

Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Лунегова Е.М. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на эффекты прерывистой текучести и кинетику полосообразования в сплаве АМг6б // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 4. – С. 122–135. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.12

Tretyakova T.V., Tretyakov M.P., Lunegova E.M. Influence of the stress-strain state on the jerky flow effects and kinetics of the strain bands nucleation in Al-Mg alloy (A 95456). *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 4, pp. 122-135. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.12



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.12

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЭФФЕКТЫ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ И КИНЕТИКУ ПОЛОСООБРАЗОВАНИЯ В СПЛАВЕ АМГ6Б

Т.В. Третьякова, М.П. Третьяков, Е.М. Лунегова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 23 ноября 2021 г.  
Принята: 2 декабря 2021 г.  
Опубликована: 30 декабря 2021 г.

#### Ключевые слова:

прерывистая текучесть, эффект Портевена – Ле Шателье, локализация деформаций, полосообразование, сложное напряженное состояние, метод корреляции цифровых изображений, акустическая эмиссия, алюминивно-магниевый сплав.

### АННОТАЦИЯ

Целью работы является развитие методических основ экспериментального изучения процессов неупругого деформирования современных конструкционных металлических материалов при различных видах напряженно-деформированного состояния. Рассмотрена методика, основанная на применении оригинальных образцов специализированной усложненной геометрии, в рабочей зоне которых реализуется контролируемое двухосное напряженное состояние, и использовании бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы регистрации и анализа полей перемещений и деформаций Vis-3D, основанной на методе корреляции цифровых изображений.

Предложено использование образцов переменной толщины в форме пластин, расположенных внутри жесткого кругового обода и обода обратной кривизны. При одноосном растяжении данных образцов в центральной зоне пластины (рабочей части образца) реализуется плоское напряженное состояние с главными напряжениями разных знаков в зависимости от формы и жесткости обода. В рабочей части пластины с ободом в форме кольца реализуются растягивающие усилия в продольном направлении и сжимающие усилия в поперечном направлении за счет искривления кругового обода и его сужения в поперечном направлении. В пластине с жестким ободом обратной кривизны в рабочей части реализуется двухосное растяжение.

В результате экспериментального исследования показана высокая эффективность применения предложенной методики для решения задач механики деформируемого твердого тела, в частности для изучения процессов макроскопической локализации пластического течения Al – Mg-сплавов (АМг6б) в условиях проявления эффекта Портевена – Ле Шателье. С использованием видеосистемы получены опытные данные о реализованном соотношении компонент деформаций (продольных и поперечных деформаций) в рабочей зоне образцов. Проведен анализ кинетики полосообразования и деформации прерывистой текучести, происходящей в условиях плоского напряженного состояния. Применение системы Valen Amsy-6 позволило получить данные о возникновении сигналов акустической эмиссии, сопровождающих наблюдаемые процессы неупругого деформирования материала. Построены и проанализированы графики зависимости энергетического параметра и частотные характеристики сигналов акустической эмиссии от времени.

© ПНИПУ

© Третьякова Татьяна Викторовна – к.ф.-м.н., доц., e-mail: [cem\\_tretyakov@mail.ru](mailto:cem_tretyakov@mail.ru), [iD: 0000-0002-6072-3310](https://orcid.org/0000-0002-6072-3310).

Третьяков Михаил Павлович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: [cem\\_tretyakov@mail.ru](mailto:cem_tretyakov@mail.ru), [iD: 0000-0001-6146-6769](https://orcid.org/0000-0001-6146-6769).

Лунегова Екатерина Михайловна – м.н.с., e-mail: [cem.zubova@mail.ru](mailto:cem.zubova@mail.ru), [iD: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).

Tatiana V. Tretyakova – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [cem\\_tretyakov@mail.ru](mailto:cem_tretyakov@mail.ru), [iD: 0000-0002-6072-3310](https://orcid.org/0000-0002-6072-3310).

Mikhail P. Tretyakov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [cem\\_tretyakov@mail.ru](mailto:cem_tretyakov@mail.ru), [iD: 0000-0001-6146-6769](https://orcid.org/0000-0001-6146-6769).

Ekaterina M. Lunegova – Junior Researcher, e-mail: [cem.zubova@mail.ru](mailto:cem.zubova@mail.ru), [iD: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE ON THE JERKY FLOW EFFECTS AND KINETICS OF THE STRAIN BANDS NUCLEATION IN AL-MG ALLOY (A 95456)

T.V. Tretyakova, M.P. Tretyakov, E.M. Lunegova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 23 November 2021  
Accepted: 02 December 2021  
Published: 30 December 2021

#### Keywords:

jerky flow, the Portevin – Le Chatelier effect, strain localization, strain band nucleation, combined stress state, digital image correlation technique, acoustic emission, aluminum-magnesium alloy.

### ABSTRACT

The aim of the work is to develop a technique on the experimental study of inelastic deformation of structural metal materials in various types of stress-strain state. A technique is proposed based on the use of original samples of specialized complicated geometry, in the working zone of which a controlled biaxial stress state is realized, and the use of a contactless 3D digital image correlation measurement system Vic-3D for recording displacement and deformation fields.

The authors proposed the use of original samples of variable thickness in the form of plates located inside a rigid circular rim and a rim of reverse curvature. Under uniaxial tension of these samples in the central area of the plate (working part of the sample), the plane stress state is realized with principal stresses of different signs, depending on the shape and rigidity of the rim. In the working part of the plate with a ring-shaped rim, tensile forces in the longitudinal direction and compressive forces in the transverse direction are realized due to the curvature of the circular rim and its narrowing in the transverse direction. In a plate with a rigid rim of reverse curvature, biaxial tension is realized in the working section.

High efficiency of the proposed experimental technique has been shown to solve problems in the mechanics of solids, in particular, to study the processes of macroscopic localization of plastic flow in Al-Mg alloys (AlMg6) under the conditions of the Portevin – Le Chatelier effect. Using a video system, experimental data of the realized ratio of the deformation components (longitudinal and transverse deformations) in the working zone of the samples were obtained. The analysis of the kinetics of band formation and discontinuous yield strain occurring under conditions of a plane stress state has been carried out. The use of the Vallen Amsy-6 system made it possible to obtain data on the occurrence of acoustic emission signals accompanying the observed processes of inelastic deformation of the material. The graphs of the dependence of the energy parameter and frequency characteristics of acoustic emission signals on time have been constructed and analyzed.

© PNRPU

### Введение

К числу актуальных направлений исследований в области механики деформируемого твердого тела относятся развитие методических основ экспериментального изучения современных конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях, близких к условиям их эксплуатации в конструкциях. При этом трудности создания контролируемого сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) в материалах в условиях лабораторных исследований сопряжены с техническими ограничениями нагружающих систем, типами используемых образцов, способами регистрации и интерпретации опытных данных. К настоящему времени предложены и применяются различные методики испытаний материалов в условиях сложного напряженного состояния (СНС), использующие как образцы различной геометрической формы, так и различные способы создания в рабочей части контролируемого сложного напряженного состояния [1–4]. Первые испытания материалов, в частности кристаллов каменной соли и мраморных образцов, под гидростатическим давлением реализованы Киком [1], Бриджмен занимался исследованиями при высоких давлениях с применением жидкостных мультипликаторов [2, 5]. Широкое распространение получили методы испытания об-

разцов при двухосном растяжении [6–9]. Для проведения таких экспериментов используются крестообразные образцы в виде прямоугольника или параллелограмма, имеющие по сторонам специальные захваты для приложения растягивающих усилий, обеспечивающие равномерность распределения нагрузки. Методы испытаний крестообразных образцов позволяют реализовать двухосное растяжение при отсутствии градиентов напряжений по толщине стенки, однако они наиболее пригодны для испытаний упрочняющихся материалов. Главным ограничением применения таких методик является необходимость использования экспериментальных установок, включающих в себя две оси нагружения.

Существует методика получения СНС на плоских тонких образцах, защемленных по контуру и нагружаемых равномерно распределенным давлением, например жидкостью или газом. Испытания методом выпучивания могут проводиться как на плоских образцах, так и на образцах в виде полых шаровых сегментов, которые позволяют снизить влияние краевых эффектов в зоне закрепления. Для получения СНС с различным соотношением главных напряжений используют прижимную шайбу с контуром в виде эллипса, испытания плоских образцов с узкой поперечной двухсторонней выточкой и цилиндрических образцов с острыми кольцевыми надрезами [1]. Соотношение главных компонент тензо-

ра напряжений меняется за счет геометрии надрезов. Напряженное состояние в окрестности выточки можно менять от линейного (мелкая «поверхностная» выточка) до объемного за счет увеличения глубины выточки. Однако анализ НДС в таких экспериментах, особенно на стадии упругопластического деформирования, существенно затруднен, поэтому применяется при исследовании некоторых частных задач прочности конструкций.

Широкое применение в практике механических испытаний материалов в условиях СНС нашел метод испытания тонкостенных трубчатых образцов при совместном действии растяжения, кручения и внутреннего давления [10–16]. Это объясняется, прежде всего, тем, что на трубчатых образцах обеспечивается широкий диапазон напряженных состояний и реализуются различные комбинации компонент напряжений. Одновременное нагружение растягивающим усилием, внутренним давлением и крутящим моментом связано с определенными техническими трудностями обеспечения герметичности внутреннего пространства трубчатого образца и опасностью разрушения образца при испытании. Напряженное состояние в образце создается обычно комбинацией растяжения с кручением или растяжения с внутренним давлением. Методика испытания при совместном растяжении и кручении широко применяется исследователями для проведения как квазистатических, так и циклических испытаний. В некоторых задачах, в частности, для исследования процессов неупругого деформирования [17, 18] и разрушения, используется метод растяжения с кручением сплошных цилиндрических образцов [11, 16].

В данном исследовании предлагается использование одноосного растяжения образцов специализированной усложненной геометрии, в рабочей зоне которых реализуется контролируемое двухосное напряженное состояние, в частности использования образцов в форме круговых пластин, расположенных внутри жесткого кругового обода и обода обратной кривизны. При одноосном растяжении данных образцов в центральной области пластины (рабочей части) реализуется плоское напряженное состояние с главными напряжениями разных знаков. Использование таких образцов предложено ранее [19–22], однако применение современного испытательного и диагностического оборудования, в частности бесконтактной трехмерной видеосистемы регистрации и анализа полей перемещений и деформаций, основанной на методе корреляции цифровых изображений [23], существенно расширяет спектр научных и прикладных исследований, которые могут выполняться с использованием этих подходов. Такая методика, дополненная инфракрасной термографией и регистрацией сигналов акустической эмиссии, может эффективно применяться для решения задач механики деформируемого твердого тела, в частности при изучении процессов макролокализации пластического течения металлов и сплавов в условиях проявления деформации Чернова – Людерса и эффекта Портевена – Ле Шателье (ПЛШ) [24–30]. При пластической деформации алюминий-магниевого сплава регистрируются

сигналы акустической эмиссии, которые отражают процессы, происходящие при локальной внутренней перестройке структуры материалов, в том числе при возникновении прерывистой текучести. Классическими источниками акустической эмиссии в Al – Mg-сплавах являются движение дислокаций и двойникование [31–34].

## 1. Создание сложного напряженного состояния в образце специальной усложненной геометрии

С целью оценки влияния вида напряженного состояния на закономерности пространственно-временной неоднородности пластического деформирования в Al – Mg-сплаве проведены механические испытания на одноосное растяжение оригинальных образцов с усложненной геометрией (с переменной толщиной рабочей части). Опытные образцы выполнены в форме пластин с жестким ободом двух типов. Первый тип – это пластины с ободом в форме кольца, в рабочей части которых реализуются растягивающие усилия вдоль оси  $Oy$  (вдоль оси нагружения) и сжимающие усилия в поперечном направлении (вдоль оси  $Ox$ ) за счет искривления кругового обода и его сужения в поперечном направлении (рис. 1, а). Второй тип – это пластины с жестким ободом обратной кривизны (в форме песочных часов), геометрия которого позволяет создать в рабочей части двухосное растяжение материала в условиях одноосного нагружения образца (рис. 1, б). Верификация геометрических параметров пластин с ободами жесткости (ширина обода, радиусы скругления, соотношение толщины рабочей части и жесткого обода) проведена в программном пакете Ansys [35].

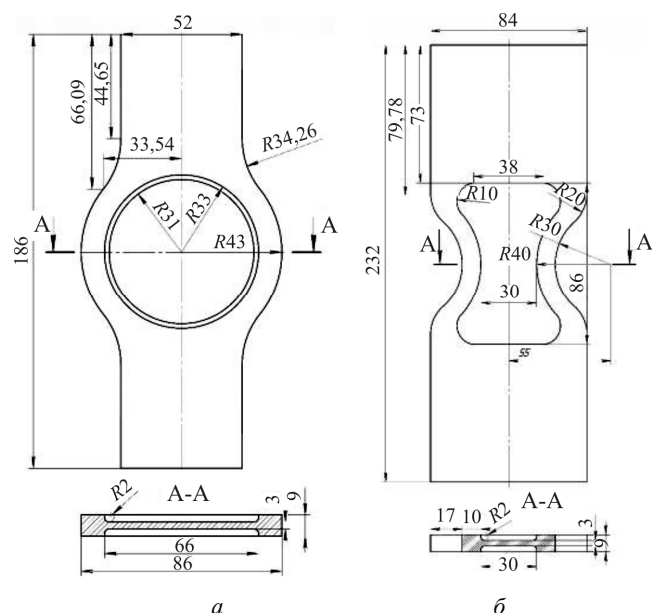


Рис. 1. Эскизы пластин с ободами жесткости различной геометрии для создания сложного напряженного состояния в рабочей части: кольцевой обод (а) и обод обратной кривизны (б)

Fig. 1. Sketches of plates with stiffness rims of various geometries for creating a combined stress state: an ring rim (a) and a rim of reverse curvature (b)

## 2. Материал и методы экспериментального исследования

Пластины с ободами жесткости изготовлены путем фрезерования на станке с числовым программным управлением (ЧПУ) из листового проката конструкционного алюминий-магниевого сплава АМг6б (с технологической плакировкой, ГОСТ 17232-99) толщиной 12 мм. Химический состав Al – Mg-сплава: Mg – 6,1 %, Mn – 0,6 %, Fe – 0,2 %, Si – 0,1 %, Cu – 0,1 %, Zn – 0,1 %. Материал испытывался в состоянии поставки, без проведения дополнительной термообработки. Кинематическое нагружение на одноосное растяжение производилось на электромеханической испытательной системе Instron 5989 (600 кН) при постоянной скорости перемещения traversы 5 мм/мин при комнатной температуре 22–23 °С.

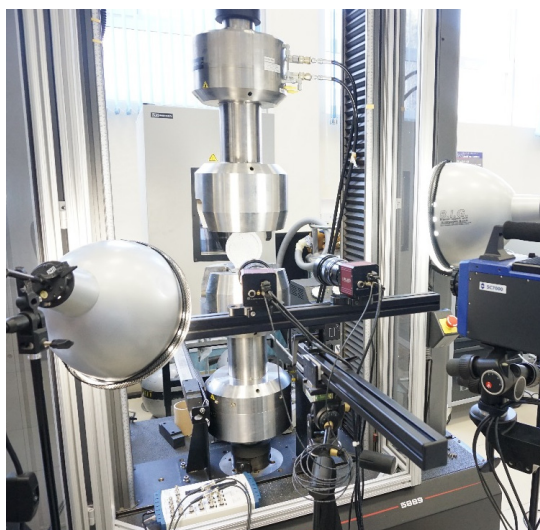
Для регистрации процессов макроскопической локализации пластического течения в условиях проявления эффекта ПЛШ использован метод корреляции цифровых изображений (DIC – digital image correlation) и метод неразрушающего контроля – акустическая эмиссия (рис. 2, а). Анализ кинетики возникновения и развития полос ПЛШ реализован с помощью бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D (Correlated Solutions) с комплектом камер высокого разрешения (Prosilica, 16 Мп) для обеспечения высокой детализации полей деформаций.

Регистрация сигналов АЭ осуществлялась с помощью многоканальной системы AMSY-6 (Valien) от начала испытания до полного разрушения образца или остановки нагружения. Использовались два типа широкополосных пьезоэлектрических преобразователей АЕ144А (частотный диапазон 100–500 кГц) и АЕ105А (частотный

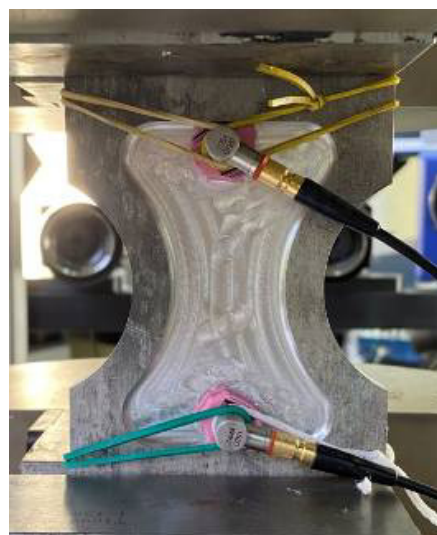
диапазон (450–1150 кГц) и предусилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Датчик крепился на поверхность образцов, как показано на рис. 2, б. Для улучшения контакта между образцом и датчиком использовалась вакуумная силиконовая смазка. Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ – 31 дБ. Для регистрации сигналов выбран непрерывный режим. Первичная фильтрация сигналов осуществлялась с использованием цифрового фильтра в расширенном диапазоне частот 25–850 кГц. При многопараметрической записи опытных данных использован блок АЦП, с помощью которого синхронизирован контроллер испытательной системы Instron 5989, видеосистема Vic-3D и АЭ-система AMSY-6.

## 3. Пространственно-временная неоднородность пластического течения Al – Mg-сплава при сложном напряженном состоянии

В результате проведения серии механических испытаний на одноосное растяжение пластин с ободами жесткости построены диаграммы нагружения и осуществлен анализ эволюции неоднородных полей деформаций и локальных скоростей деформирования в процессе инициирования и распространения деформационных полос локализованного пластического течения (полос ПЛШ). В качестве примера приведены характерные диаграммы нагружения для образцов с кольцевым ободом (рис. 3, а) и ободом обратной кривизны (рис. 4, а). Данные диаграммы построены с помощью дополнительного модуля программного обеспечения «виртуальный» экстензометр [36], который «устанавливается» в рабочей части образца.



а



б

Рис. 2. Проведение испытания на одноосное растяжение образцов с ободом жесткости с регистрацией полей деформаций и сигналов акустической эмиссии (а), фото образца в захватах испытательной системы с установленными датчиками АЭ (б)

Fig. 2. Uniaxial tensile testing of specimens with a stiffening rim with registration of strain fields and acoustic emission signals (а), photo of the specimen in the grips of the test system with installed AE sensors (б)

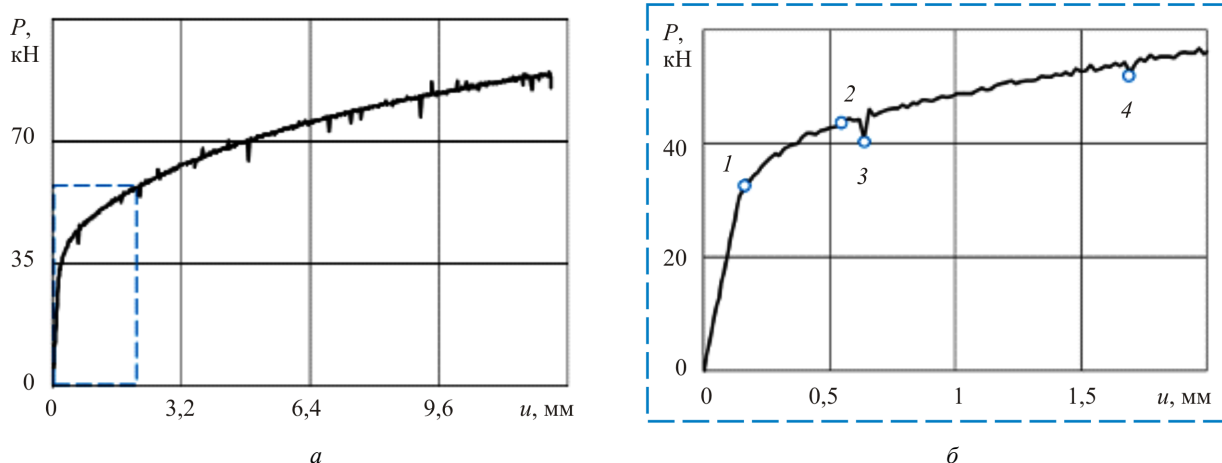


Рис. 3. Диаграмма нагружения для пластины с кольцевым ободом жесткости, построенная по данным «виртуального» экстензометра (а), и увеличенный фрагмент кривой (б)

Fig. 3. Loading diagram for a plate with a ring stiffness rim, constructed from the data of a "virtual" extensometer (a) and an enlarged fragment of the curve (b)

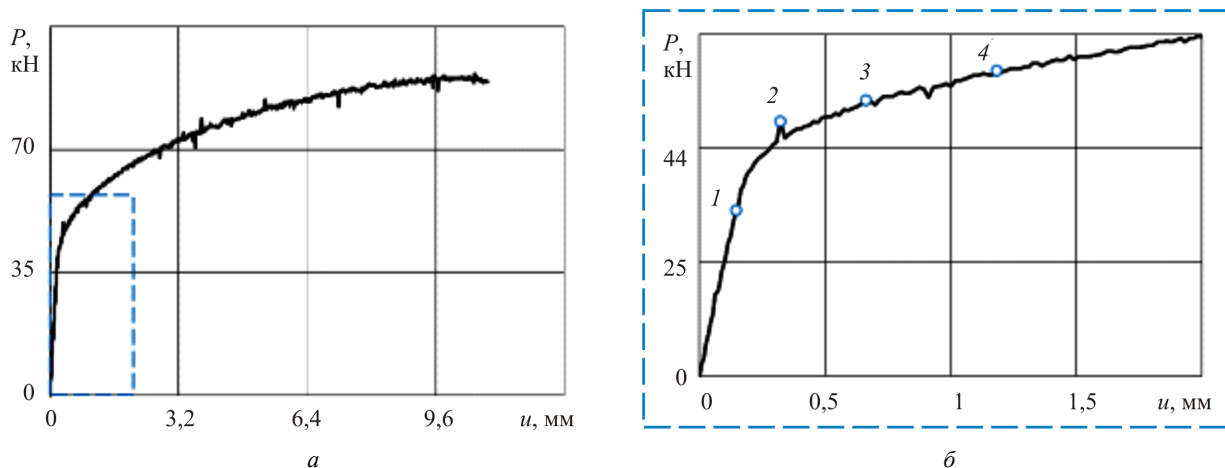


Рис. 4. Диаграмма нагружения для пластины с ободом жесткости обратной кривизны, построенная по данным «виртуального» экстензометра (а), и увеличенный её фрагмент (б)

Fig. 4. Loading diagram for a plate with a stiffness rim of reverse curvature, constructed from the data of a "virtual" extensometer (a) and an enlarged fragment of it (b)

На диаграммах нагружения наблюдается проявление прерывистой текучести, при достижении критических пластических деформаций начала эффекта Портевена – Ле Шателье на кривой «нагрузка – удлинение» регистрируются многочисленные зубцы, срывы нагрузки, которые сопровождаются пространственной неоднородностью пластического течения в материале. Исследование кинетики полособразования в условиях проявления эффекта ПЛШ основано на анализе картин деформационных полей в величинах локальных скоростей деформирования (продольных, в ряде случаев поперечных и сдвиговых деформаций), что позволяет зафиксировать процесс активного пластического деформирования материала в области деформационной полосы (рис. 5, б). С помощью данного представления результатов можно определить локацию и количество полос в текущий момент времени, ширину фронта полосы, угол её наклона по отношению к оси нагружения образца.

В точке 1 (см. рис. 3, б) при уровне осевой нагрузке 33,58 кН на поверхности пластины с кольцевым ободом

жесткости отмечено иницирование макроскопической локализации пластического течения материала (рис. 5, а). Количество полос в процессе нагружения варьируется от 1 до 12 единиц, например, в точке 4 (см. рис. 3, б) при нагрузке 52,52 кН зафиксировано 8 деформационных полос (рис. 5, в). Следует отметить, что угол наклона полос ПЛШ не меняется и равен примерно 51–53°. В точке 2 (см. рис. 3, б) уровень нагрузки равен 43,99 кН, в точке 3 (см. рис. 3, б) – 40,96 кН.

Для образца с ободом жесткости обратной кривизны поля локальных скоростей продольного деформирования приведены на рис. 6. В точке 1 (см. рис. 4, б) при нагрузке 31,93 кН обнаруживается формирование области макроскопической локализации пластического течения (рис. 6, а). Кинетика развития полос ПЛШ при двухосном напряженном состоянии (растяжение в продольном и поперечном направлениях) существенно отличается. Иницирование полос отмечается на периферийных участках образца, в которых растяжение в поперечном на-

правлении практически отсутствует. При прохождении полосы ПЛШ через область двухосного растяжения (в самой узкой части образца) меняется угол её наклона до значений порядка  $74\text{--}85^\circ$ , принимая почти горизонтальное положение, как показано на рис. 6, *з* (при нагрузке 58,68 кН). В точке 2 (см. рис. 4, *б*) уровень нагрузки равен 49,19 кН, в точке 3 (см. рис. 4, *б*) – 52,55 кН.

В предыдущих работах при изучении явления Чернова – Людерса и эффектов прерывистой текучести использовался метод построения серии профилей деформаций на основе данных, полученных методом корреляции цифровых изображений. С помощью серии профилей деформаций обнаружен квазипериодический характер пластического деформирования, заключающийся в чередовании стадий макроскопического выравнивания уровня деформаций по поверхности исследуемого материала, и стадий значительной локализации пластического течения в ре-

зультате формирования и развития полос Чернова – Людерса и полос ПЛШ [37].

Представляет интерес построение серии профилей продольных (вдоль оси  $Oy$ ) деформаций для пластин с ободами жесткости и оценка влияния сложного напряженного состояния на квазипериодический характер. Результат построения серии профилей  $\epsilon_{yy}$  (%) для образца с кольцевым ободом представлен на рис. 7, для пластины с ободом обратной кривизны – на рис. 8, временной интервал  $\Delta t$  равен 9 с. Обнаруживается активный процесс полособразования на поверхности материала, макроскопическая локализация пластического течения проявляется в виде многочисленного хаотичного возникновения полос ПЛШ и их распространения по пластине. В центральной части образца, в которой максимально реализуется двухосное напряженное состояние, амплитуда деформационных полос выше, чем на периферийных областях (рис. 7).

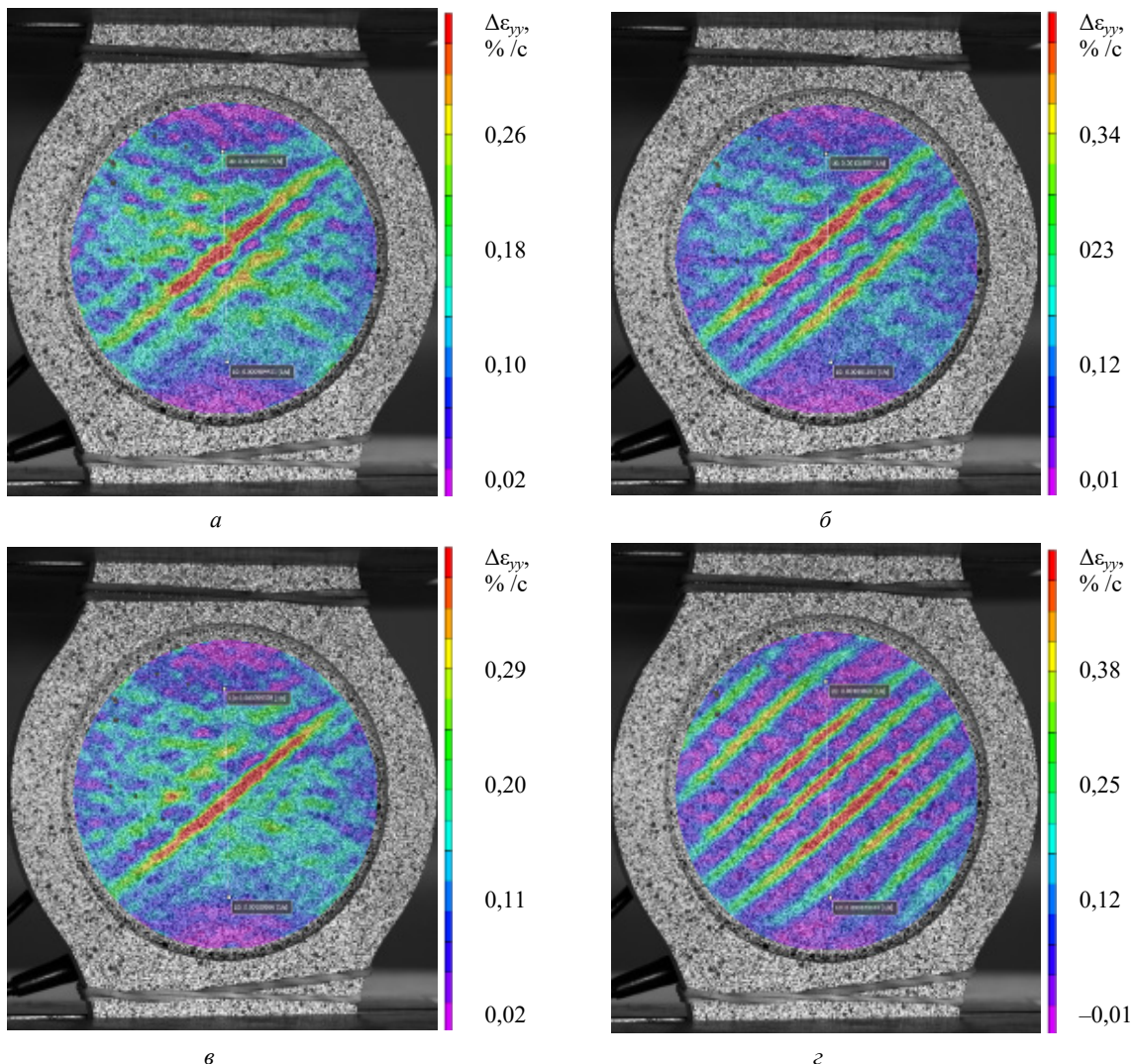


Рис. 5. Поля локальных скоростей продольного деформирования, иллюстрирующие конфигурацию полос ПЛШ в условиях двухосного (растяжение – сжатие) напряженного состояния в точках 1 (*а*), 2 (*б*), 3 (*в*) и 4 (*з*) диаграммы нагружения (см. рис. 3, *б*)

Fig. 5. Fields of local rates of longitudinal strain, show the configuration of PLC bands under conditions of a biaxial (tension-compression) stress state at points 1 (*a*), 2 (*б*), 3 (*в*), and 4 (*з*) of the loading diagram (Fig. 3, *б*)

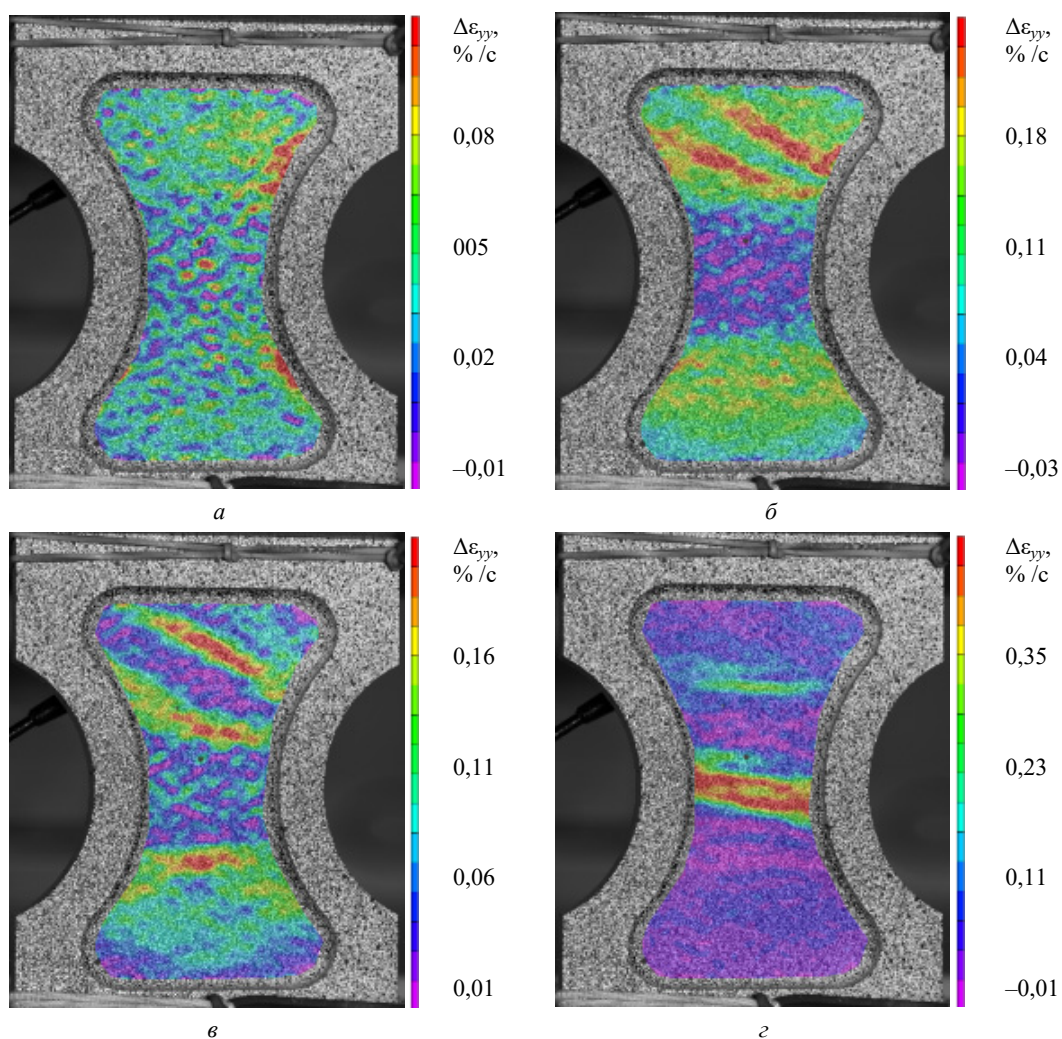


Рис. 6. Поля локальных скоростей продольного деформирования, иллюстрирующие конфигурацию полос ПЛШ в условиях двухосного (растяжение – растяжение) напряженного состояния в точках 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) диаграммы нагружения (см. рис. 4, б)

Fig. 6. Fields of local rates of longitudinal strain, show the configuration of PLC bands under conditions of a biaxial (tension-tension) stress state at points 1 (a), 2 (б), 3 (в), and 4 (г) of the loading diagram (Fig. 4, б)

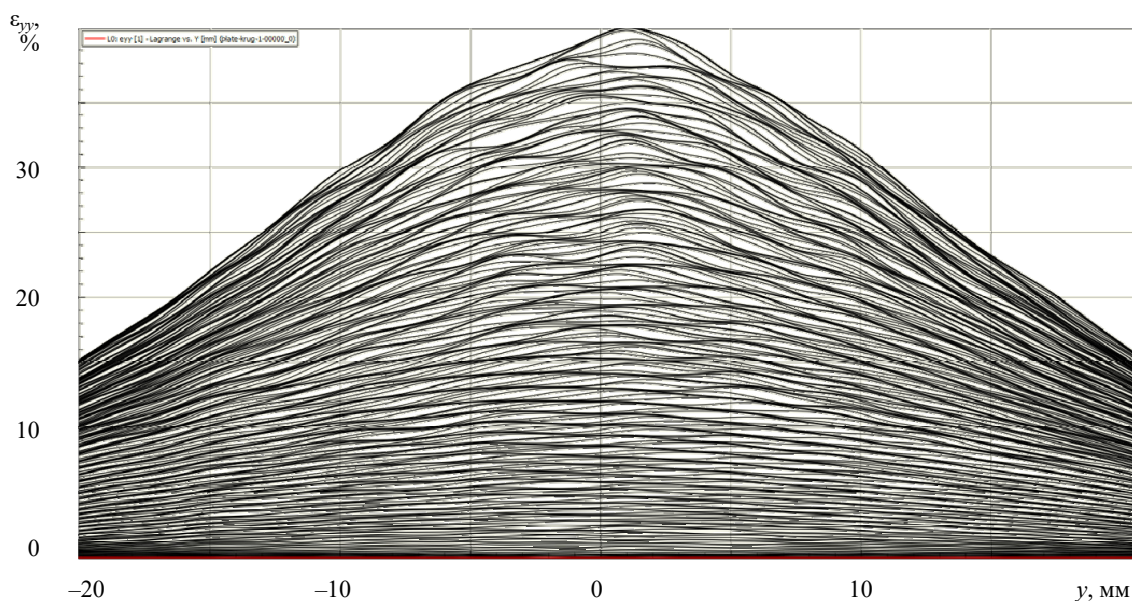


Рис. 7. Серия профилей продольных деформаций ( $\epsilon_{yy}$ ) построенные с равным временным интервалом вдоль оси нагружения (оси  $Oy$ ) для пластины с жестким круговым ободом

Fig. 7. A series of longitudinal strain profiles ( $\epsilon_{yy}$ ) plotted with equal time step along the loading axis ( $Oy$  axis) for a plate with a rigid circular rim

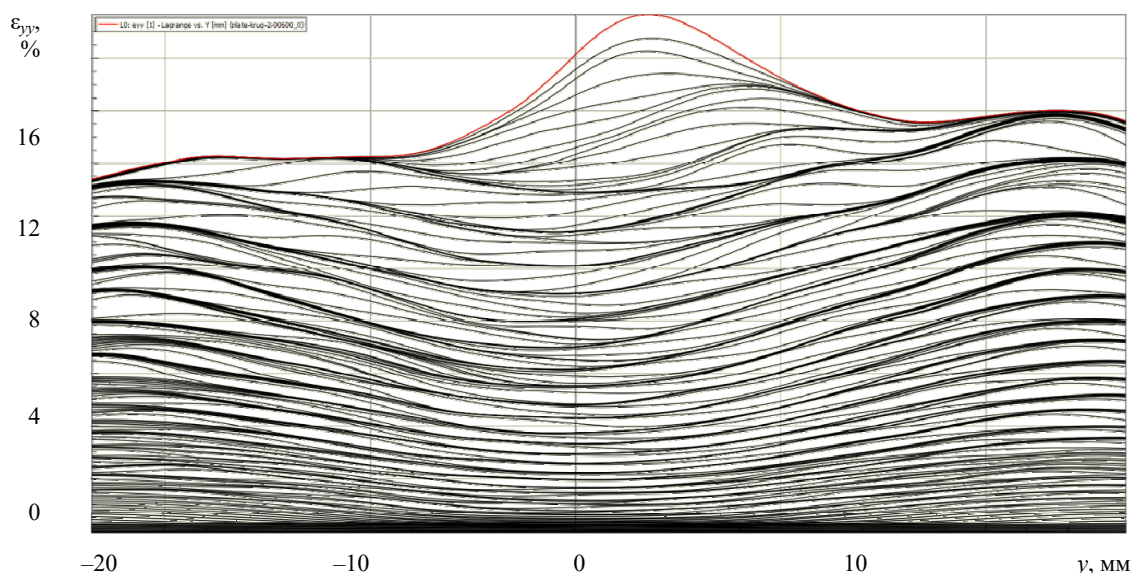


Рис. 8. Серия профилей продольных деформаций ( $\epsilon_{yy}$ ) построенные с равным временным интервалом вдоль оси нагружения (оси  $Oy$ ) для пластины с жестким ободом обратной кривизны

Fig. 8. A series of longitudinal strain profiles ( $\epsilon_{yy}$ ) plotted with equal time step along the loading axis ( $Oy$  axis) for a plate with a rigid rim of reverse curvature

#### 4. Реализация сложного напряженного состояния в пластинах с ободом жесткости различной геометрии

Представляет интерес оценка степени реализации сложного напряженного состояния в пластинах с ободами жесткости различной конфигурации в условиях одноосного нагружения образца. Построены неоднородные поля продольных ( $\epsilon_{yy}$ ), поперечных ( $\epsilon_{xx}$ ) и сдвиговых деформаций ( $\epsilon_{xy}$ ) для пластин с кольцевым ободом (рис. 9) и ободом обратной кривизны (рис. 10). Для центральной зоны образца реализуется плоское напряженное состояние с главными напряжениями разных знаков в зависимости от формы обода.

На основе данных анализа деформационных картин для центральной точки пластин построены зависимости «поперечная деформация – продольная деформация» (рис. 11). Для образца с круговым ободом жесткости реализуется растяжение в продольном

направлении (продольная деформация с положительным знаком), сжатие в поперечном направлении (поперечная деформация принимает отрицательные значения) (см. рис. 11, *a*). В образце с ободом жесткости обратной кривизны до достижения уровня нагрузки 88,75 кН (см. рис. 11, *b*, голубая штриховая линия) наблюдается двухосное растяжение (продольная и поперечная деформация с положительным знаком) материала. При дальнейшем нагружении пластическая деформация протекает за счет удлинения в продольном направлении, кривизны обода жесткости не хватает для растяжения в поперечном направлении.

#### 5. Результаты анализа сигналов АЭ

В качестве информативных параметров в работе используются: количество зарегистрированных сигналов АЭ в единицу времени ( $n/\Delta t$ ), энергетический параметр ( $1eu = 10^{-14} \text{ В}^2\text{с}$ ). На рис. 12 представлен график рас-

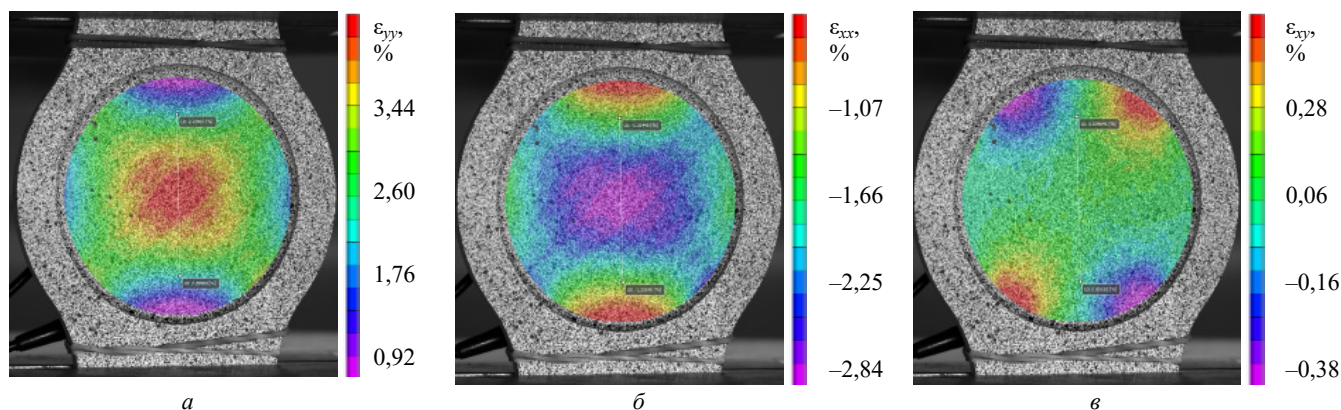


Рис. 9. Неоднородные поля продольны (*a*), поперечных (*b*) и сдвиговых (*v*) деформаций на поверхности пластины с кольцевым ободом в точке 4 диаграммы нагружения (см. рис. 3, *b*)

Fig. 9. Inhomogeneous fields of longitudinal (*a*), transverse (*b*) and shear (*v*) strain on the surface of a plate with a ring rim at point 4 of the loading diagram (Fig. 3, *b*)



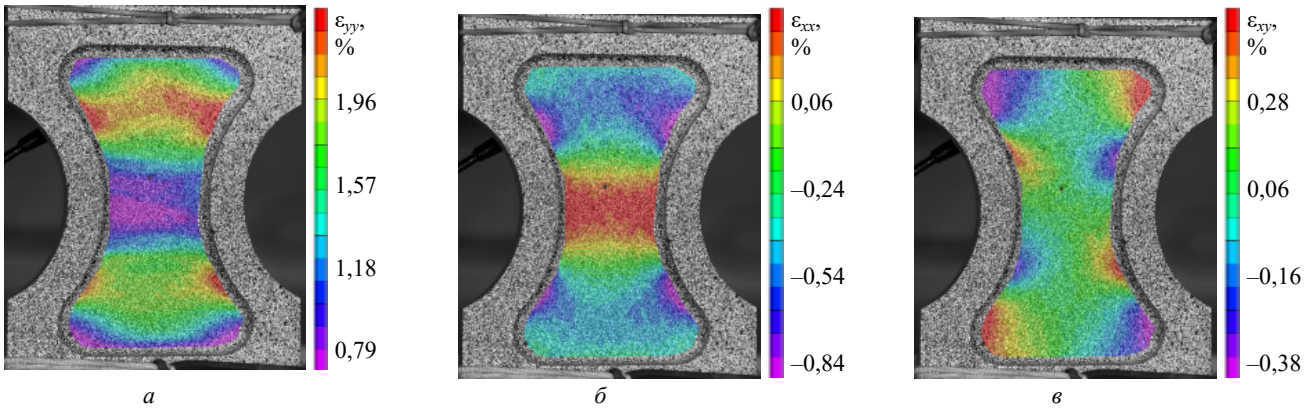


Рис. 10. Неоднородные поля продольны (а), поперечных (б) и сдвиговых (в) деформаций на поверхности пластины с ободом жесткости обратной кривизны в точке 4 диаграммы нагружения (см. рис. 4, б)

Fig. 10. Inhomogeneous fields of longitudinal (a), transverse (b) and shear (v) strain on the surface of a plate with a rim of inverse curvature at point 4 of the loading diagram (Fig. 4, b)

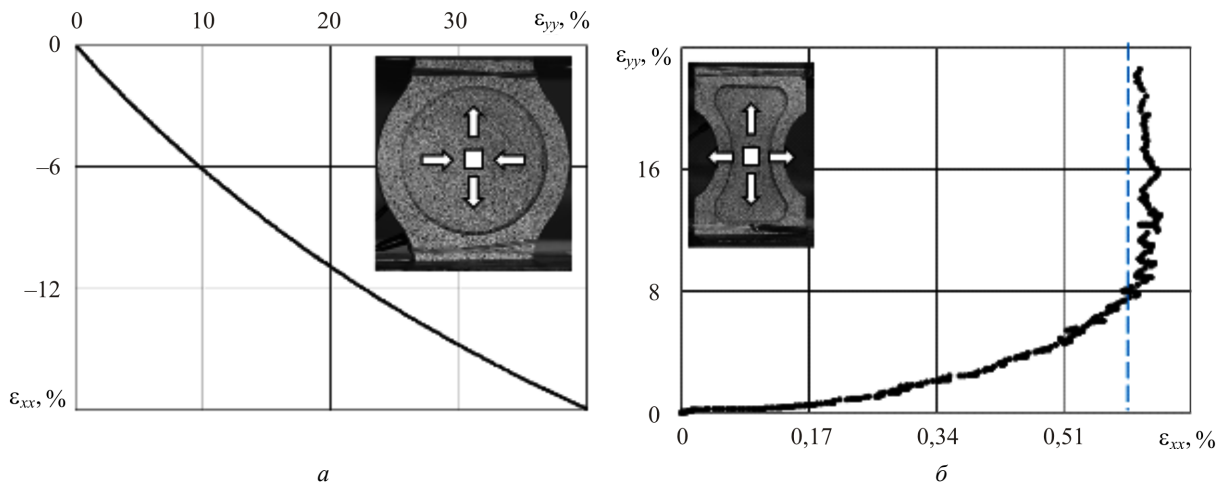


Рис. 11. Неоднородные поля продольных (а), поперечных (б) и сдвиговых (в) деформаций на поверхности пластины с кольцевым ободом в точке 4 диаграммы нагружения (см. рис. 3, б)

Fig. 11. Fields of local rates of longitudinal strain, show the configuration of PLC bands under conditions of a biaxial (tension-compression) stress state at points 1 (a), 2 (b), 3 (v), and 4 of the loading diagram (Fig. 3, b)

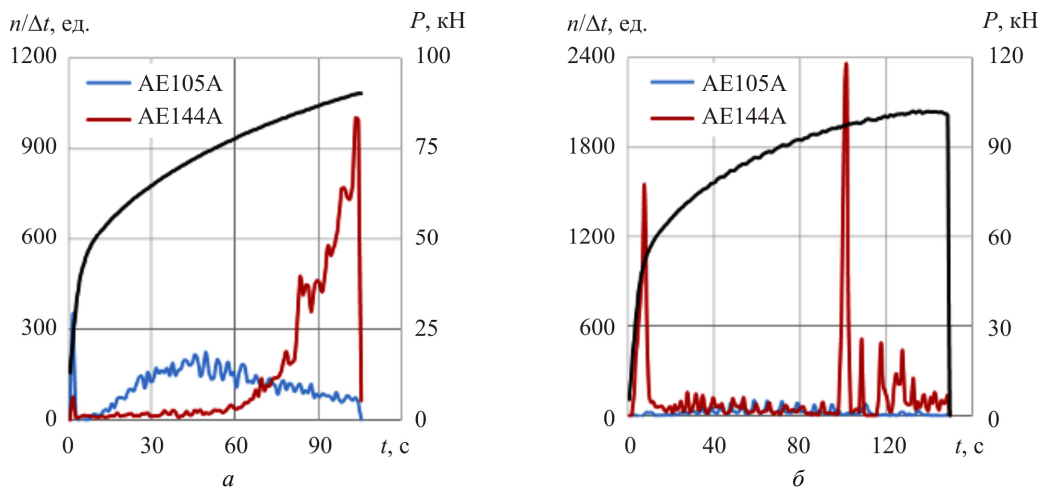


Рис. 12. Графики распределения количества сигналов АЭ за единицу времени, зарегистрированных датчиками АЕ105А и АЕ144А, совмещенные с кривой нагружения для пластины с кольцевым ободом (а) и ободом обратной кривизны (б)

Fig. 12. Graphs of AE hits dependence by sensors AE105A and AE144A and loading graphs for the plate with an ring rim (a) and with a reverse curvature rim (b)

пределения количества сигналов АЭ за единицу времени ( $n/\Delta t$ , где  $\Delta t = 0,5$  с), зарегистрированных разными датчиками АЭ в течение всего процесса нагружения, совмещенный с графиком нагружения для пластины с кольцевым ободом (рис. 12, а) и пластины с ободом обратной кривизны (рис. 12, б). Общее количество зарегистрированных сигналов для обоих используемых датчиков на образцах представлено в таблице. С помощью широкополосного датчика АЕ144А с диапазоном рабочих частот 100–500 кГц зарегистрировано наибольшее количество АЭ-сигналов.

Суммарное количество зарегистрированных сигналов АЭ

Cumulative AE hits

Датчик	Образец	
	пластина с кольцевым ободом, ед.	пластина с ободом обратной кривизны, ед.
АЕ105А	12000	3500
АЕ144А	18500	21500

На рис. 13 приведены графики распределения количества сигналов АЭ за единицу времени ( $n/\Delta t$ , где  $\Delta t = 0,1$  с) на начальном этапе нагружения до уровня нагрузки 60 кН. Максимальная активность АЭ для образца пластины с круговым ободом (см. рис. 13, а) наблюдается при уровне нагрузки до 20 кН, а для образца пластины с ободом обратной кривизны (см. рис. 13, б) при уровне нагрузки до 50 кН. Максимальные пики при этом наблюдаются при  $P = 11$  и 50 кН соответственно. В обоих случаях максимальная активность зафиксирована также датчиком с рабочим диапазоном частот 100–500 кГц.

На рис. 14 представлен график распределения энергетического параметра сигналов в единицу времени  $\Delta t = 0,5$  с для образцов пластин, зафиксированных с помощью датчика с рабочим диапазоном частот 100–500 кГц за все время нагружения образцов. Данный параметр зависит от длительности сигнала АЭ и его амплитуды и позволяет анализировать возникновение повреждений

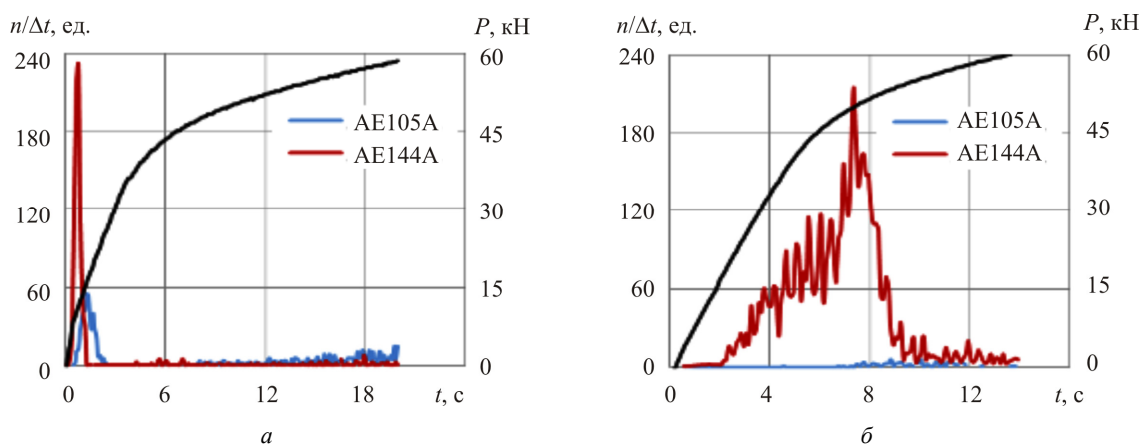


Рис. 13. График распределения количества сигналов АЭ за единицу времени, зарегистрированных датчиками АЕ105А и АЕ144А на начальном этапе нагружения для пластины с кольцевым ободом (а) и с ободом обратной кривизны (б)

Fig. 13. Graphs of AE hits dependence by different sensors АЕ105А and АЕ144А at the initial loading stage for the plate with a ring rim (а) and with a reverse curvature rim (б)

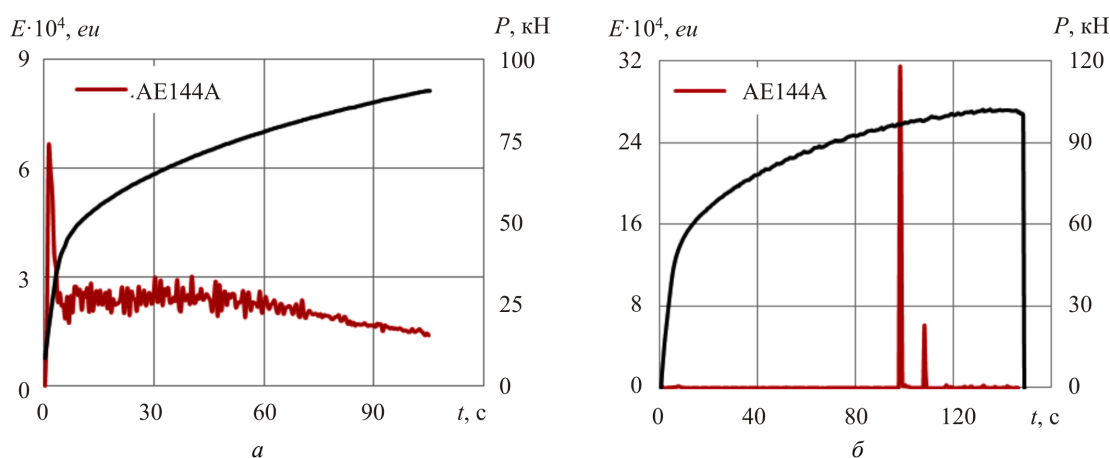


Рис. 14. График распределения энергетического параметра сигналов АЭ за единицу времени, совмещенный с диаграммой нагружения для пластины с кольцевым ободом (а) и пластины с ободом обратной кривизны (б)

Fig. 14. Distribution of the AE energy with the loading diagram for the plate with a ring rim (а) and with a rim of reverse curvature (б)

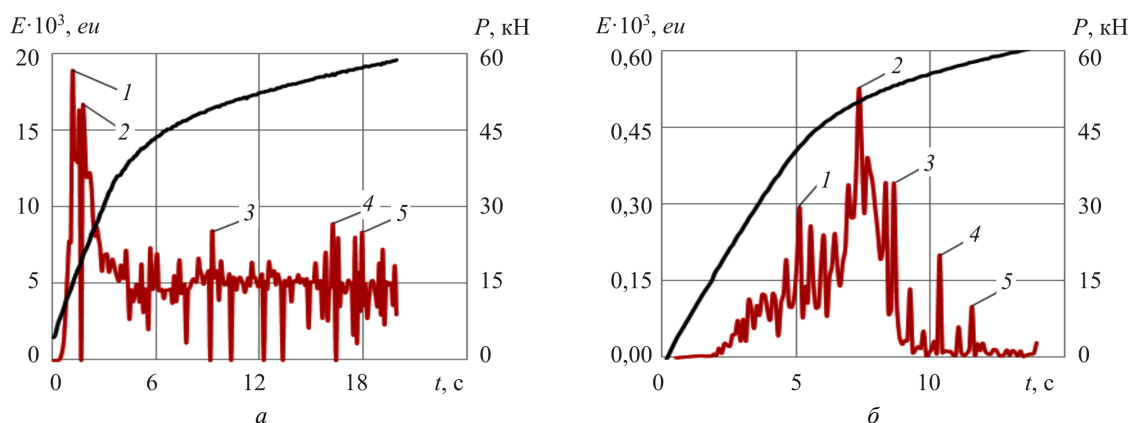


Рис. 15. График распределения энергетического параметра сигналов АЭ за единицу времени на начальном этапе нагружения для пластины с кольцевым ободом (а) и пластины с ободом обратной кривизны (б)

Fig. 15. Distribution of the AE energy with the loading diagram at initial loading stage for the plate with a ring rim (a) and with a rim of reverse curvature (b)

в структуре материала. Максимальные значения энергетического параметра для образца пластины с круговым ободом зафиксированы на участке нагружения до 35 кН (рис. 14, а), а для образца пластины с ободом обратной кривизны в момент времени  $t = 98$  и  $108$  с от начала нагружения образца и при уровне нагрузки  $P = 96$  и  $97$  кН соответственно. При этом для пластины с ободом обратной кривизны пики по значениям энергетического параметра АЭ связаны с началом макроразрушения образца.

На рис. 15 приведены графики распределения энергетического параметра сигналов АЭ за единицу времени  $\Delta t = 0,1$  с на начальном этапе нагружения до уровня нагрузки 60 кН. Данные получены с помощью датчика с рабочим диапазоном частот 100–500 кГц. На рисунке отмечены некоторые пики по значениям энергетического параметра на начальном этапе нагружения. Для каждой точки приведены соответствующие значения нагрузки. Для образца с кольцевым ободом (см. рис. 5, а):  $P_1 = 15$  кН;  $P_2 = 20$  кН;  $P_3 = 49$  кН;  $P_4 = 56$  кН;  $P_5 = 57$  кН; для пластины с ободом обратной кривизны (рис. 5, б))  $P_1 = 40$  кН;  $P_2 = 49$  кН;  $P_3 = 52$  кН;  $P_4 = 56$  кН;  $P_5 = 57$  кН.

## Заключение

В результате экспериментального исследования показана высокая эффективность применения предложенной методики для решения задач механики деформи-

руемого твердого тела, в частности для изучения процессов макроскопической локализации пластического течения Al – Mg-сплава (АМг6б) в условиях проявления эффекта Портевена – Ле Шателье. С использованием метода корреляции цифровых изображений и видеосистемы анализа полей деформаций получены опытные данные о реализованном соотношении компонент деформаций (продольных и поперечных деформаций) в рабочей зоне образцов. Проведен анализ кинетики полосообразования и деформации прерывистой текучести, происходящей в условиях плоского напряженного состояния.

В данной работе в качестве дополнительного инструмента для анализа процесса деформирования образцов алюминиево-магниевый сплав использовался метод акустической эмиссии. Регистрация сигналов осуществлялась от начала нагружения до момента разрушения или потери устойчивости образцов. В ходе анализа полученных экспериментальных данных построены и проанализированы графики распределения количества зарегистрированных сигналов и энергетического параметра как за все время нагружения, так и для начального этапа (до уровня нагрузки 60 кН). Отмечены уровни нагрузки, для которых зафиксирована максимальная активность АЭ и значения нагрузки, при которых наблюдаются скачки по уровню энергетического параметра АЭ на начальном этапе нагружения.

## Библиографический список

1. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский. – Киев: Издательский Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
2. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 416 с.
3. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, М.П. Третьяков,

Т.В. Третьякова, Д.С. Лобанов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. – 156 с.

4. Tretyakov M.P., Wildemann V.E., Lomakin E.V. Failure of materials on the postcritical deformation stage at different types of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3721–3726.

5. Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Иностранная литература, 1955. – 444 с.

6. Вансович К.А., Ядров В.И. Усталостные испытания стальных крестообразных образцов с поверхностной трещи-

ной при двухосном нагружении // Омский научный вестник. – 2012. – № 3–113. – С. 117–121.

7. Шлянников В.Н., Захаров А.П. Образцы для испытаний при двухосном циклическом нагружении // Труды Академэнерго. – 2013. – № 3. – С. 70–79.

8. Hanabusa Y., Takizava H., Kuwabara T. Numerical verification of a biaxial test method using a cruciform specimen. // J. of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213, iss. 6. – P. 961–970.

9. Tiernan P., Hannon A. Design optimization of biaxial tensile test specimen using finite element analysis // J. of Material Forming. – 2014. – Vol. 7, iss. 1. – P. 117–123.

10. Аннин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 342 с.

11. Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Павленкова Е.В. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения осесимметричных тел при больших деформациях. // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 2. – С. 57–66.

12. Шлянников В.Н., Иштыряков И.С., Яруллин Р.Р. Характеристики деформирования сплава Д16Т при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Тр. Академэнерго. – 2014. – № 3. – С. 78–90.

13. Локощенко А.М. Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии (обзор). // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2012. – № 3. – С. 116–136.

14. Papasidero J., Doquet V., Mohr D. Determination of the effect of stress state on the onset of ductile fracture through tension-torsion experiments. // Experimental Mechanics. – 2014. – Vol. 54, iss. 2. – P. 137–151.

15. Wang Y., Yao W. A multiaxial fatigue criterion for various metallic materials under proportional and nonproportional loading // Int. J. of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 401–408.

16. Павленкова Е.В., Жегалов Д.В. Числовые методы экспериментально-теоретического анализа больших деформаций элементов конструкций и определения параметров математических моделей упругопластических материалов: учеб.-метод. пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 101 с.

17. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков // Вестник ПГТУ. Механика. – 2010. – № 2. – С. 34–47.

18. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное изучение закритического деформирования и разрушения сталей при высоких температурах // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 1. – С. 27–37.

19. Пат. 244682 РФ. Образец для испытания материалов при плоском напряженном состоянии / В.В. Венгжен, Г.В. Исаханов. – Бюл. 1969, № 18.

20. Пат. 283649 РФ. Образец для испытания материалов при плоском напряженном состоянии / В.В. Венгжен, Г.В. Исаханов. – Бюл. 1970, № 31.

21. Пат. 894430 РФ. Образец для испытания материалов при плоском напряженном состоянии / В.В. Венгжен. – Бюл. 1981, № 48.

22. Пат. 1525540. Способ испытания материалов при плоском напряженном состоянии / А.А. Островский, А.А. Бондаренко. – Бюл. 1989, № 44.

23. Закономерности развития неоднородных полей при закритическом деформировании стальных образцов в условиях растяжения / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, Т.В. Третья-

кова, М.П. Третьяков // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2016. – № 5. – С. 132–139.

24. Бондарь В.С., Абашев Д.Р., Фомин Д.Ю. Теории пластичности при сложном нагружении по плоским траекториям деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 3. – С. 35–47 DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.04.

25. Трусков П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: модели, основанные на физических теориях пластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 134–163. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.09

26. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Plastic strain localization and its stage in Al-Mg alloys // Physical Mesomechanics. – 2018. – Vol. 21, № 4. – P. 314–319. DOI: 10.1134/S1029959918040057

27. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Influence the loading conditions and the stress concentrators on the spatial-time inhomogeneity due to the yield delay and the jerky flow: study by using the digital image correlation and the infrared analysis // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2017. – Vol. 11. № 42 – P. 314–325.

28. Динамика макролокализации пластической деформации и разрушение алюминий-магниевого сплава с геометрическим концентратором напряжения / А.А. Шибков, М.А. Желтов, М.Ф. Гасанов, А.Е. Золотов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – Тамбов, 2017. – Т. 22, вып. 5. – С. 1092–1099. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099.

29. Zhang J., Jiang Y. An experimental study of inhomogeneous cyclic plastic deformation of 1045 steel under multiaxial cyclic loading // International Journal of Plasticity. – 2005. – Vol. 21. – P. 2174–2190.

30. de Codes R.N., Benallal A. Influence of specimen geometry on the Portevin-Le Chatelier effect due to dynamic strain aging for the AA5083-H116 aluminum alloy // Journal of Mechanics of Materials and Structures. – 2012. – Vol. 6, iss. 7–8. – P. 951–968.

31. Васильев Е.В. Кинетические особенности механизмов деформации магниевых сплавов при статическом и циклическом нагружении: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Тольятти, 2018. – 152 с.

32. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминий-магниевого сплава // Физика металлов и материаловедение. – 1996. – Т. 81, № 1. – С. 156–162.

33. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al – Mg-сплавах // Физика металлов и материаловедение. – 1991. – № 10. – С. 187–193.

34. Lebedkina T.A., Zhemchuzhnikova D.A., Lebyodkin M.A. Correlation versus randomization of jerky flow in an AlMgScZr alloy using acoustic emission // Phys. Rev. E 2018. – Vol. 97, iss. 1. – 013001. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.013001.

35. Третьякова Т.В., Мугатаров А.И., Феклистова Е.В. Экспериментальное исследование макролокализации пластического течения Al – Mg-сплава при сложном напряженном состоянии // Сборник трудов XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). – 2020. – С. 860–864.

36. 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.

37. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 120 с. – ISBN 978-5-9221-1719-7

## References

1. Lebedev A.A., Kovalchuk B.I., Giginak F.F., Lamashevskii V.P. Mekhanicheskie svoystva konstruktsionnykh materialov pri slozhnom napriazhennom sostoianii [Mechanical properties of structural materials under complex stress conditions]. Kiev, Publishing House "In Yure", 2003, 540 p.
2. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napriazhennom sostoianii [Deformation and strength of materials under complex stress conditions]. Kiev, Nauk. dumka, 1976, 416 p.
3. Wildeman V.E., Lomakin E.V., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Eksperimentalnye issledovaniia zakriticheskogo deformirovaniia i razrusheniia konstruktsionnykh materialov [Experimental studies of post-critical deformation and fracture of structural materials]. Perm, Publishing house PNRPU, 2018, 156 p.
4. Tretyakov M.P., Wildemann V.E., Lomakin E.V. Failure of materials on the postcritical deformation stage at different types of the stress-strain state, *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 3721-3726.
5. Bridzhmen P. Issledovaniia bolshikh plasticheskikh deformatsii i razryva [Fatigue tests of steel cruciform specimens with a surface crack under biaxial loading]. Moscow, Inostrannaia literatura, 1955, 444 p.
6. Vansovich K.A., Iadrov V.I. Ustalostnye ispytaniia stalnykh krestoobraznykh obraztsov s poverkhnostnoi treshchinoi pri dvukhosnom nagruzhenii [Samples for testing under biaxial cyclic loading]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2012, no. 3-113, pp. 117-121.
7. Shliannikov V.N., Zakharov A.P. Obraztsy dlia ispytaniia pri dvukhosnom tsiklicheskom nagruzhenii [Behavior of materials under complex loading conditions]. *Trudy Akademenergo*, 2013, no 3, pp. 70-79.
8. Hanabusa Y., Takizava H., Kuwabara T. Numerical verification of a biaxial test method using a cruciform specimen. *J. of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 6, pp. 961-970.
9. Tiernan P., Hannon A. Design optimization of biaxial tensile test specimen using finite element analysis. *J. of Material Forming*, 2014, vol. 7, iss. 1, pp. 117-123.
10. Annin B.D., Zhigalkin V.M. Povedenie materialov v usloviiakh slozhnogo nagruzheniia [Long-term strength of metals under complex stress conditions (review)]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SB RAS, 1999, 342 p.
11. Bazhenov V.G., Zhegalov D.V., Pavlenkova E.V. Chislennoe i eksperimentalnoe issledovanie uprugoplasticheskikh protsessov rastiazheniia-krucheniia osesimmetrichnykh tel pri bolshikh deformatsiiaxh [Numerical and Experimental Study of Elastoplastic Tension-Torsion Processes in Axisymmetric Bodies under Large Deformations]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*, 2011, no. 2, pp. 57-66.
12. Shliannikov V.N., Ishtyriakov I.S., Iarullin R.R. Kharakteristiki deformirovaniia splava D16T pri sovместnom nagruzhenii rastiazheniem, szhatiemi, krucheniemi i vnutrennim davleniem [Investigation of the regularities of elastoplastic deformation of 15Kh2GMF steel under complex stress state]. *Trudy Akademenergo*, 2013, no 3, pp. 78-90.
13. Lokoshchenko A.M. Dlitelnaia prochnost metallov pri slozhnom napriazhennom sostoianii (obzor) [Long-Term Strength of Metals in Complex Stress State (a Survey)]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*, 2012, № 3, pp. 116-136.
14. Papisidero J., Doquet V., Mohr D. Determination of the effect of stress state on the onset of ductile fracture through tension-torsion experiments. *Experimental Mechanics*, 2014, vol. 54, iss., 2, pp. 137-151.
15. Wang Y., Yao W. A multiaxial fatigue criterion for various metallic materials under proportional and nonproportional loading. *Int. J. of Fatigue*, 2006, vol. 28, pp. 401-408.
16. Pavlenkova E.V., Zhegalov D.V. Chislouye metody eksperimentalno-teoreticheskogo analiza bolshikh deformatsii elementov konstrukttsii i opredeleniia parametrov matematicheskikh modelei uprugoplasticheskikh materialov: uchebno-metodicheskoe posobie [Numerical methods of experimental and theoretical analysis of large deformations of structural elements and determination of the parameters of mathematical models of elastoplastic materials: teaching aid]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskii gosuniversitet, 2012, 101 p.
17. Vasserman N.N., Wildeman V.E., Kriukov A.A., Tretyakov M.P. Issledovanie zakonornosti uprugoplasticheskogo deformirovaniia stali 15Kh2GMF pri slozhnom napriazhennom sostoianii [Investigation of the regularities of elastoplastic deformation of 15Kh2GMF steel under complex stress state]. *Vestnik PSTU. Mekhanika*, 2010, № 2, pp. 34-47.
18. Wildemann V.E., Tretyakov M.P. Experimental study of postcritical deformation and failure of steels at high temperature. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 27-37.
19. Vengzhen V.V., Isakhanov G.V. Patent 244682 RF. Obrazets dlia ispytaniia materialov pri ploskom napriazhennom sostoianii. Biul. 1969, № 18.
20. Vengzhen V.V., Isakhanov G.V. Patent 283649 RF. Obrazets dlia ispytaniia materialov pri ploskom napriazhennom sostoianii. Biul. 1970, № 31.
21. Vengzhen V.V. Patent 894430 RF. Obrazets dlia ispytaniia materialov pri ploskom napriazhennom sostoianii. Biul. 1981, № 48.
22. Ostrovskii A.A., Bondarenko A.A. Patent 1525540. Spособ ispytaniia materialov pri ploskom napriazhennom sostoianii. Biul. 1989, № 44.
23. Wildeman V.E., Lomakin E.V., Tretyakova T.V., Tretyakov M.P. Zakonomernosti razvitiia neodnorodnykh polei pri zakriticheskoi deformirovanii stalnykh obraztsov v usloviiakh rastiazheniia [Development of Inhomogeneous Fields under Postcritical Deformation of Steel Specimens in Extension]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*, 2016, no. 5, pp. 132-139.
24. Bondar V.S., Abashev D.R., Fomin D.Ju. Theories of Plasticity under Complex Loading along Flat Trajectories of Deformations. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 3, pp. 35-47.
25. Trusov P.V., Chechulina E.A. Serrated yielding: crystal viscoplastic models. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. no. 1. pp. 134-163.
26. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Plastic strain localization and its stage in Al-Mg alloys. *Physical Mesomechanics*, 2018, vol. 21, no 4, pp. 314-319. DOI: 10.1134/S1029959918040057
27. Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Influence the loading conditions and the stress concentrators on the spatial-time inhomogeneity due to the yield delay and the jerky flow: study by using the digital image correlation and the infrared analysis. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2017, vol. 11, no 42, pp. 314-325.
28. Shibkov A.A., Zheltov M.A., Gasanov M.F., Zolotov A.E. Dinamika makrolokalisatsii plasticheskoi deformatsii i razrushenie aliuminii-magnievogo splava s geometricheskimi kontsentratorami napriazheniia [Dynamics of macrolocalization of plastic deformation and fracture of an aluminum-magnesium alloy with a geometric stress concentrator]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki. Tambov*, 2017, vol. 22, iss. 5, pp. 1092-1099. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1092-1099.
29. Zhang J., Jiang Y. An experimental study of inhomogeneous cyclic plastic deformation of 1045 steel under multiaxial cyclic loading. *International Journal of Plasticity*, 2005, vol. 21, pp. 2174-2190.

30. de Codes R.N., Benallal A. Influence of specimen geometry on the Portevin-Le Chatelier effect due to dynamic strain aging for the AA5083-H116 aluminum alloy. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012, vol. 6, iss. 7–8., pp. 951-968.

31. Vasilev E.V. Kineticheskie osobennosti mekhanizmov deformatsii magnievykh splavov pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении [Kinetic features of deformation mechanisms of magnesium alloys under static and cyclic loading]: dis. kand. fiz.-mat. nauk. Toliatti, 2018, 152 p.

32. Krishtal M.M., Merson D.L. Vzaimosviaz makrolokalizatsii deformatsii, preryvistoi tekuchesti i osobennosti akusticheskoi emissii pri deformirovaniі aliuminievo-magnievykh splavov [The relationship between the macrolocalization of deformation, discontinuous yield and features of acoustic emission during deformation of aluminum-magnesium alloys]. *Fizika metallov i materialovedenie*, 1996, vol. 81, no. 1, pp. 156-162.

33. Krishtal M.M., Merson D.L. Vliianie geometricheskikh parametrov obraztsa na mekhanicheskie svoistva i akusticheskuiu emissiiu pri preryvistoi tekuchesti v Al-Mg splavakh [Influence of geometric parameters of a sample on mechanical properties and acoustic emission at intermittent flow in Al-Mg alloys]. *Fizika metallov i materialovedenie*. 1991, no. 10, pp. 187-193.

34. Lebedkina T.A., Zhemchuzhnikova D.A., Lebyodkin M.A. Correlation versus randomization of jerky flow in an AlMgScZr alloy using acoustic emission. *Phys. Rev. E* 2018, vol. 97, iss. 1, pp. 013001. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.013001.

35. Tretiakova T.V., Mugatarov A.I., Feklistova E.V. Eksperimentalnoe issledovanie makrolokalizatsii plasticheskogo techeniia Al-Mg splava pri slozhnom napriazhennom sostoianii [Experimental study of the macrolocalization of the plastic flow of an Al-Mg alloy under a complex stress state]. V sbornike: XXXI Mezhdunarodnaia innovatsionnaia konferentsiia molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniia (MIKMUS - 2019). Sbornik trudov konferentsii, 2020, pp. 860-864.

36. Tretiakova T.V., Tretiakov M.P., Vildeman V.E. Ot-senka tochnosti izmerenii s ispolzovaniem videosistemy analiza polei peremeshchenii i deformatsii [Estimation of measurement accuracy using a video system for analyzing displacement and deformation fields]. *Vestnik PSTU. Mekhanika*, 2011, no. 2, pp. 92-100.

37. Tretiakova T.V., Wildeman V.E. Prostranstvenno-vremennaia neodnorodnost protsessov neuprugogo deformirovaniia metallov [Spatio-temporal inhomogeneity of the processes of inelastic deformation of metals]. Moscow, FIZMATLIT, 2016, 120 p.

**Финансирование. Благодарность.** Исследование выполнено в ПНИПУ при поддержке гранта Президента РФ (№ МК-885.2020.1) с использованием оборудования УНУ «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» ПНИПУ. Экспериментальные исследования в рамках теоретического описания механического поведения конструкционных материалов проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSNM-2020-0027).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Funding. Acknowledgment.** The study was carried out at PNRPU with the support of a grant from the President of the Russian Federation (No. MK-885.2020.1) using the equipment of the UNU "Complex of testing and diagnostic equipment for studying the properties of structural and functional materials under complex thermomechanical effects" PNRPU. Experimental studies within the framework of a theoretical description of the mechanical behavior of structural materials were carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSNM-2020-0027).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.