

Влияние облучения импульсным электронным пучком на деформационное упрочнение поликристаллов алюминия при исследовании методом факторного анализа

А.М. Устинов¹, А.А. Клопотов^{1,*}, Ю.Ф. Иванов², Ю.А. Абзаев¹, А.В. Чумаевский³,
Г.Г. Волокитин¹

¹Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
klopotovaa@tsuab.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований на основе корреляционного анализа взаимосвязи между характеристиками деформационного поведения и эволюцией в пространстве и во времени распределений деформационных полей при одноосном растяжении плоских не облученных и облученных импульсным электронным пучком образцов технически чистого алюминия марки А7. На основе анализа эволюции деформационных полей на поверхности образцов на макроскопическом масштабном уровне, полученных при помощи цифровой оптической системы Vic-3D установлено, что на переходной стадии деформационной кривой на картинах распределений продольных деформаций ϵ_{yy} на фоне макрооднородной деформации на поверхности всей рабочей части образца наблюдается формирование хаотически расположенных очагов растяжения и сжатия. Наблюдаемые эволюции распределений локальных очагов деформации анализируются при помощи корреляционного анализа.

Ключевые слова: алюминий, деформация растяжением, корреляционный анализ, цифровая оптическая система Vic-3D, эволюция деформационных полей.

1. Введение

У поликристаллов металлов и сплавов при пластической деформации до высоких значений в первом приближении выделяют три стадии пластической деформации, которые отражаются на деформационных кривых, построенных на зависимостях $\sigma = f(\epsilon)$ и $\Theta = f(\epsilon)$ [1]. Здесь $\Theta = d\sigma/d\epsilon$ коэффициент деформационного упрочнения. Первая переходная стадия π характеризуется переходом от упругой к однородной макропластической деформации. Главной особенностью этой стадии является одновременное сосуществование пластически деформированных и упруго деформированные зерна и доля последних уменьшается с ростом напряжения. На второй стадия пластическая деформация протекает во всем объеме образца. Переход к третьей стадии характеризуется локализованной макропластической деформации и часто сопровождается образованием и развитием «шейки». В литературе при более детальном анализе деформационных кривых ГЦК-металлов и однофазных сплавов выделяют уже шесть стадий [1]. Появление этих стадий связывают с эволюцией дислокационных субструктур на микромасштабном уровне. При изучении эволюции распределений деформационных полей на поверхности образцов при пластической деформации на мезо- и макромасштабных уровнях установлена корреляция с образованием стадий на деформационных кривых на различных металлах и сплавах [2, 3].

Современными методами исследований локализации очагов пластической деформации на поверхности образцов на мезо- и макромасштабных уровнях в процессе деформации материалов надежно обнаруживается и фиксируется при помощи стереоскопической измерительной системы VIC-3D [4]. Этот подход является продуктивным при изучении эволюции в пространстве и во времени *in situ* деформационных полей на поверхности сплавов при их нагружении выше предела упругости.

Широко исследуемым металлом для получения экспериментальных данных о переходе от упругой стадии к пластической с целью выяснений особенностей образования и

перестройки дефектов и их самоорганизации при деформации является алюминий, обладающий высокой пластичностью.

Целью данной работы являлся анализ корреляции множества деформационных переменных, отражающих образование, рост, перемещение и исчезновение локальных очагов пластической деформации на рабочей части плоского не облученного и облученного импульсным электронным пучком алюминия технической чистоты марки А7 при одноосном растяжении.

2. Материал и оборудование

Для исследования были приготовлены образцы из технически чистого алюминия марки А7 в виде тонких пластин в форме двухсторонних лопаток с размерами рабочей части $17 \times 9.6 \times 3.8$ мм. Деформация образцов осуществлялась на испытательной машине «INSTRON 3386» при скорости растяжения 0.018 с^{-1} .

Распределение полей смещений на поверхности образцов в процессе одноосной деформации растяжением получено при помощи цифровой оптической системой «VIC-3D».

Подробная методика испытаний образцов приведена в работе [2].

Вторую группу образцов подвергали обработке импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [5]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 15 Дж/см^2 , длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 50, частота следования импульсов 0.3 с^{-1} . Облучение проводили в атмосфере аргона при остаточном давлении 0.02 Па. Воздействие импульсным электронным пучком с такими параметрами создает кратковременно высокую температуру на поверхности образцов в пределах (1000–1500) К.

3. Методика факторного анализа множеств деформационных переменных

Исходя из предположения о том, что корреляцией могут быть объяснены влияния скрытых причин – факторов (независимых переменных), то основное назначение факторного анализа – анализ корреляций множества признаков. Фактор при этом интерпретируется как причина совместной изменчивости нескольких исходных переменных. Применение факторного анализа позволяет выявить самосогласованное изменение разных признаков (параметров) и определить одну общую причину этой совместной изменчивости – фактора как скрытой, непосредственно не доступной измерению переменной [6].

Основная идея анализа сводится к тому, что если несколько признаков изменяются согласованно, то можно предположить существование одного общего скрытого, т.е. непосредственно не доступной измерению переменной, фактора этой совместной изменчивости [6]. Основное назначение факторного анализа - анализ корреляций множества признаков. В нашем исследовании к факторному анализу предъявляется требование о возможности интерпретации факторов через исходные переменные. Результаты корреляционного исследования могут быть проинтерпретированы в причинах на основе некоторой теории, но сами по себе не могут отчетливо доказать причинность. Фактор при этом интерпретируется как причина совместной изменчивости нескольких исходных переменных. Начиная с осмысленной структуры диаграммы деформирования с установление стадийности, а затем определяем, как она отражается на матрице и факторных нагрузках. Факторная нагрузка – это коэффициент корреляции, который показывают степень взаимосвязи (тесноты связи) соответствующих переменных и факторов. Идентификация фактора заключается в присвоении ему имени, обобщающего по смыслу наименования входящих в него переменных.

4. Результаты и обсуждение

Полная диаграмма деформирования $\sigma = f(\epsilon)$ при одноосном растяжении технически чистого алюминия А7 приведена в [2]. На приведенных зависимостях $\sigma = f(\epsilon)$ (рис. 1) можно выделить, согласно [1], три стадии: переходная стадия π на которой наблюдается самое большое значение коэффициента деформационного упрочнения Θ стадия II параболического упрочнения; продолжительная III стадия с линейным упрочнением, но с низким значением Θ (рис. 1).

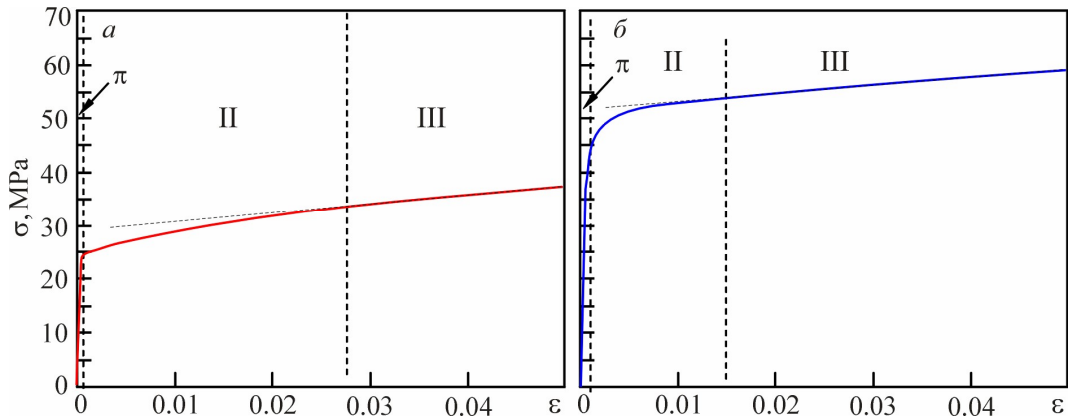


Рис. 1. Деформационные кривые технически чистого алюминия А7 в координатах σ от ϵ : а – не облученного; б – облученного электронным пучком. Буквой π , римскими цифрами и штриховыми вертикальными линиями выделены стадии деформаций.

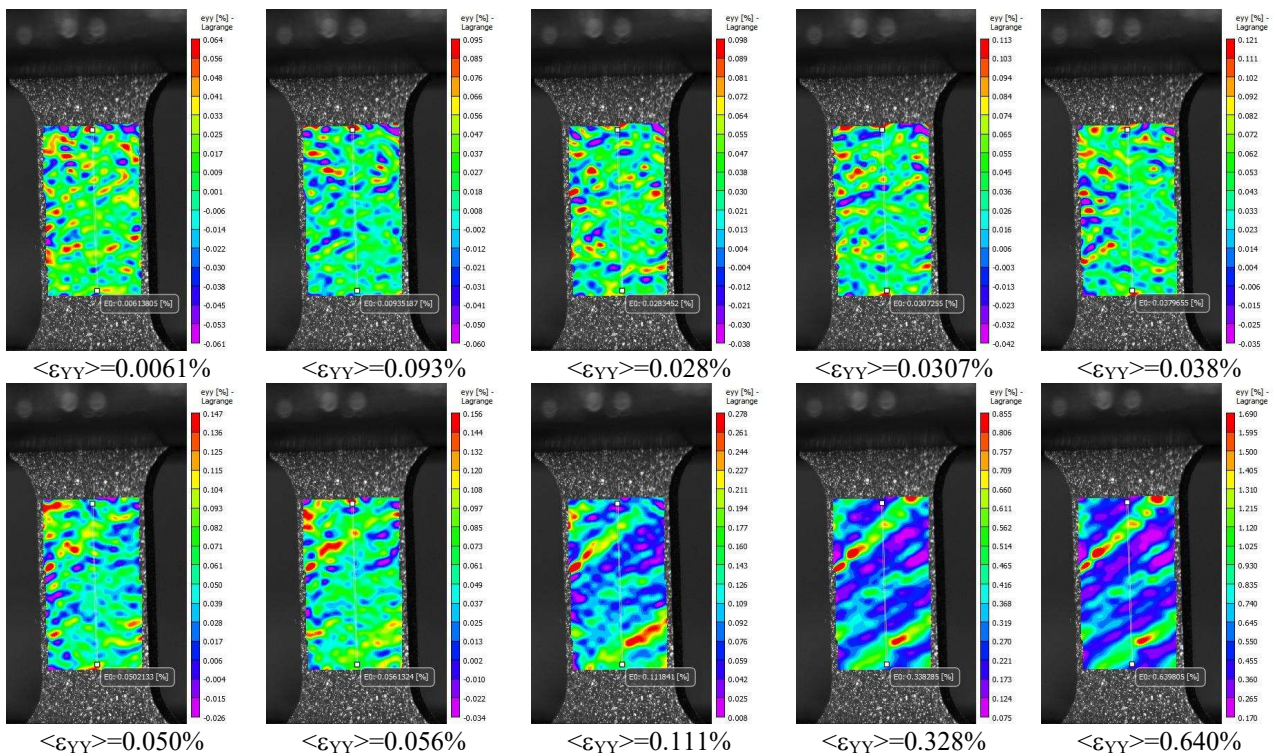


Рис. 2. Картины распределений продольных ϵ_{yy} относительных деформаций на поверхности образца алюминия марки А7 на стадии II в зависимости от усредненной по всему рабочему полю деформации $\langle \epsilon_{yy} \rangle$.

Этим картинам соответствуют номера кадров сняты с поверхности образца и соответственно времени деформирования: $N=1, t = 0.1$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.0061\%$; $N = 5, t = 0.5$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.093\%$; $N = 11, t = 1.1$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.028\%$; $N = 12, t = 1.2$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.0307\%$; $N = 14, t = 1.4$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.038\%$; $N = 17, t = 1.7$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.050\%$; $N = 18, t = 1.8$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.056\%$; $N = 23, t = 2.3$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.095\%$; $N = 24, t = 2.4$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.111\%$; $N = 48, t = 4.8$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.328\%$; $N = 81, t = 8.1$ с., $\langle \epsilon_{yy} \rangle = 0.640\%$

На рис. 2 приведены картины распределений продольных ε_{yy} относительных деформаций на поверхности образца алюминия марки А7 в зависимости номера кадра, соответственно времени деформации и на разных стадиях деформации. Для установления взаимосвязей между характеристиками деформационного поведения материала при растяжении и эволюцией в пространстве и во времени распределений деформационных полей на поверхности образцов проведем сопоставительный анализ зависимости σ от ε (рис. 1) и картин эволюции в пространстве и во времени на макроуровне распределений деформационных полей на поверхности образцов алюминия марки А7 при одноосном растяжении.

Для оценки силы связи применяется шкала Чеддока [6]: слабая со значением коэффициента корреляции 0.1–0.3, умеренная (0.3–0.5), заметная (0.5–0.7), высокая (0.7–0.9) и весьма высокая (0.9–1.0). По шкале выполнено цветовое форматирование матрицы корреляции: до 0.3 – красный, от 0.3 до 0.5 – белый, свыше 0.5 – зеленый цвет (рис. 3).

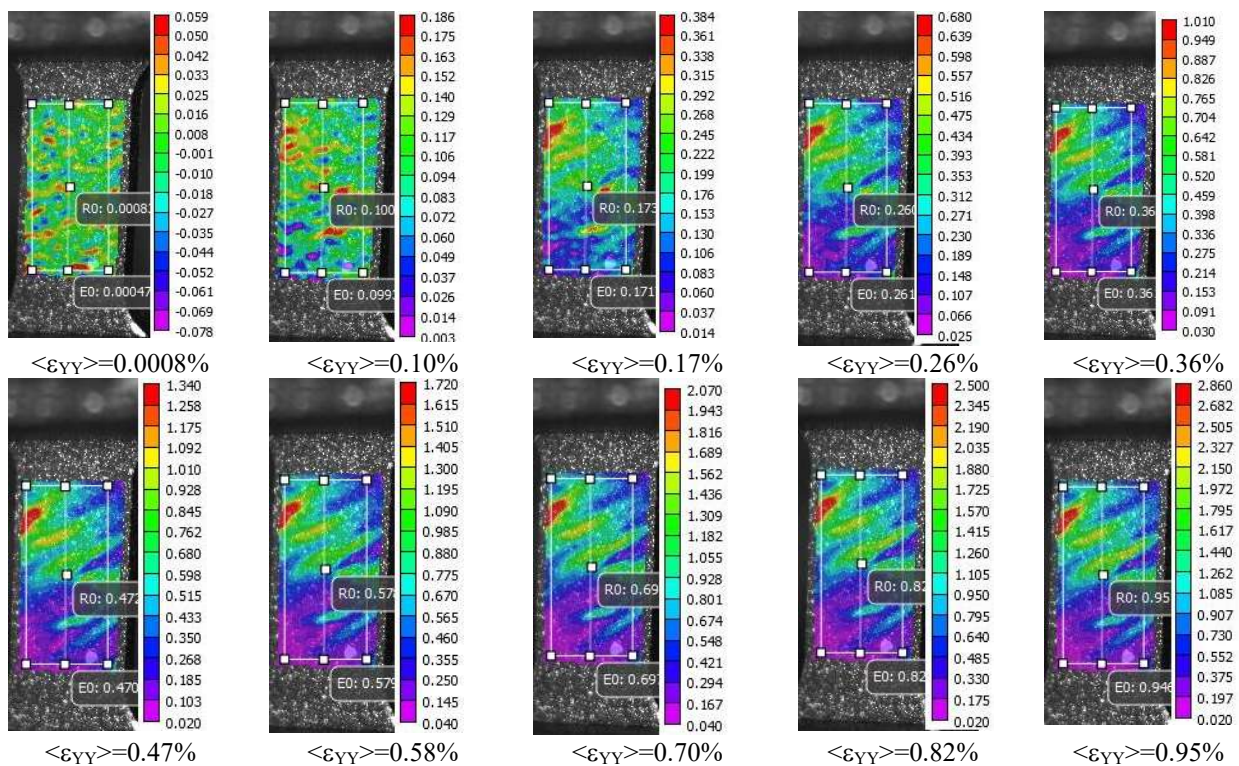


Рис. 3. Картины распределений продольных ε_{yy} относительных деформаций на поверхности облученного импульсным электронным пучком алюминия образца алюминия марки А7 в зависимости от усредненной по всему рабочему полю деформации $\langle \varepsilon_{yy} \rangle$.

Для не облученного образца анализ матрицы корреляции позволил выявить разные зоны: зону близкой корреляции с заметной теснотой связи между кадрами (красная) при слабой теснотой связи между дальними кадрами, переходную зону (белую), в которой происходит быстрое увеличение коэффициента с 0.3 до 0.7 и зону высокой и весьма высокой дальней и ближней тесноты связи между кадрами (рис. 3). Эти зонам соответствуют стадии на деформационной кривой (рис. 1):

- 1) с 1 до 11 кадра – зона, которая совпадает с переходной стадией π от упругой деформации к пластической;
- 2) с 12 до 17 кадры – зона, которая совпадает со стадией II параболического упрочнения;

3) с 18 до 81 кадра – зона с заметной, высокой и весьма высокой теснотой связи между кадрами, совпадающая со стадией III с линейным упрочнением и низким значением Θ .

Для облученного импульсным электронным пучком образца была получена матрица корреляции из 55 множеств переменных и факторные нагрузки (коэффициент корреляции с независимыми переменными) после вращения или без него, т.е. коэффициент корреляции, который показывают степень взаимосвязи соответствующих зависимых (т.е. измеренных) переменных и факторов (независимых переменных) (рис. 4).

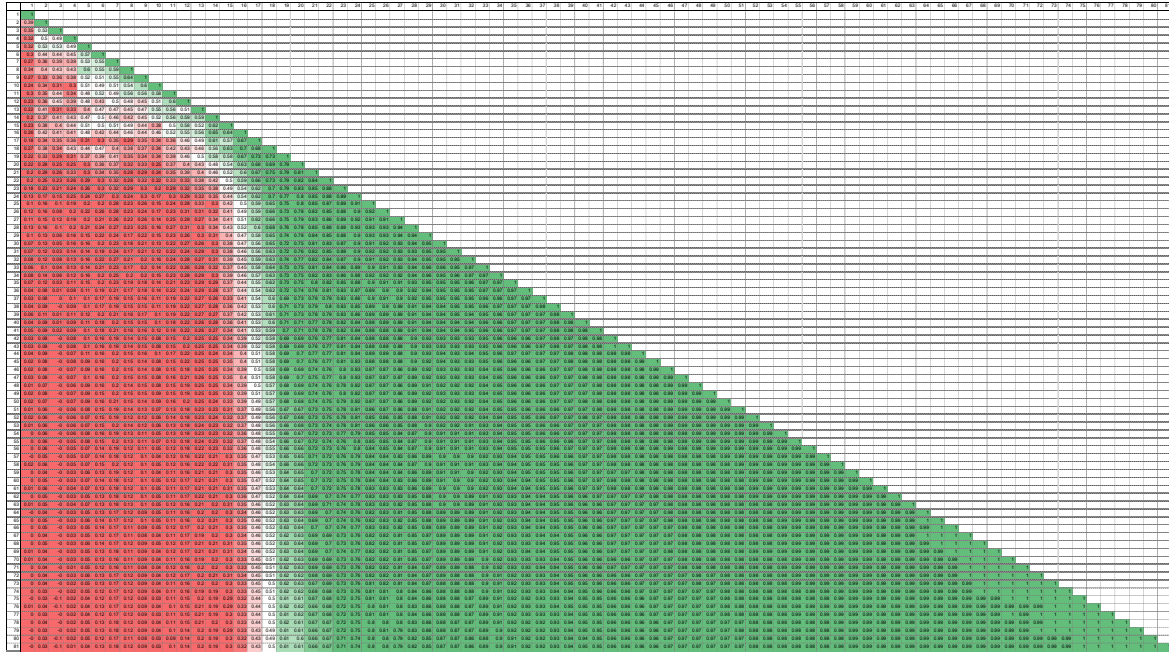


Рис. 3. Матрица корреляции между моментами времени (кадрами) для необлученного образца.

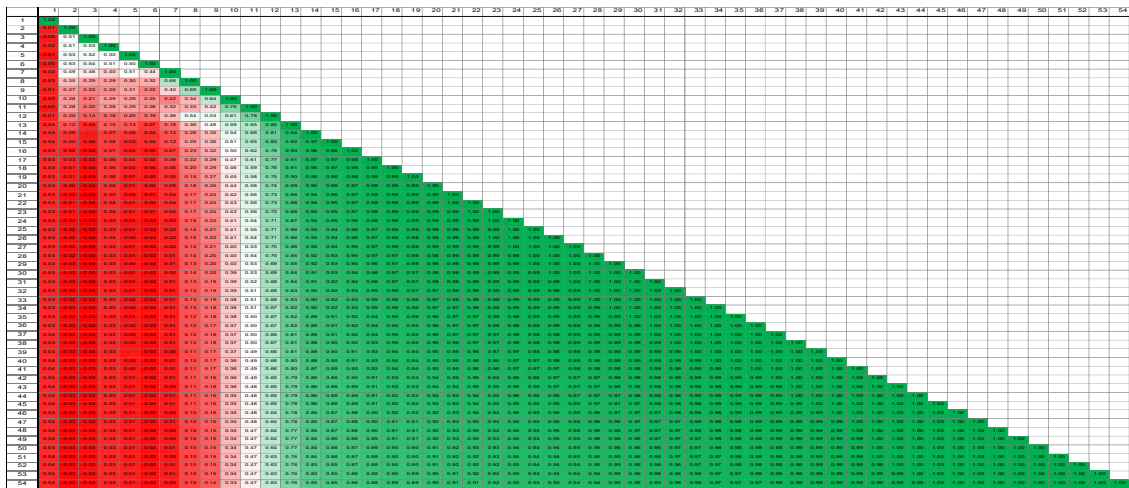


Рис. 4. Матрица корреляции между моментами времени (кадрами) облученного импульсным электронным пучком образца.

Цветовой анализ матрицы выявил: зону близкой корреляции с заметной теснотой связи между кадрами (красная) при слабой теснотой связи между дальними кадрами, переходную зону (белую), в которой происходит быстрое увеличение коэффициента с 0.3 до 0.7 и зону высокой и весьма высокой дальней и ближней тесноты связи между кадрами (рис. 4).

Анализ матрицы факторов выявил, три различные зоны корреляции, которые соотносятся со стадиями на диаграмме деформирования:

- 1) с 2 до 7 кадра – зона, которая совпадает со стадией с переходной стадией π от упругой деформации к квази пластической;
- 2) с 8 до 11 кадры – зона, которая совпадает со стадией II параболического упрочнения;
- 3) с 12 до 54 кадра – зона с заметной, высокой и весьма высокой теснотой связи между кардами, совпадающая со стадией III с линейным упрочнением и низким значением Θ .

5. Заключение

В работе на основе исследований эволюции распределений в пространстве и во времени деформационных полей на поверхности не облученного и облученного импульсным электронным пучком образцов технически чистого алюминия марки А7 при одноосном растяжении впервые предложена методика анализа эволюции картин распределений деформационных полей на поверхности образца при помощи факторного анализа. Выявлены три зоны в корреляционной матрице, которым соответствуют стадиям на деформационных кривых. Предложенный подход позволил получить разделение качественных изменений полей деформаций на границах зон и количественного роста показателей внутри зоны на необлученном и облученном импульсным электронным пучком образце алюминия.

Установлено, что облучение импульсным электронным пучком образцов технически чистого алюминия марки А7 приводит к увеличению в два раза значений приложенного внешнего напряжения для перехода от переходной упругой стадия π к стадии II однородной макропластической деформации

Благодарности

Подготовка образцов для исследования выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEMN-2023-0003). Испытания и анализ данных корреляционного анализа выполнены при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №. FEMN-2022-0004).

6. Литература

- [1] E.V. Kozlov, *Severe Plastic Deformation: Toward Bulk Production of Nanostructured Materials*. N.Y.: Nova Publishers Inc., 2006.
- [2] А.А. Klopotov, А.И. Potekaev, А.М. Ustinov, Yu. F. Ivanov, Yu.A. Abzaev, V.V. Kulagina, Relationships between characteristics of deformation behavior and evolution of deformation fields in aluminum under uniaxial tension, *Russian Physics Journal*, **64**, 574, 2021, doi: 10.1007/s11182-021-02388-1
- [3] Yu.P. Sharkeev, V.P. Vavilov, V.A. Skrypnyak, and et al., Research on the processes of deformation and failure in coarse- and ultrafine-grain states of Zr1-Nb alloys by digital image correlation and infrared thermography, *Materials Science & Engineering A*, **784**, 139–203, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.139203
- [4] M.A Sutton., J.-J. Orteu, H.W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. N.Y.: Springer Science, Business Media, 2009.
- [5] Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов, Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке, *Известия ВУЗов. Физика*, **51**, 60, 2008.
- [6] Д. Лоули, А. Максвелл, *Факторный анализ как статистический метод*. Москва: Книга по требованию, 2013.