скоростью вершины полосы деформации Савара-Массона $v_t \approx 7$ м/с. Предполагается, что скорость вязкой трещины ограничена скоростью вершины деформационной полосы, которая подпитывает дислокациями ее вершину. Скорость вершины полосы Савара-Массона $v_t \sim 10$ м/с, – максимальная скорость пластического фронта, измеренная в экспериментах подобного рода, – является, видимо предельной скоростью пластической волны в данном материале.
9. На основе данных скоростной видеосъемки поверхности образцов сплавов АМг5 и АМг6 установлено, что шейка образуется в результате автолокализации полосы деформации из-за смены ее поступательного движения на осциллирующее с периодом колебаний угла полосы около 10 мс. Разрыв металла происходит после 4-6 осцилляций фронта полосы, центр тяжести которой остается неподвижным.

10. Установлено, что на стадии предразрушения (на последнем скачке деформации амплитудой $\sim 10\%$) сплава АМг6 с рекристаллизованной структурой события смены угла полосы автолокализуются вблизи центрального сечения образца, через которое пройдет магистральная трещина и образуют временной ряд, подчиняющийся степенной зависимости количества событий $N \sim \tau^{-m}$, (где $m \approx 0.7-1.1$) за время τ до момента разрушения, аналогичной закону Омори для мелких землетрясений – предвестников землетрясений большой магнитуды.
11. Скачкообразная составляющая деформации рекристаллизованного сплава АМг6, связанная с динамикой деформационных полос, с ростом деформации проявляет тенденцию к детерминированному хаосу: С позиции нелинейной динамики вязкое разрушение сплава АМг6 с рекристаллизованной зеренной структурой следует рассматривать как глобальную самоорганизацию в нелинейной неравновесной (диссипативной) системе, находящейся в состоянии детерминированного хаоса.
12. По результатам работы по проекту в 2011 году опубликована монография (А.А. Шибков, А.Е. Золотов, А.В. Шуклинов «Структурно-чувствительные эффекты прерывистой деформации промышленных сплавов Al-Mg». Тамбов: Издательский дом ТГУ им. Г.Р. Державина. 2011. 173 с.) и две статьи в журнале «Физика твердого тела» (1. А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6 // ФТТ. 2011. Т. 53. № 10. С.1873-1878, 2. А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов. Деформационный хаос и самоорганизация на стадии предразрушения сплава АМг6 // ФТТ. 2011. Т. 53. № 10. С.1879-1884), входящих в перечень ВАКа.

Результаты работ над проектом представляют интерес для ряда технических университетов, а также предприятий, связанных с разработкой и производством автомобилей и авиационной техники: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН (Москва), НИТУ МИСиС (Москва), ИПМ РАН (С.-Петербург), Самарский ГАУ им. С.Л. Королева, Казанский ГТУ им. А.А. Туполева, РКТУ им. К.Э. Циолковского, Тольяттинский государственный университет, ООО «Самарский инженерно-технический центр» и для промышленных предприятий – производителей листового проката алюминиевых сплавов, а также могут быть использованы в вузах в качестве материала для лекционных курсов физического материаловедения, читаемых студентам.

Список публикаций.

1. Шуклинов А.В., Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6// ФТТ, 2011, т. 53, вып. 10, с. 1873-1878.
2. Шуклинов А.В., Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Деформационный хаос и самоорганизация на стадии предразрушения сплава АМг6// ФТТ, 2011, т. 53, вып. 10, с. 1879-1884.
3. Шуклинов А.В., Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А. Структурно-чувствительные эффекты прерывистой деформации промышленных сплавов Al-Mg// Тамбов: издательский дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2011, 173 с.