

**СИСТЕМА РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ И ПОДАВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ,  
ВЫЗЫВАЮЩИХ КАТАСТРОФИЧЕСКУЮ ДЕГРАДАЦИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ  
ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ**

**Желтов М.А., Золотов А.Е., Казарцева Е.А., Шибков А.А.**

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия,  
E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru*

Пластическая деформация кристаллических материалов является неустойчивой и неоднородной на макро-, микро- и наноуровне. На макроуровне неустойчивое прерывистое пластическое течение металлов проявляется в виде известных эффектов Портевена-Ле Шателье и низкотемпературной скачкообразной деформации металлов при криогенных температурах при постоянной скорости деформирования в жесткой испытательной машине, а также в виде менее известного эффекта Савара-Массона – появление повторяющихся скачков деформации – ступеней на кривой деформации амплитудой несколько процентов при нагружении с постоянной скоростью роста напряжения, или в условиях ползучести. Эффекты прерывистой деформации наиболее ярко проявляются в алюминиевых сплавах авиакосмической отрасли (Al-Mg, Al-Li, Al-Zn-Cu-Mg и др.). Каждый скачок напряжения или деформации сопровождается образованием и распространением полос макролокализованной деформации, что нежелательно в технологическом аспекте, так как приводит к внезапному разрушению сплава.

Возможные варианты решения этой проблемы определяют следующие направления: а) разработка системы ранней эмиссионной диагностики предвестников развития опасных механических неустойчивостей, способных вызывать внезапное разрушение алюминиевых сплавов; б) исследование возможности высокоскоростной синхронизации эмиссионных сигналов, генерируемых на стадии зарождения опасных дефектов с системой подавления (залечивания) этих дефектов внешними физическими полями (в том числе, с использованием систем автоматического распознавания различных повреждений по эмиссионным сигналам и выбора типа устройства, способного подавлять эти повреждения) с целью предупреждения развития катастрофических механических неустойчивостей. Один из методологических подходов к исследованию возможности подавления локализации пластической деформации в полосах алюминий-магниевого сплава в условиях неустойчивого пластического течения заключается в изучении условий возникновения и регистрации эмиссионных сигналов – предвестников катастрофической деградации механических свойств – для запуска устройств подавления или дробления макроскопических скачков деформации внешними силовыми устройствами.

Для тестирования такого подхода разработан комплекс методов *in situ* исследования скачкообразной деформации металлов и динамики деформационных полос и трещин, включающий: 1) стенд механических испытаний; 2) систему пассивного неразрушающего контроля и непрерывного мониторинга деформационных полос и трещин на базе эмиссионных методов обнаружения этих дефектов, включающая систему анализа временных рядов; 3) систему пространственно-временного мониторинга деформационных полос на базе высокоскоростной съемки в оптическом и инфракрасном (тепловидение) диапазонах, включающую блок цифровой обработки изображений; 4) импульсный генератор физического поля для подавления повреждений; 5) систему отрицательной обратной связи эмиссионного сигнала и генератора физического поля (см. рис. 1).

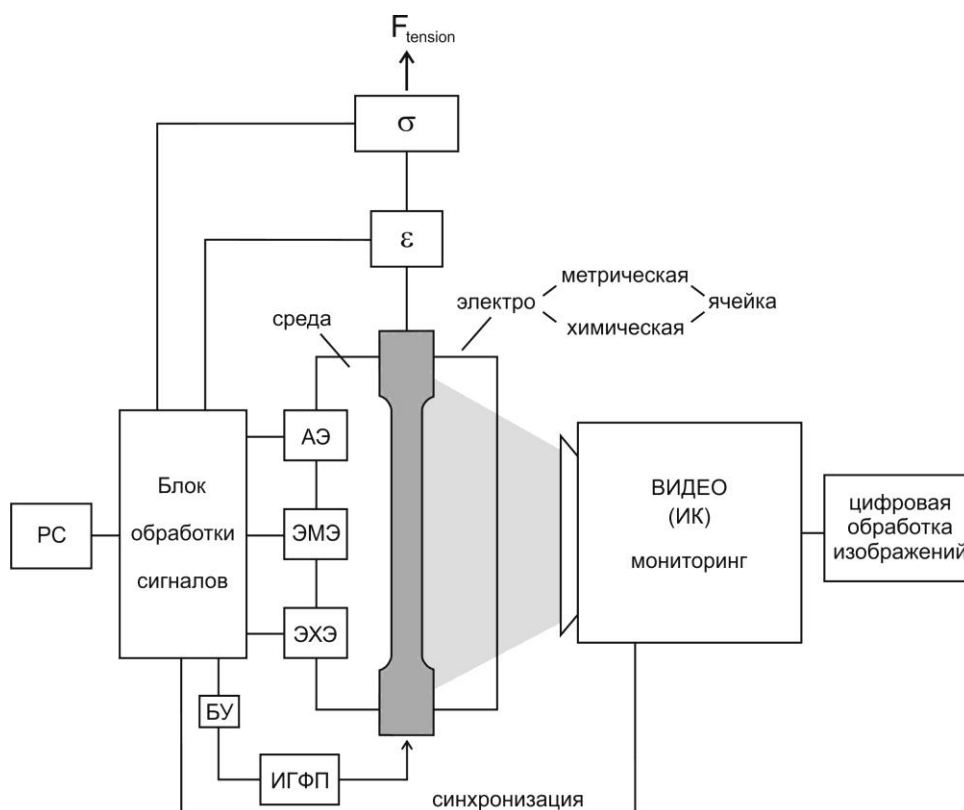


Рисунок 1 - Схема комплекса синхронизированных высокоскоростных *in situ* методов исследования скачкообразной деформации металлов и динамики деформационных полос, включающая систему высокоскоростного оптического (или ИК) мониторинга поверхности металла, электрометрическую (или электрохимическую) ячейку с датчиками акустической (АЭ), электромагнитной (ЭМЭ) или электрохимической (ЭХЭ) эмиссии при деформировании образца в газовой (или жидкой коррозионной) среде, систему измерения деформации  $\epsilon$ , механические напряжения  $\sigma$  и блок усиления и цифровой обработки сигналов, которые через блок управления (БУ) запускают импульсный генератор физического поля (ИГФП), подавляющего деформационные полосы и скачкообразную деформацию

На этом комплексе была апробирована система синхронизации различных временных фаз развития пластических неустойчивостей с электромагнитным генератором импульса сжатия, вызывающим подавление макронеустойчивостей в растягиваемом образце с использованием акустического сигнала-предвестника развития деформационного скачка (рис. 2). Плоские образцы промышленного сплава АМг6 в виде двухсторонних лопаток деформировались в условиях прерывистой ползучести. Для исследования акустического отклика на прерывистую ползучесть образца 1 использовали акустический датчик 2, который укрепляли на неподвижной лопатке образца, связанной с базой (станиной испытательной машины). Канал регистрации сигнала АЭ состоял из широкополосного высокоомного предусилителя 3 (полоса пропускания  $1-10^6$  Гц), коммутатора 4, многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 5 и компьютера 6. Сигналы АЭ, датчиков положения и усилия и сигнал скоростной видеокамеры 7 в виде меандра на частоте съемки синхронно записывались с помощью четырех каналов АЦП с тактовой частотой 100 кГц на канал. Скорость видеосъемки варьировали от 500 до 5000 кадр/с в зависимости от задач эксперимента (исследование различных стадий процесса полосообразования и т.д.).

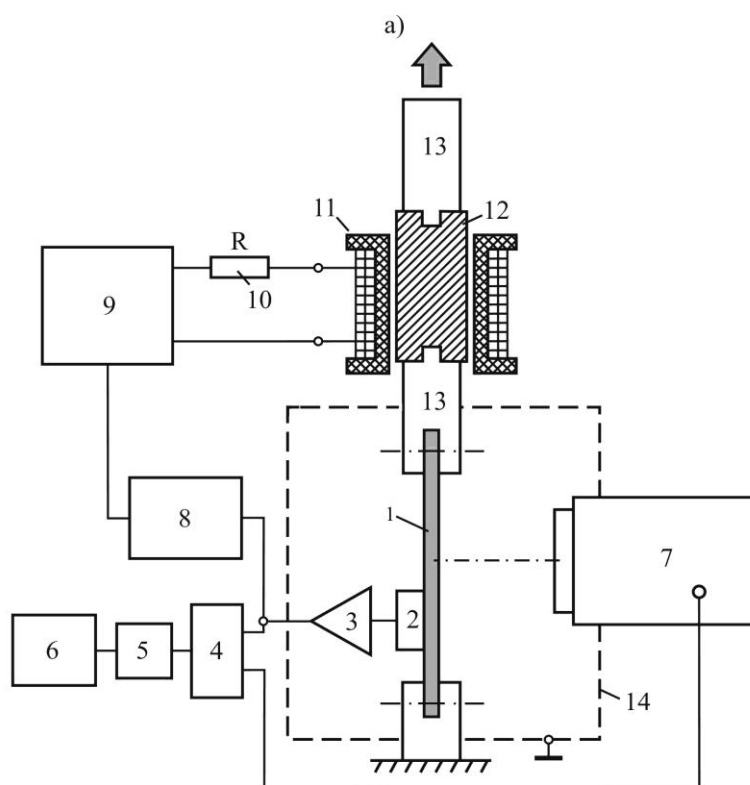


Рисунок 2 - Схема синхронизации акустического сигнала, связанного с зарождением первичной полосы с электромеханическим устройством подавления полосообразования и скачка деформации: 1 – образец, 2 – акустический датчик, 3 – предусилитель, 4 – коммутатор, 5 – АЦП, 6 – компьютер, 7 – видеокамера, 8 – блок управления, 9 – генератор прямоугольных импульсов тока, 10 – ограничительное сопротивление, 11 – катушка индуктивности, 12 – ферромагнитный (железный) шток, 13 – дюралюминиевый шток, 14 – экранированный корпус

Метод подавления деформационных скачков основан на схеме запуска от акустического сигнала (предвестника скачка деформации) блока 8 формирования прямоугольных импульсов тока (амплитудой  $\sim 10-100$  А), который включает блок задержки на время  $t_g$  (1-100 мс) между запускающим дискретным сигналом АЭ и импульсом тока и генератор 9 прямоугольного импульса тока с заданной длительностью фронта  $t_{fr}$  ( $\sim 1-10$  мс) и крыши  $\tau$  ( $\sim 0.1-10$  с), порядка и больше длительности деформационного скачка. Прямоугольные импульсы тока пропускались по катушке электромагнита 11, втягивающего ферромагнитный шток 12, который является составной частью подвижного штока 13 мягкой деформационной машины. Втягивание штока вызывает частичную разгрузку растягиваемого образца сразу после формирования первичной полосы, что, как предполагается, должно погасить скачок деформации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00304) с использованием оборудования ЦКП ТГУ им. Г.Р. Державина.*