

На правах рукописи

**ТРЕТЬЯКОВА Татьяна Викторовна**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ  
ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

**Научный  
руководитель**

**Вильдеман Валерий Эрвинович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Степанова Лариса Валентиновна,**  
доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
профессионального образования «Самарский  
государственный технический университет»

**Панин Сергей Викторович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заместитель директора по научной работе, заведующий  
лабораторией Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института физики прочности и  
материаловедения Сибирского отделения Российской  
академии наук

**Ведущая  
организация**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита диссертации состоится «\_\_» декабря 2014 года в \_\_:\_\_ на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики сплошных сред УрО РАН и на сайте <http://www.icmm.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

И.К. Березин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** К числу актуальных направлений исследований в области механики деформируемого твердого тела относится экспериментальное изучение и теоретическое описание закономерностей пластического деформирования. В научной литературе неоднократно отмечалось, что процессы пластического течения протекают неоднородно на различных этапах деформирования материала на всех масштабах наблюдения: от микро- до макроскопического уровня. Исследователи также сходятся во мнении, что пластическая деформация развивается неравномерно как в пространстве (локализация пластических деформаций), так и во времени (прерывистое деформирование).

Одним из ярких примеров пространственно-временной неоднородности является инициирование и распространение деформационных полос локализованного пластического течения материала (полосы Чернова-Людерса) на стадии формирования «зуба» и площадки текучести, явление прерывистого деформирования, известное в научной литературе как эффект Савара-Массона (при силовом нагружении) или эффект Портевена-Ле Шателье (при кинематическом нагружении). Формирование сужения, или «шейки», в поперечном сечении образца при одноосном растяжении также является примером неоднородного пластического деформирования на стадии разупрочнения материала перед макроразрушением образца.

Привлекает внимание многих исследователей характерная особенность поведения некоторых металлов и сплавов — явление запаздывания текучести, заключающееся в том, что растягиваемый образец может выдержать напряжение, превышающее обычный статический предел текучести в течение некоторого времени, называемого временем запаздывания, без заметных пластических деформаций.

Особый интерес вызывает вопрос влияния параметров нагружения: температуры, скорости внешнего воздействия, геометрии образцов, условий нагружения (кинематическое или силовое, свойства нагружающей системы, разгрузки и повторные нагружения) на эффекты пластического деформирования материалов.

Необходимо отметить большое значение оптических методов и средств неразрушающего контроля при изучении закономерностей пространственно-временной неоднородности пластического деформирования. В частности, активное применение бесконтактного метода корреляции цифровых изображений при проведении фундаментальных и прикладных исследований в области механики деформируемого твердого тела и материаловедения подтверждается увеличивающимся числом отечественных и зарубежных публикаций, а также конференций и семинаров, посвященных развитию данного научного направления.

Таким образом, к числу актуальных задач механики деформируемого твердого тела относится комплексное исследование механического поведения и выявление особенностей пластического деформирования конструкционных материалов на основе развития современных методов экспериментальной механики при совместном использовании испытательных систем, высокоточных средств измерений и бесконтактных систем регистрации деформационных полей.

**Целью работы** является экспериментальное изучение закономерностей механического поведения конструкционных материалов в условиях проявления пространственно-временной неоднородности пластического деформирования на основе применения бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы анализа полей деформаций.

#### **Основные задачи исследования:**

- анализ и решение методических вопросов использования бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы для анализа процессов возникновения и развития неоднородных полей перемещений и деформаций в условиях квазистатического деформирования металлических образцов;
- изучение особенностей механического поведения металлов на стадии формирования зуба и площадки текучести, а также в условиях проявления эффектов запаздывания текучести и прерывистого деформирования;
- анализ кинетики неоднородных полей неупругих деформаций в процессе возникновения и движения деформационных полос локализованного пластического течения;
- развитие модельных представлений о стадиях неупругого деформирования материалов и схематизация процессов макроскопической локализации пластических деформаций;
- оценка влияния условий нагружения, а также свойств нагружающей системы на проявления пространственно-временной неоднородности процессов неупругого деформирования металлов.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем.

1. Получены новые опытные данные об эволюции неоднородных полей деформаций и локальных скоростей деформирования углеродистой стали (сталь 20) и алюминиево-магниевого сплава (АМг2м) в испытаниях на одноосное растяжение в зависимости от условий и режимов нагружения: при силовом и кинематическом воздействиях, испытаниях с разгрузками и повторными нагружениями, при изменении скорости деформирования на стадии формирования площадки текучести.
2. Впервые отмечен квазипериодический характер развития неоднородности полей деформаций в процессе прерывистого пластического деформирования, заключающийся в чередовании стадий возникновения локальных зон активного пластического течения материала (инициирование и распространение деформационных полос) и стадий макроскопического выравнивания уровня деформации по образцу.
3. Впервые предложена и реализована методика исследования влияния свойств нагружающей системы на эффекты пространственно-временной неоднородности пластического течения на основе использования образцов с дополнительными участками деформирования, а также со специальной усложненной геометрией.
4. Предложены новые модельные представления о стадийности процессов неупругого деформирования металлов и схематизация механизмов макроскопической локализации пластических деформаций в условиях проявления деформации Чернова-Людерса и эффекта Портевена-Ле Шателье.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории (Центра экспериментальной механики ПНИПУ), соответствием результатов, полученных на основе различных методик, а также качественным и количественным соответствием отдельных результатов известным данным других авторов.

**Практическая ценность** работы состоит в развитии методологических основ применения современных высокоэффективных бесконтактных средств регистрации деформационных полей для изучения закономерностей неупругого поведения металлов в условиях проявления пространственно-временной неоднородности процессов пластического деформирования, формирования условий разрушения. Полученные данные могут быть использованы для развития и создания моделей неупругого поведения, а также при проектировании элементов ответственных конструкций и разработке технологических процессов обработки металлов.

**На защиту выносятся** совокупность новых экспериментальных данных, полученных на основе регистрации и анализа деформационных полей и иллюстрирующих закономерности пластического деформирования металлов (углеродистой стали и алюминиево-магниевого сплава) в условиях проявления эффектов запаздывания текучести и прерывистого деформирования в зависимости от геометрических параметров образцов, условий и режимов нагружения, а также от свойств нагружающей системы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 14 всероссийских и 12 международных научных конференциях и семинарах: 20-й Европейской конференции по разрушению — ECF20, (г. Тронхейм, Норвегия, 2014 г.); 16-й Международной конференции по экспериментальной механике — ICSEM16 (г. Кембридж, Великобритания, 2014 г.); Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2014 г.); Международной конференции по вычислительной механике материалов — IWCMM 23 (Сингапур, 2013 г.); Международной конференции «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» (г. Томск, 2013 г.); Международной конференции «Прочность, безопасность и разрушение материалов» — IRF 2013 (г. Фуншал, Португалия, 2013 г.); Зимних школах по механике сплошных сред (г. Пермь, 2011, 2013 гг.); Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2012 г.); Всероссийских школах-конференциях молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2009, 2011, 2012 гг.); Европейской конференции по композиционным материалам — ECCM15 (г. Венеция, Италия, 2012 г.); Международном семинаре по экспериментальной механике (г. Саутгемптон, Великобритания, 2012 г.); Второй международной конференции по моделированию материалов — EMMC'12 (г. Париж, Франция, 2011 г.); Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (г. Нижний Новгород, 2011 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2009, 2011 гг.); Школе-конференции «Актуальные проблемы в механике» (Санкт-Петербург, 2011 г.); Международном семинаре «Актуальные проблемы механики и физики мезоскопических систем» (г. Пермь, 2011 г.); Международной конференции по экспериментальной механике — ICSEM 2010 (г. Куала-Лумпур, Малайзия, 2010 г.); Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2010 г.); Петербургских чтениях по проблемам прочности, посвященные 130-летию со дня рождения академика АН УССР Н.Н. Давиденкова (Санкт-Петербург, 2010 г.); Международной молодежной научной конференции «XXXV Гагаринские чтения» (Москва, 2009 г.).

- Работа докладывалась в полном объеме на научных семинарах:
- кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ПНИПУ, руководитель — доктор физ.-мат. наук, профессор Ю.В. Соколкин;
  - Центра экспериментальной механики ПНИПУ, руководитель — доктор физ.-мат. наук, профессор В.Э. Вильдеман;
  - кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ПНИПУ, руководитель — доктор физ.-мат. наук, профессор П.В. Трусов;
  - Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, руководитель — академик РАН В.П. Матвеевко.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 11-08-07016, № 11-08-16042, № 12-08-31336, № 13-08-00304, № 13-08-96016, № 14-08-31387-мол (руководитель)); в рамках Федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (гос. контракт № 02.518.11.7135) и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (гос. контракт № 02.740.11.0157); в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2011, 2012 гг.); а также при выполнении гранта по постановлению Правительства РФ № 220 от 9 апреля 2010 года «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации» (договор № 14В.25.310006 от 24 июня 2013 года).

Работа поддержана стипендиями Президента РФ (2012 г., приказ Министерства образования и науки РФ от 29 октября 2012 г. № 873) и Правительства РФ (2013 г., приказ Министерства образования и науки РФ от 30 августа 2013 г. № 1028).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 33 работах, из них — 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК [1–8], включая 5 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в Scopus [1, 4–7], 3 публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ [11–13], 1 коллективная монография [9] и 1 учебное пособие [10].

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 111 рисунков и 17 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 171 страницу, библиографический список включает 194 источника.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечена актуальность темы диссертации, сформулированы цели, основные задачи работы, полученные в ней научные результаты, обоснованы их достоверность, новизна и практическая ценность. Приведены сведения об апробации работы, представлено краткое содержание глав диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу научных публикаций российских и зарубежных авторов, работы которых посвящены решению методологических вопросов и экспериментальному исследованию эволюции неоднородных полей в процессах пластического деформирования конструкционных материалов на основе использования оптических методов, включая метод корреляции цифровых изображений. Приведен краткий обзор явлений макролокализации пластического

течения. Отмечены актуальные направления исследований в области механики деформируемого твердого тела.

**Во второй главе** рассмотрены методические аспекты применения бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы Vic-3D для анализа процессов возникновения и развития неоднородных полей перемещений и деформаций в условиях квазистатического деформирования металлических образцов. Отработан алгоритм нахождения параметров численной обработки опытных данных методом корреляции цифровых изображений (размер подмножества, величина шага по координате), проведена оценка их влияния на точность анализа, сходимость решения, степень детализации полей деформаций.

С целью оценки достоверности данных, получаемых оптической системой, проведен ряд тестовых испытаний на одноосное растяжение плоских образцов из алюминиевого сплава с использованием дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр» и навесного динамического датчика осевых деформаций Instron 2620-601. Согласно сертификату заводских испытаний, зарегистрированное отклонение показаний датчика не превышает +0,059% и -0,022% от измеряемой величины.

Показано, что применение видеосистемы позволяет определять значения деформации на фиксированной базе с точностью сопоставимой с данными механического экстензометра. Кроме того, данная система обладает дополнительным преимуществом, так как позволяет зафиксировать эволюцию полей перемещений и деформаций, оценить характер неоднородности полей, отследить процессы деформирования материала, протекающие на поверхности образца.

**В третьей главе** содержатся результаты экспериментального изучения проявлений пространственно-временной неоднородности пластического течения на образцах углеродистой стали (сталь 20, ГОСТ 1050-88) и алюминиево-магниевого сплава (АМг2м, ГОСТ 4784-97) на стадии запаздывания текучести в испытаниях на одноосное растяжение при постоянных значениях скорости внешнего воздействия.

Проведены испытания на одноосное растяжение сплошных цилиндрических образцов с различной длиной рабочей части при постоянной скорости кинематического нагружения в диапазоне средней скорости деформирования от  $0,33 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $0,33 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Отмечена зависимость реализации площадки текучести и её протяженности на деформационных кривых от длины образцов. В результате анализа картин деформационных полей на поверхности образцов зафиксировано формирование и распространение полос локализованного пластического течения, или полос Чернова-Людерса, на стадии формирования зуба и площадки текучести (рис. 1).

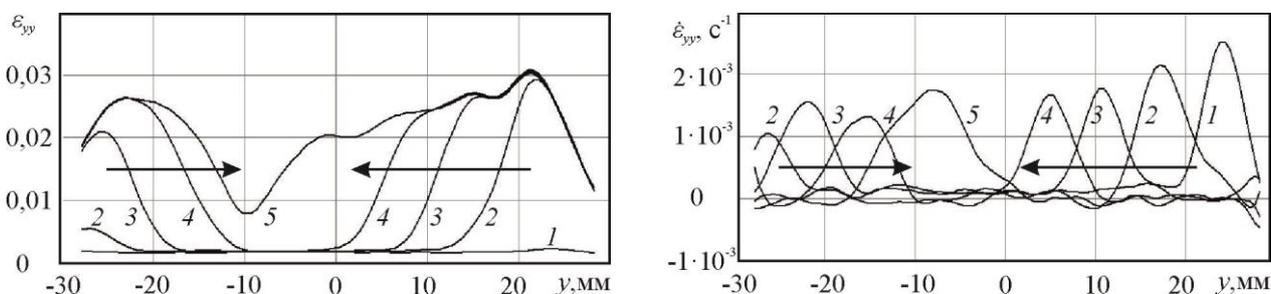


Рис. 1. Эпюры продольных деформаций и локальных скоростей продольного деформирования для образца с длиной рабочей части  $l_0 = 60 \text{ мм}$ , диаметром  $d_0 = 9,5 \text{ мм}$ , временной интервал между эпюрами 1-5 равен 13,75 секунды

Проведен анализ зависимости значений верхнего ( $\sigma_T^B$ ) и нижнего пределов текучести ( $\sigma_T^H$ ) от скорости деформирования материала, построены зависимости  $\sigma_T^B \sim \dot{\varepsilon}_0$  и  $\sigma_T^H \sim \dot{\varepsilon}_0$ , которые могут быть аппроксимированы линейными функциями:  $\sigma_T^B = 1,5 \cdot 10^4 \dot{\varepsilon}_0 + 340,7$  [МПа] и  $\sigma_T^H = 0,8 \cdot 10^4 \dot{\varepsilon}_0 + 322,3$  [МПа] соответственно.

Получены опытные данные о кинетике процессов возникновения и развития пространственно-временной неоднородности пластической деформации в зависимости от скоростных режимов испытания образцов. В частности, рассмотрен коэффициент неоднородности пластического деформирования ( $k_b$ ), равный отношению скорости перемещения захвата испытательной машины к скорости распространения фронта полосы Чернова-Людерса. По результатам серии испытаний средняя величина коэффициента неоднородности равна  $k_b = 0,024$ .

Реализована программа испытаний на одноосное растяжение при переменной скорости деформирования, с разгрузками и повторными нагружениями в процессе распространения полосы Чернова-Людерса (рис. 2). Времена  $t_1-t_6$  соответствуют моментам переключения скорости деформирования (рис. 2, а).

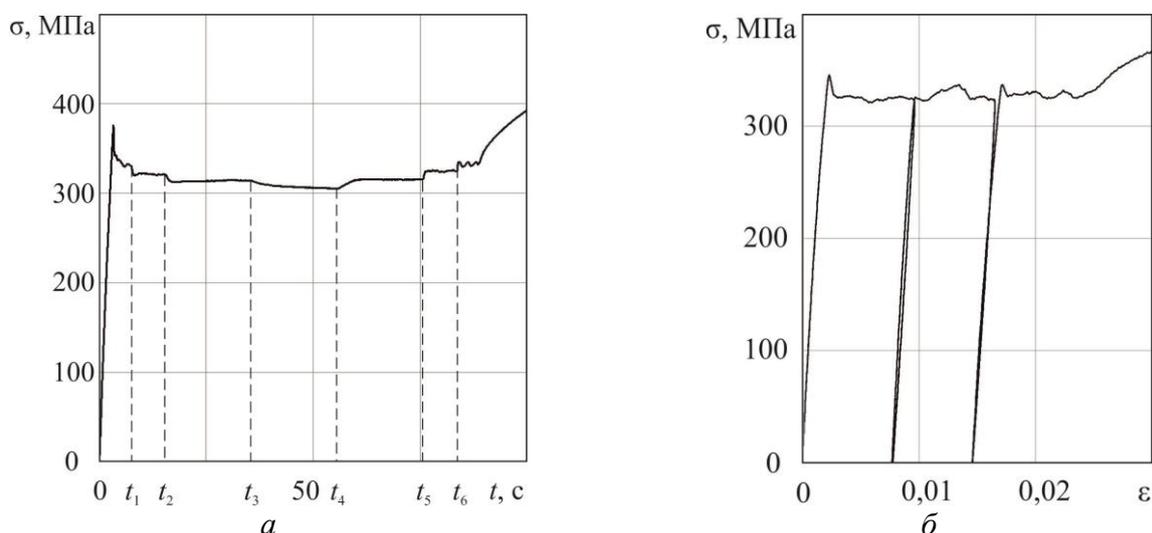


Рис. 2. Временная зависимость напряжения при испытании с переменной скоростью деформирования (а) и диаграмма деформирования с последовательными разгрузками и повторными нагружениями (б) на стадии формирования площадки текучести

Установлено, что величина нижнего предела текучести принимает значения, соответствующие заданной средней скорости деформирования. При изменении скорости движения захвата машины в процессе испытания, напряжение изменяется до величины, соответствующей текущей скорости.

В результате проведения испытаний с последовательными разгрузками и повторными нагружениями в процессе распространения фронта полосы пластической деформации на диаграмме деформирования при повторном нагружении образца зафиксировано повторное образование зуба текучести при достаточно длительном времени выдержки ( $t_6 = 138 \cdot 10^3$  с) образца в разгруженном состоянии (рис. 2, б). В научной литературе данное явление объясняется кинетикой атомов углерода в твердом растворе металла и высадением их на дислокациях, которые являются источниками концентрации напряжений.

Исследована пространственно-временная неоднородность пластического течения на плоских образцах алюминий-магниевого сплава на упругопластической

стадии деформирования в зависимости от скорости кинематического нагружения и геометрии образцов. Реализована скорость деформирования материала в диапазоне от  $1,67 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $33,33 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

С целью изучения процессов инициирования и распространения полос Чернова-Людерса в процессе формирования «зуба» и площадки текучести проведен анализ эволюции картин полей неупругих деформаций (рис. 3.).



Рис. 3. Неоднородное поле продольных деформаций при движении полосы Чернова-Людерса

Для серии образцов с длиной рабочей части  $l_0 = 50$  мм и шириной  $b_0 = 12$  мм средняя величина коэффициента неоднородности равна  $k_b = 0,010$ , а для образцов с  $b_0 = 20$  мм —  $k_b = 0,011$ . Максимальное отличие составило 23,4 %, получены величины одного порядка. Средняя величина продольной деформации после прохождения деформационной полосы составила  $\varepsilon_H = 1,26$  %.

На основе полученных данных отмечено, что величина деформации на фронте полосы Чернова-Людерса практически не зависит от скорости деформирования (в исследованном диапазоне), в связи с чем, увеличение скорости одноосного растяжения образца приводит к пропорциональному возрастанию скорости распространения деформационной полосы.

С целью выявления особенностей механического поведения исследуемых материалов на стадии формирования зуба и площадки текучести, а также для оценки характера неравномерности пластического деформирования предложено схематическое представление процессов макролокализации пластического течения.

Для описания механизмов макролокализации пластического деформирования предложены следующие параметры: деформация, накопленная до момента формирования полосы Чернова-Людерса ( $\varepsilon_\xi$ ), деформация, накопленная после её прохождения, или высота фронта ( $\varepsilon_H$ ), ширина фронта деформационной полосы ( $\delta_b$ ), скорость распространения полосы локализованного пластического течения по длине образца ( $v_b$ ), угол между фронтом полосы и осью  $Ox$  ( $\alpha$ ).

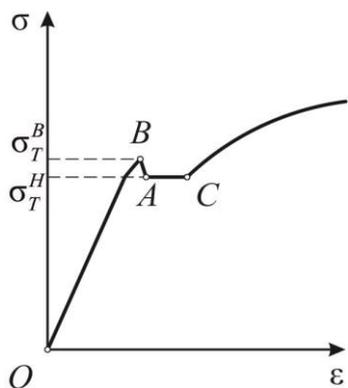


Рис. 4. Начальный участок диаграммы деформирования с «зубом» и площадкой текучести

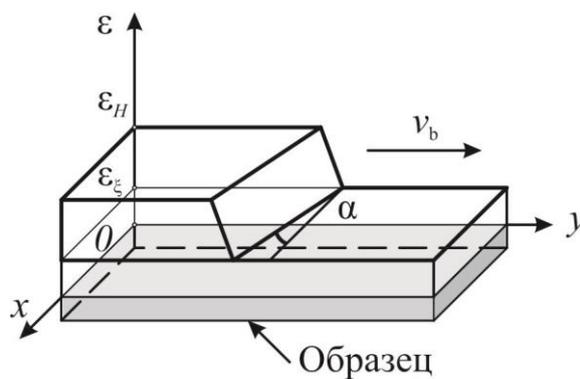


Рис. 5. Распределение продольной деформации на поверхности плоского образца в процессе формирования площадки текучести (участок AC)

На участке  $OB$  кривой  $\sigma \sim \varepsilon$  (рис. 4) до момента достижения верхнего предела текучести процесс деформирования является макрооднородным. Участок  $BA$  соответствует моменту перехода с верхнего на нижний предел текучести, при этом на образце формируется зона активного пластического деформирования материала. При дальнейшем нагружении область пластической деформации растет, фронт полосы, отделяющий упругую часть от пластической, продвигается вдоль образца в сторону противоположного захвата (рис. 5). В момент перехода на стадию упрочнения (точка  $C$ ) распределение полей деформаций становится вновь макрооднородным.

Проведена оценка влияния скорости внешнего воздействия и геометрии образцов на параметры, рассмотренные в работе. В частности, отмечено, что величина деформации, накопленной до момента формирования полосы Чернова-Людерса не зависит от скорости деформирования в диапазоне от  $1,67 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $33,33 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Средняя величина параметра по серии испытаний равна  $\varepsilon_{\xi} = 0,13 \%$ .

Обнаружена линейная зависимость коэффициента неоднородности пластического деформирования, характеризующего отношение скорости распространения полосы локализованного пластического течения к скорости перемещения захвата испытательной машин. Уровень продольных деформаций на фронте полосы Чернова-Людерса также не зависит от скорости нагружения.

**Четвертая глава** посвящена изучению закономерностей макроскопической локализации пластической деформации в условиях проявления прерывистой текучести алюминивно-магниевого сплава. В качестве примера на рисунке 6 приведены результаты построения неоднородных полей локальных скоростей по оси  $Ox$  ( $\dot{u}_x$ ), по оси  $Oy$  ( $\dot{u}_y$ ) и оси  $Oz$  ( $\dot{u}_z$ ) на поверхности плоских образцов сплава АМг2м при испытании на одноосное растяжение ( $\dot{\varepsilon}_0 = 16,67 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ). Ось  $Oz$  перпендикулярна плоскости образца.

Получены данные о развитии пластической деформации в процессе формирования и движения одиночных полос Портевена-Ле Шателье в соответствии с неравномерностью, регистрируемой на диаграмме нагружения (рис. 7).

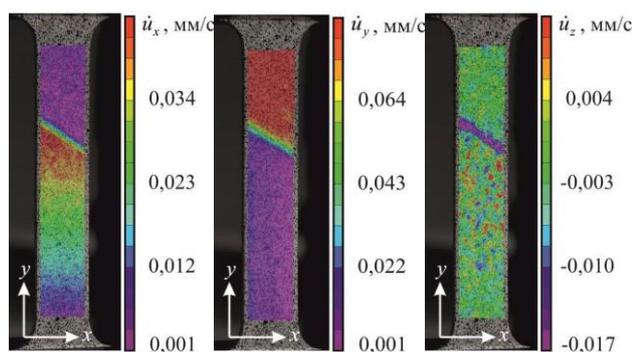


Рис. 6. Поля  $\dot{u}_x$ ,  $\dot{u}_y$  и  $\dot{u}_z$ , при распространении полосы Портевена–Ле Шателье по образцу

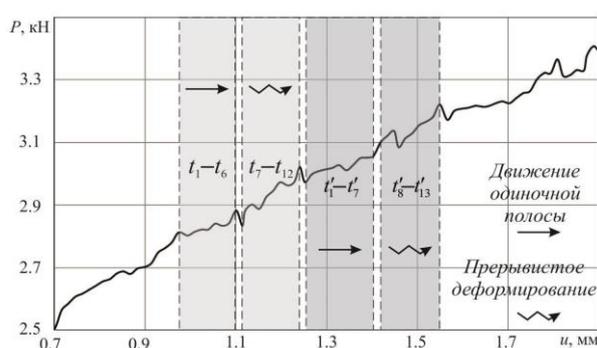


Рис. 7. Участок диаграммы нагружения плоского образца сплава АМг2м

Впервые отмечен квазипериодический характер развития неупругих деформаций в процессе прерывистого пластического деформирования исследуемого материала. На поверхности образца обнаруживается чередование стадий возникновения и развития локальных зон активного пластического течения, связанных с иницированием и распространением деформационных полос, и стадий макроскопического выравнивания уровня деформаций по образцу (рис. 8).

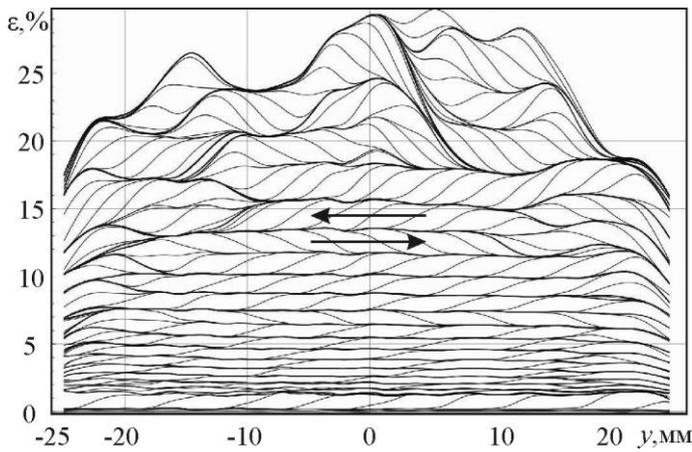


Рис. 8. Изменение распределения уровня продольной деформации по поверхности плоского образца с течением времени

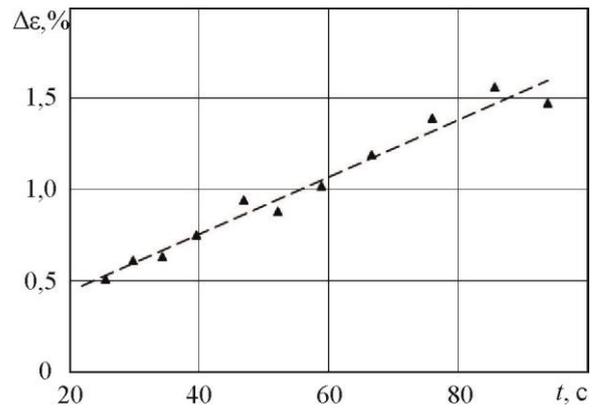


Рис. 9. Зависимость  $\Delta\varepsilon_{yy} \sim t$  для моментов периодического выравнивания уровня макродеформации

Для иллюстрации данной закономерности приведена временная зависимость изменения величины средней продольной деформации ( $\Delta\varepsilon_{yy}$ ) для моментов, соответствующих периодическому макроскопическому выравниванию уровня деформаций по образцу (рис. 9). Полученная линейная зависимость может быть аппроксимирована выражением:  $\Delta\varepsilon_{yy} = 0,016t + 0,13$  [%].

С целью оценки степени макролокализации пластического течения рассмотрена зависимость от времени коэффициента неоднородности пластического деформирования:  $k_{плш} = \varepsilon_{yy}^{\max} / \varepsilon_{yy}^{\text{mean}}$ , где  $\varepsilon_{yy}^{\max}$  — максимальное значение продольной деформации,  $\varepsilon_{yy}^{\text{mean}}$  — среднее значение деформаций для каждого кадра (рис. 10).

В случае макрооднородного распределения деформационных полей на поверхности исследуемого образца значение коэффициента близко к единице. При возникновении зоны активного пластического деформирования на кривой регистрируется резкий скачок, так как деформация на фронте полосы значительно выше. По мере распространения полосы вдоль образца и выравнивания уровня продольных деформаций наблюдается постепенное снижение величины коэффициента. С возрастанием уровня макродеформации амплитуда скачков возрастает, увеличивается и временной интервал между ними.

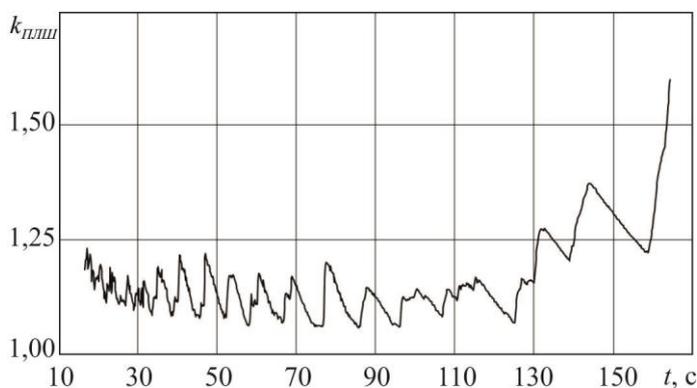


Рис. 10. Зависимость  $k_{плш}$  при проявлении эффекта Портевена-Ле Шателье от времени

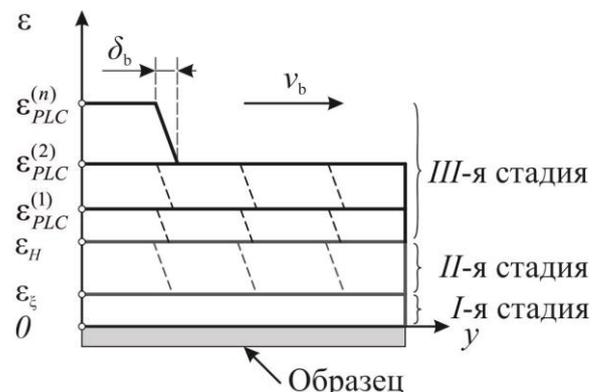


Рис. 11. Квазипериодический характер развития неоднородности полей деформаций в процессе деформирования алюминиево-магниевого сплава

Предложено модельное представление о стадийности неупругого деформирования и схематизация процессов макроскопической локализации пластического течения материала. Проведен анализ параметров, характеризующих механизмы макролокализации пластического течения, в соответствии с отмеченными стадиями: стадия макрооднородного деформирования материала (*I*-я стадия), стадия возникновения и распространения полосы Чернова-Людерса (*II*-я стадия), стадия возникновения и движения полос Портевена-Ле Шателье (*III*-я стадия), стадия формирования «шейки» в поперечном сечении образца на заключительной стадии деформирования (*IV*-я стадия) (рис. 11).

**В пятой главе** содержатся новые результаты экспериментального исследования особенностей неупругого деформирования алюминиево-магниевого сплава (АМг2м) в зависимости от свойств нагружающей системы.

Получены опытные данные (диаграммы деформирования, картины деформационных полей), иллюстрирующие закономерности прерывистой текучести в условиях проявления эффекта Савара-Массона (при «мягком» нагружении) и эффекта Портевена-Ле Шателье (при «жестком» нагружении).

Реализованы механические испытания на одноосное растяжение плоских образцов с заданной скоростью перемещения траверсы  $\dot{\epsilon}_0 = 5,0$  мм/мин (рис. 12, *а*) и с заданной скоростью увеличения нагрузки  $\dot{P}_0 = 2,1$  кН/мин (рис. 12, *б*).

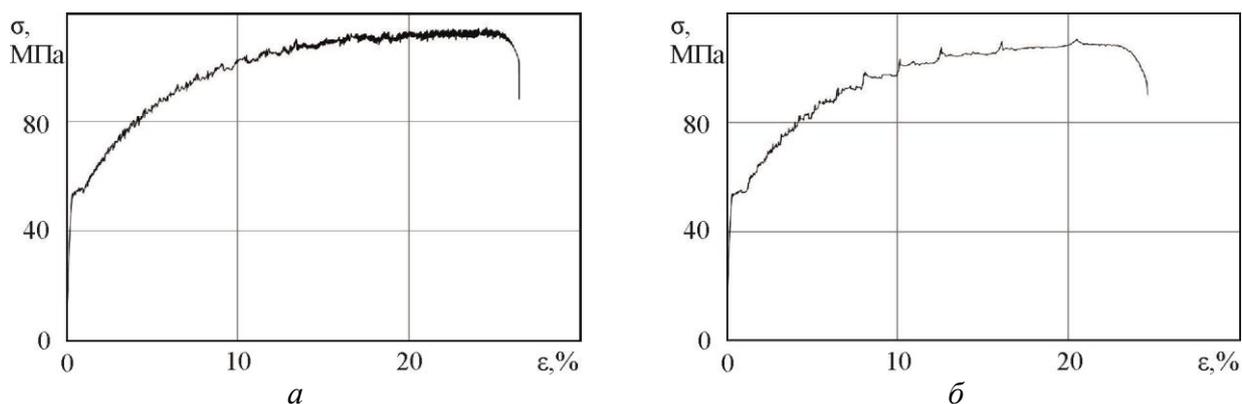


Рис. 12. Диаграммы деформирования при кинематическом (*а*) и силовом (*б*) нагружении (плоские образцы с  $l_0 = 50$  мм,  $b_0 = 8$  мм,  $h_0 = 2$  мм)

В случае силового нагружения на кривой деформирования регистрируется чередование резких скачков по напряжению и горизонтальных участков — образование «ступенек». С увеличением уровня конечной деформации материала «эффект лестницы» становится более выраженным. Формирование «ступенек» на диаграмме «напряжение-деформация» сопровождается незначительным падением нагрузки при переходе на горизонтальный участок. Данное явление обусловлено особенностью реализации программы нагружения испытательной системой и частотными параметрами обратной связи (ПИД-параметры) машина-контроллер

Наряду с анализом диаграмм «напряжение-деформация» и формообразования «зубцов» («ступенек») при прерывистом деформировании представляет интерес изучение механизмов развития неупругой деформации в результате возникновения полос локализованного пластического течения в зависимости от условий реализации механического нагружения. Вертикальный скачок напряжения на кривой «удлинение-время» (рис. 13) соответствует возникновению полос локализованного пластического течения и развитию зоны активного пластического деформирования (рис. 14). В то же

время горизонтальные участки сопровождаются макроскопическим однородным деформированием.

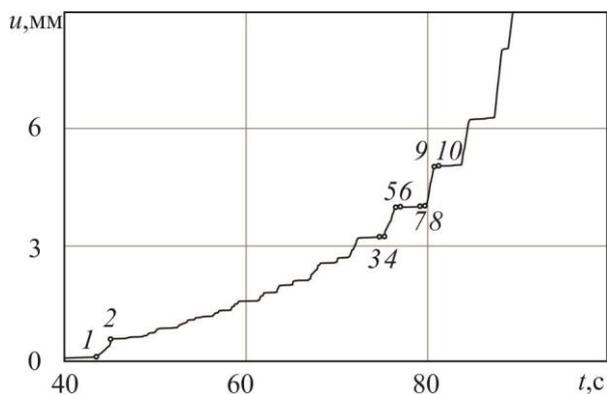


Рис. 13. Временная зависимость удлинения образца при «мягком» нагружении

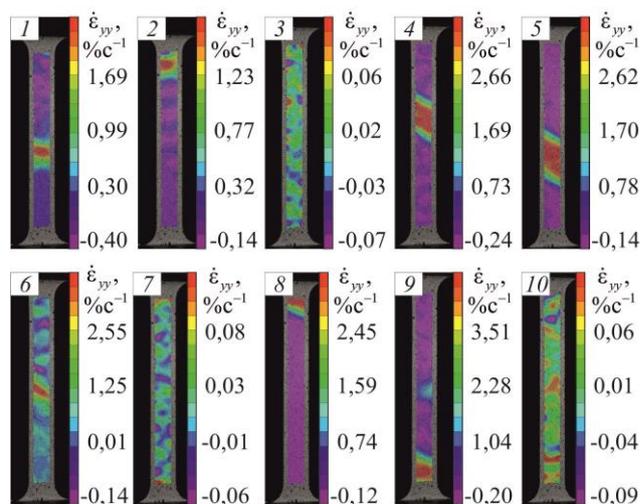


Рис. 14. Эволюция полей локальных скоростей продольного деформирования

Получены новые результаты экспериментального изучения особенностей прерывистого деформирования исследуемого материала в зависимости от свойств нагружающей системы ( $R_{НС} = 55,8 \div 83,6$  МН/м) с использованием плоских образцов с дополнительными деформируемыми участками.

На основе результатов построения серии эпюр деформаций и временных зависимостей коэффициента неоднородности пластического деформирования можно сделать заключение о том, что нагружающая система (в исследованном диапазоне жесткостных характеристик) не оказывает существенного влияния на неравномерность пластического деформирования исследуемого материала. При этом сохраняется эффект квазипериодической гомогенизации пластических деформаций в процессе одноосного растяжения в условиях проявления прерывистой текучести.

Использование образцов с дополнительными участками деформирования позволяет проводить экспериментальное исследование влияния свойств нагружающей системы в условиях снижения её жесткостных характеристик по отношению к рабочей части. С целью изучения влияния жесткости нагружающей системы на закономерности проявления макролокализации пластического деформирования в более широком диапазоне величин  $R_{НС}$  в настоящей работе реализована методика проведения испытаний на образцах специальной усложненной конфигурации, предложенной ранее в работах Чаусова Н.Г., Лебедева А.А.

Получены новые данные (диаграммы деформирования, неоднородные поля деформаций) о закономерностях эффекта Портевена-Ле Шателье в диапазоне жесткостей нагружающей системы (по отношению к рабочей части образца)  $R_{НС} = 58,3 \div 177,9$  МН/м (рис. 15, рис. 16).

На диаграммах нагружения образцов специальной конфигурации, несмотря на сложность их геометрии, наблюдается ярко выраженная стадия формирования площадки текучести, а также эффект прерывистого деформирования на стадии упрочнения материала (рис. 15). Можно отметить, что характеристики нагружающей системы оказывают влияние на амплитуду срывов нагрузки, или «скачков», на диаграммах нагружения. При этом, чем выше уровень жесткости нагружающей системы по отношению к рабочей части образца, тем больше амплитуда «зубцов».

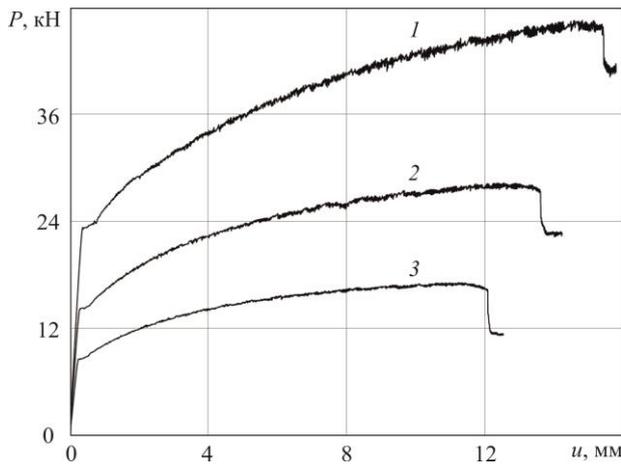


Рис. 15. Диаграммы нагружения образцов специальной геометрии

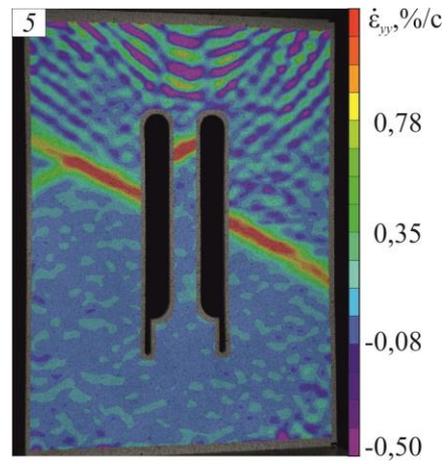


Рис. 16. Поле  $\dot{\epsilon}_{yy}$  при одноосном растяжении образца специальной геометрии

На основе результатов испытаний опытных образцов специальной усложненной геометрии можно сделать вывод об эффективности предлагаемой методики экспериментального изучения закономерностей макроскопической локализации пластического деформирования с учетом действительных свойств нагружающих систем.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

1. Рассмотрены методические аспекты применения бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы для анализа процессов возникновения и развития неоднородных полей перемещений и деформаций в условиях квазистатического деформирования металлических образцов. Отработан алгоритм нахождения параметров численной обработки опытных данных методом корреляции цифровых изображений, проведена оценка их влияния на точность анализа, сходимость решения, степень детализации полей деформаций.

2. Получены новые опытные данные о проявлениях пространственно-временной неоднородности пластического течения углеродистой стали (сталь 20) и алюминиево-магниевого сплава (АМг2м) на стадии запаздывания текучести в испытаниях на одноосное растяжение при постоянных значениях скорости внешнего воздействия. Проведен анализ диаграмм деформирования, картин полей продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, а также локальных скоростей деформирования и их зависимостей от времени.

3. Проведены экспериментальные исследования закономерностей механического поведения углеродистой стали в зависимости от геометрических параметров образцов и режимов нагружения на стадии запаздывания текучести. Реализована программа испытаний на одноосное растяжение при переменной скорости деформирования, с разгрузками и повторными нагружениями в процессе распространения полос Чернова-Людерса.

4. Получены новые результаты, характеризующие неоднородность пластического деформирования алюминиево-магниевого сплава при одноосном растяжении плоских образцов в условиях проявления эффекта Портевена-Ле Шателье. Впервые отмечен квазипериодический характер развития неоднородности полей деформаций при прерывистом пластическом деформировании, заключающийся в чередовании стадий возникновения и развития локальных зон активного пластического течения материала (инициирование и распространение деформационных полос) и стадий макроскопического выравнивания уровня деформации по образцу.

5. Предложено модельное представление о стадийности неупругого деформирования и схематизация процессов макролокализации пластического течения в условиях проявления деформации Чернова-Людерса и эффекта Портевена-Ле Шателье. Введен ряд параметров, описывающих характер развития неоднородности деформационных картин в соответствии с отмеченными стадиями. Проведена оценка влияния геометрии образцов и скорости внешнего воздействия на рассмотренные параметры.

6. Получены новые экспериментальные данные изучения влияния жесткости нагружающей системы на эффекты пространственно-временной неоднородности пластического течения алюминиево-магниевого сплава на основе использования опытных образцов с дополнительными деформируемыми участками, а также образцов со специальной усложненной геометрией. Проведена оценка влияния свойств нагружающей системы на квазипериодический характер развития неоднородности полей деформаций.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вильдеман В.Э., Санникова (Третьякова) Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2010. — №5. — С. 106–111.  
*Переводная статья:* Vil'deman V.E., Sannikova (Tretyakova) T.V., Tretyakov M.P. Experimental investigation of material deformation and failure regularities in a flat stressed state // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2010. — Volume 39, Issue 5. — P. 492–496. DOI 10.3103/S1052618810050146 (Scopus).
2. Вильдеман В.Э., Ипатова А.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Механика закритического деформирования и нелокальность условий разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 4, часть 5. — С. 2063–2065.
3. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Экспериментальное исследование механизмов развития трещин при сложных режимах нагружения методом корреляции цифровых изображений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2012. — Т. 78. — № 6. — С. 54–58.
4. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Experimental investigation of space-time inhomogeneity at elasto-plastic and postcritical deformation processes of materials by digital image correlation technique // Proc. of ECCM15: European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012. — Paper ID: 1126. — ISBN 978-88-88785-33-2 (Scopus).
5. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique // Fracture and Structural Integrity. — 2013. — № 24. — P. 1–6. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.01 (Scopus).
6. Третьякова Т.В., Спаскова Е.М. Экспериментальное исследование предельных напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2013. — № 2. — С. 186–198 (Scopus).

7. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Study of spatial-time inhomogeneity of serrated plastic flow Al-Mg alloy: using DIC-technique // *Fracture and Structural Integrity*. — 2014. — № 27. — P. 83–97. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.27.10 (Scopus).
8. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // *Вычисл. мех. сплош. сред.* — 2014. — Т. 7, № 2. — С. 162–171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.17.

### **Коллективная монография и учебное пособие**

9. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. и др. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 204 с.
10. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Третьякова Т.В., Ипатов А.В., Словиков С.В., Лобанов Д.С. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / Под ред. В.Э. Вильдемана. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. — 165 с.

### **Статьи в прочих изданиях и материалы конференций**

11. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // *Вестник ПГТУ. Механика*. — 2011. — №2. — С.92–100.
12. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых изображений // *Вестник ПГТУ. Механика*. — 2011. — №4. — С.15–28.
13. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учёт жёсткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // *Вестник ПНИПУ. Механика*. — 2012. — №2. — С.34–49.
14. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Influence of mechanical parameters on wave effects of plastic yielding localization of aluminium-magnesium alloy: the application of digital image correlation // *Recent Advances in Integrity-Reliability-Failure* — INEGI, 2013. — P. 73–74. — ISBN 978-972-8826-27-7.
15. Tretyakova T.V., Wildeman V.E. Observation of the Space-time Inhomogeneity of Serrated Plastic Flow in Aluminum-magnesium Alloy: Using the Digital Image Correlation // *23th International Workshop on Computational Mechanics of Material, National University of Singapore, 2-4 October 2013*. — Singapore, 2013. — P. 33.

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2014 г.

Формат 60 x 90/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_ /2014.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства  
Пермского национального исследовательского политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский, 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33