Вильдеман, В.Э. Расчетно-экспериментальный метод построения диаграммы деформирования материала в условиях неоднородных полей напряжений / В.Э. Вильдеман, А.И. Мугатаров, А.А. Хмелев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 2. – С. 24–32. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.03

Perm Polytech Style: Wildemann V.E., Mugatarov A.I., Khmelev A.A. Computational-Experimental Method for Stress-Strain Curve Constructing under Conditions of Inhomogeneous Stress Fields. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 2, pp. 24-32. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.03
УДК 539.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

В.Э. Вильдеман, А.И. Мугатаров, А.А. Хмелев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 04 декабря 2023 г.
Одобрена: 10 апреля 2024 г.
Принята к публикации:
21 мая 2024 г.

Ключевые слова:

расчетно-экспериментальный метод, диаграмма деформирования, концентрация напряжений, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Решение задач обеспечения надежности конструкций требует изучения процессов равновесного накопления повреждений, приводящих в том числе к появлению зон разупрочнения в твердых телах. Представляется целесообразным использование моделей закритического деформирования при проведении прочностного анализа конструкций. Однако получение полных диаграмм деформирования материала в стандартных испытаниях затруднено в связи с образованием локализации деформаций в виде шейки. В то же время использование истинных напряжений, учитывающих изменение поперечного сечения тела, некорректно в связи с реализацией сложного напряженного состояния. В связи с этим необходимой является разработка расчетно-экспериментальных методов построения диаграмм деформирования материала в условиях неоднородных полей напряжений. Рациональным при этом представляется использование данных о полях деформации на поверхности тел, которые могут быть получены, например, с помощью бесконтактных оптических видеосистем.

В работе представлен расчетно-экспериментальный метод построения диаграммы деформирования в условиях неоднородных полей напряжений. Рассмотрена упругопластическая модель изотропного материала. Начальными данными метода являются две упругие константы, предел текучести материала, известная диаграмма нагружения тела с концентратором напряжений и соответствующие различным состояниям максимальные значения интенсивности деформаций. Апробация разработанного метода проведена путем численного моделирования процессов растяжения корсетного образца и пластины с концентратором напряжений. Рассмотрены диаграммы деформирования материала с площадкой текучести и без неё. Результаты демонстрируют высокое соответствие изначально задаваемых и восстановленных диаграмм деформирования. Сделан вывод о целесообразности использования разработанного метода при построении диаграмм деформирования материалов и необходимости его модернизации для описания закритической стадии деформирования.

© **Вильдеман Валерий Эрвинович** – д. ф.-м. н., проф., зав. каф. экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, e-mail: wildemann@pstu.ru, ID: 0000-0002-6240-4022.
Мугатаров Артур Ильдарович – асс. каф. экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: 0000-0002-2229-8181.
Хмелев Александр Анатольевич – асп. каф. экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, e-mail: a-khmelev.perm@mail.ru, ID: 0009-0009-4413-5197.

Valeriy E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, e-mail: wildemann@pstu.ru, ID: 0000-0002-6240-4022.
Artur I. Mugatarov – Assistant of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: 0000-0002-2229-8181.
Alexander A. Khmelev – Postgraduate student of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, e-mail: a-khmelev.perm@mail.ru, ID: 0009-0009-4413-5197.

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)

COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL METHOD FOR STRESS-STRAIN CURVE CONSTRUCTING UNDER CONDITIONS OF INHOMOGENEOUS STRESS FIELDS

V.E. Wildemann, A.I. Mugatarov, A.A. Khmelev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 04 December 2023
Approved: 10 April 2024
Accepted for publication:
21 May 2024

Keywords:

computational-experimental method, stress-strain curve, stress concentration, numerical modeling.

ABSTRACT

In order to ensure reliability of structures, it is necessary to study equilibrium damage accumulation which initiates softening zones in solids. It is considered appropriate to use postcritical deformation models when conducting strength analysis of structures. However, obtaining complete stress-strain curves in standard tests is difficult due to the strain localization in the form of a neck. At the same time, the use of true stresses taking into account changes in a specimen cross section is incorrect due to the implementation of a complex stress state. In this regard, it is necessary to develop computational and experimental methods for constructing material stress-strain curves under conditions of inhomogeneous stress fields. In this case it seems reasonable to use data on strain fields on the body's surface, which can be obtained, for example, using non-contact optical video systems.

The paper presents the computational-experimental method for constructing a stress-strain curve under conditions of inhomogeneous stress fields. An elastoplastic model of an isotropic material is considered. The initial data of the method are two elastic constants, the yield stress value, the load diagram of a body with a stress concentrator, and the maximum values of strain intensity corresponding to various states. The developed method was tested by a numerical simulation of deforming an hourglass specimen and a plate with a stress concentrator. Stress-strain curves with and without a yield plateau are considered. The results demonstrate a high agreement between the initially specified and reconstructed stress-strain curves. A conclusion is made about the rationality of using the developed method when constructing stress-strain diagrams and necessity for its modernization to describe the postcritical deformation stage.

Введение

Решение задач обеспечения безопасности и надежности ответственных конструкций требует проведения уточненного прочностного анализа. Его важным аспектом является учет развития в твердых телах зон неупругого деформирования и разрушения. Происходящие при этом в материале равновесные процессы накопления повреждений находят отражение на диаграмме деформирования в виде ниспадающей ветви [1]. Следовательно, целесообразным представляется учет закритической стадии деформирования при проведении прочностных расчетов конструкций [2–7].

Определение материальных функций на закритической стадии деформирования на основе проведения стандартных испытаний на гладких образцах осложняется в связи с образованием на рабочей части локализации деформаций в виде шейки [8–10]. Ряд исследователей для решения данной проблемы проводит расчет не инженерных, а истинных напряжений, учитывающих изменение поперечного сечения образца в области локализации [10–13]. При этом предполагается, что закритическая стадия деформирования материала на истинных диаграммах отсутствует [13, 14]. Однако в данном методе не учитывается, что локализация деформаций приводит не только к изменению поперечного сечения, но и к нарушению однородности полей напряжений и деформаций. Соответственно, актуальным является поиск новых расчетно-экспериментальных методов построения диаграмм деформирования материалов [14–17]. Значительный вклад в данной области внесен В.Г. Баженовым с соавторами [18–27]. Получение материальных функций проводится на основе решения обратной задачи путем корректировки точек диаграммы деформирования до получения высокого соответствия расчетной и экспериментальной диаграмм нагружения.

Развитие техники привело к появлению методов определения полей деформаций на поверхности тела [28–32]. Одним из наиболее распространенных из них является использование бесконтактных оптических видеосистем и метода корреляции цифровых изображений, что позволяет с высокой точностью получать поля деформаций на образцах различной геометрии, в том числе с концентраторами напряжений [32–35]. Представляется целесообразным для повышения точности построения материальных функций использовать в расчетно-экспериментальных методах не только экспериментальные диаграммы нагружения тела, но и данные о деформированном состоянии его поверхности. Преимуществом данного подхода является возможность проведения испытаний на нестандартных образцах, в которых реализуется неоднородное напряженное состояние, что позволит решить проблему образования шейки.

Данная работа посвящена разработке расчетно-экспериментального метода построения диаграммы деформирования материала по диаграммам нагружения тел с концентраторами напряжений с контролем максимальной деформации. Проведена апробация данного метода в вычислительном эксперименте.

1. Постановка краевой задачи

Краевая задача теории пластичности (материал – изотропный, массовые силы не учитываются) представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \sigma_{kl,l}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)=0; \\ \varepsilon_{kl}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)=\dfrac{1}{2}\left[u_{k,l}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)+u_{l,k}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)+u_{m,k}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)u_{m,l}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)\right]; \\ \left(\sigma_{kl}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)-\dfrac{1}{3}\delta_{kl}\sigma_{mm}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)\right)=\dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_i\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)}{\varepsilon_i\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)}\left(\varepsilon_{kl}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)-\dfrac{1}{3}\delta_{kl}\varepsilon_{mm}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)\right), \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_{kl}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)$ – тензор напряжений; $\varepsilon_{kl}\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)$ – тензор конечных деформаций; $u_k\left(\overline{\boldsymbol{r}}\right)$ – вектор перемещений; $\overline{\boldsymbol{r}}$ – радиус-вектор; δ_{kl} – дельта-символ Кронекера; σ_{mm} – первый инвариант тензора напряжений; ε_{mm} – первый инвариант тензора деформаций; $\sigma_{mm}=3K\varepsilon_{mm}$, где K – модуль объемного сжатия материала; σ_i и ε_i – интенсивности напряжений и деформаций соответственно, связанные через функцию пластичности Ильюшина:

$$\sigma_i\left(\varepsilon_i\right)=3G\left(1-\omega\left(\varepsilon_i\right)\right)\varepsilon_i;$$

$$\sigma_i=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_{11}-\sigma_{22}\right)^2+\left(\sigma_{22}-\sigma_{33}\right)^2+\left(\sigma_{33}-\sigma_{11}\right)^2+6\left(\tau_{12}^2+\tau_{13}^2+\tau_{23}^2\right)}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_i=\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_{11}-\varepsilon_{22}\right)^2+\left(\varepsilon_{22}-\varepsilon_{33}\right)^2+\left(\varepsilon_{33}-\varepsilon_{11}\right)^2+6\left(\varepsilon_{12}^2+\varepsilon_{13}^2+\varepsilon_{23}^2\right)}.$$

Здесь G – модуль сдвига материала; $\omega\left(\varepsilon_i\right)$ – функция пластичности Ильюшина. Уравнения (1) дополняются граничными условиями:

$$\begin{cases} \sigma_{ij}n_j\big|_{\Gamma_s}=S_i^0; \\ u_i\big|_{\Gamma_u}=u_i^0, \end{cases} \quad (3)$$

где n_j – единичный вектор нормали к площадке поверхности тела; Γ_s – поверхность, на которой заданы силовые граничные условия; S_i^0 – компоненты вектора напряжений, приложенного к поверхности Γ_s; u_i^0 – компоненты вектора перемещений, заданного на поверхности Γ_u.

2. Расчетно-экспериментальный метод построения диаграммы деформирования материала при растяжении тела с концентратором напряжений

Исходными данными предлагаемого расчетно-экспериментального метода являются:

1) модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала (из которых можно рассчитать модуль сдвига и модуль объемного сжатия), определяемые из стандартного испытания на растяжение гладкого образца;

2) предел текучести материала (также определяется из стандартного испытания на растяжение гладкого образца);

3) диаграмма нагружения тела известной геометрии с концентратором напряжений (в виде зависимости нагрузки P от перемещения u);

4) максимальные значения интенсивности деформаций $\varepsilon_i^{max}\left(u_{(m)}\right)$ для каждой из точек диаграммы нагружения (могут быть определены, например, с помощью видеосистемы).

Отметим, что максимальные значения интенсивности деформаций необходимы для исключения влияния еще не восстановленной части диаграммы деформирования на значения расчетной нагрузки, что позволит на каждом шаге расчетно-экспериментального метода подбирать лишь значения интенсивности напряжений.

Алгоритм метода заключается в следующем:

1) задается идеальный упругопластический материал с известными упругими модулями и пределом текучести;

2) решается краевая задача (1) с граничными условиями (3), перемещение границы тела на этапе m задается равным $u_{(m)}$;

3) определяется значение расчетной нагрузки $P_{(m)}$, проводится его сравнение с экспериментальным. Если относительное значение отклонения расчетной нагрузки от экспериментальной не превышает допустимого значения, происходит переход к п.2 со значением перемещения границы тела $u_{(m+1)}$. Иначе корректируется интенсивность напряжений для значения интенсивности деформаций $\varepsilon_i^{max}\left(u_{(m)}\right)$: увеличивается, если расчетная нагрузка ниже экспериментальной; уменьшается в противном случае. Переход к п. 2 осуществляется с теми же граничными условиями. Завершению работы алгоритма соответствует получение решений краевых задач для всех точек экспериментальной диаграммы нагружения.

Иллюстрация работы алгоритма по восстановлению диаграммы деформирования материала представлена на рис. 1. Предложенный метод реализован на языке APDL в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS.

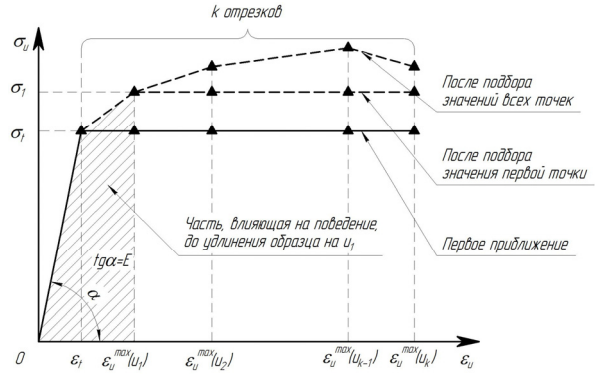
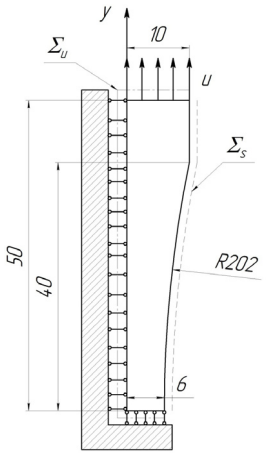


Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма по восстановлению диаграммы деформирования материала

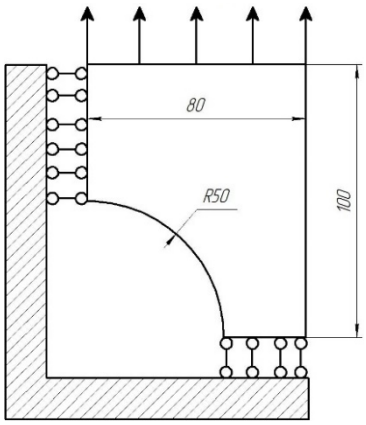
Fig. 1. Illustration of the algorithm for the material stress-strain curve reconstructing

3. Апробация расчетно-экспериментального метода

Апробация предложенного расчетно-экспериментального метода проведена для случаев растяжения корсетного образца (осесимметричная постановка краевой задачи) и пластины с концентратором напряжений (реализуется плоское напряженное состояние). Геометрия тел и граничные условия представлены на рис. 2. На первом этапе проведено численное моделирование процессов деформирования рассматриваемых тел для двух вариантов диаграммы деформирования материала: без площадки текучести и с её наличием (рис. 3). Построены расчетные диаграммы нагружения тел, определены максимальные значения интенсивности деформаций для каждого значения граничных условий. Затем на основе расчетных диаграмм нагружения проведено восстановление диаграммы деформирования материала и её сравнение с закладываемой изначально в расчет.



a

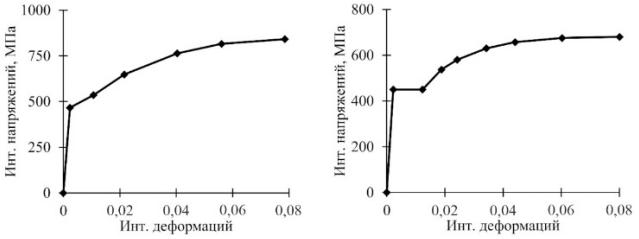


b

Рис. 2. Геометрия тела и граничные условия: *a* – корсетный образец; *b* – пластина с концентратором напряжений

Fig. 2. Body's geometry and boundary conditions: *a* – specimen; *b* – plate with a stress concentrator

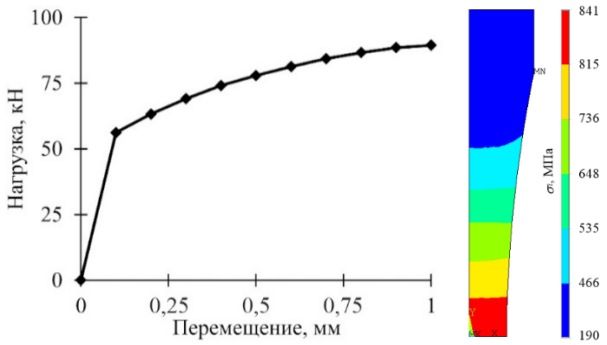
Получаемые при деформировании корсетного образца диаграммы нагружения и поля напряжений представлены на рис. 4. Можно отметить, что диаграммы нагружения значительно отличаются от диаграмм деформирования, несмотря на небольшую величину концентрации напряжений. Результаты подтверждают неоднородность распределения напряжений, из которой следует некорректность использования пересчета напряжений с учетом текущего значения площади поперечного сечения для построения истинных диаграмм деформирования.



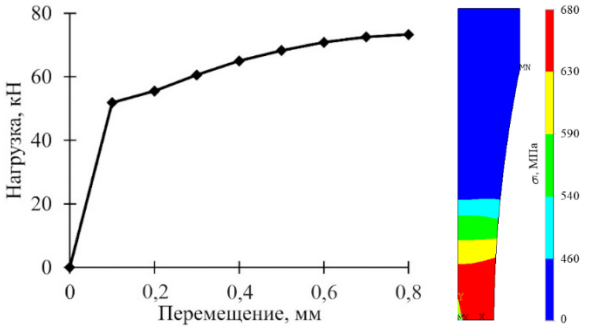
a *b*

Рис. 3. Диаграммы деформирования материала: *a* – без площадки текучести; *b* – с площадкой текучести

Fig. 3. Material stress-strain curves: *a* – without yield plateau; *b* – with yield plateau



a



b

Рис. 4. Диаграммы нагружения и поля интенсивности напряжений, полученные в результате моделирования процесса растяжения корсетного образца: *a* – для материала без площадки текучести; *b* – с площадкой текучести

Fig. 4. Loading diagrams and fields of stress intensity obtained by the modeling of the hourglass specimen stretching process: *a* – for the material without yield plateau; *b* – for the material with yield plateau

Восстановленные с помощью разработанного метода диаграммы деформирования материала, изображенные вместе с исходными, представлены на рис. 5. Результаты

демонстрируют высокую эффективность предложенного алгоритма и высокое соответствие изначально заложенной в расчет и восстановленной диаграммы деформирования. Некоторые несовпадения (в частности, на площадке текучести, см. рис. 5, *b*) могут быть устранены за счет увеличения числа точек, получаемых на диаграмме нагружения тела.

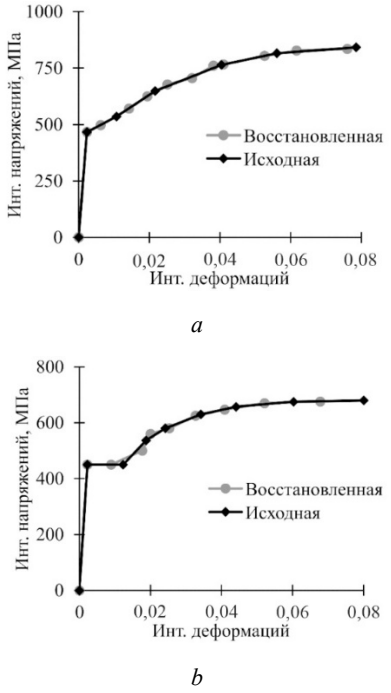


Рис. 5. Результаты восстановления диаграмм деформирования: *a* – для материала без площадки текучести; *b* – для материала с площадкой текучести

Fig. 5. Stress-strain curve reconstruction results: *a* – for the material without yield plateau; *b* – for the material with yield plateau

Получаемые при деформировании пластины с концентратором диаграммы нагружения и соответствующие поля напряжений представлены на рис. 6. Результаты демонстрируют значительное повышение неоднородности поля напряжений при росте концентрации напряжений (в сравнении с корсетным образцом). В связи с этим рациональным является предположение о возможности реализации зон разупрочнения вблизи концентраторов напряжений, что определяет перспективность развития предложенного расчетно-экспериментального метода для построения полных диаграмм деформирования материала.

Восстановленные с помощью разработанного метода диаграммы деформирования материала, наложенные на изначально задаваемые, представлены на рис. 7. Результаты демонстрируют достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма, однако в некоторых точках наблюдается расхождение между исходной и восстановленной диаграммами. Данный эффект объясняется локализацией деформаций вблизи вершины концентратора и сравнительно небольшой зоной с развитыми пластическими деформациями. В таком случае на результаты работы алгоритма существенное влияние начинает оказывать конечно-элементная сетка, подбор которой на основе решения задачи сходимости упругого решения может быть недостаточным.

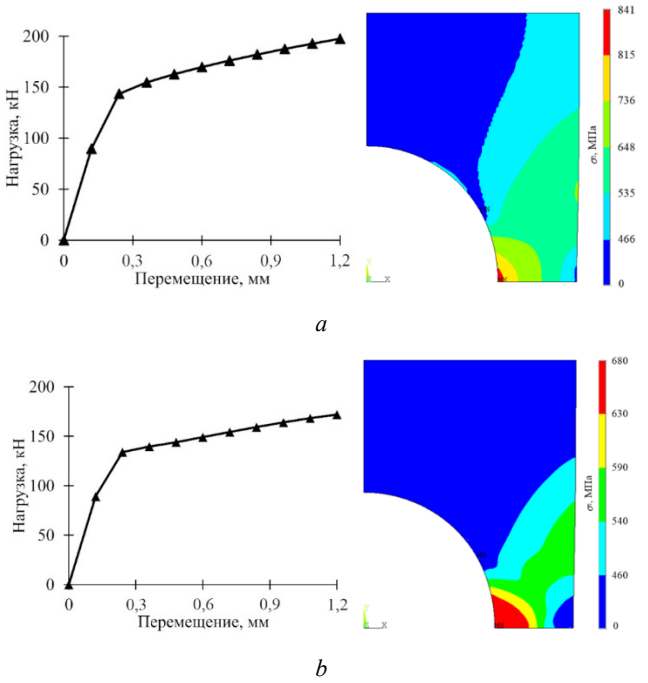


Рис. 6. Диаграммы нагружения и поля интенсивности напряжений, полученные в результате моделирования процесса растяжения пластины: *a* – для материала без площадки текучести; *b* – с площадкой текучести

Fig. 6. Loading diagrams and fields of stress intensity obtained by the modeling of the plate stretching process: *a* – for the material without yield plateau; *b* – for the material with yield plateau

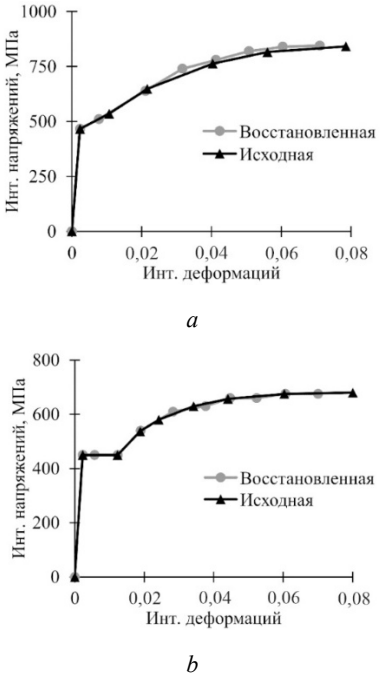


Рис. 7. Результаты восстановления диаграмм деформирования: *a* – для материала без площадки текучести; *b* – для материала с площадкой текучести

Fig. 7. Stress-strain curve reconstruction results: *a* – for the material without yield plateau; *b* – for the material with yield plateau

Заключение

В работе представлен новый расчетно-экспериментальный метод восстановления диаграммы деформирования материала по известным диаграммам нагружения и максимальным значениям интенсивности деформаций, которые могут быть получены в эксперименте, например, при использовании бесконтактной оптической видеосистемы и метода корреляции цифровых изображений. Алгоритм разработанного метода реализован на языке APDL в программном пакете ANSYS. Проведена апробация предлагаемого расчетно-экспериментального метода в вычислительных экспериментах по растяжению корсетного образца и пластины с концентратором напряжений. Продемонстрировано, что восстановленные диаграммы деформирования с высокой степенью соответствуют исходным, что подтверждает эффективность разработанного алгоритма. Отмечено, что шаг нагружения (число точек на расчетной диаграмме нагружения) и степень дискретизации расчетной области могут влиять на восстанавливаемую диаграмму деформирования материала, соответственно, требуется проведение дальнейших исследований. Применимость разработанного расчетно-экспериментального метода ограничена соответствием исследуемых материалов выбранной модели упругопластического поведения. Планируется применение предложенного метода к обработке результатов натурных экспериментов.

Библиографический список

1. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов; под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука: Физматлит, 1997. – 288 с.

2. Вильдеман, В.Э. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, А.И. Мугатаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 3. – С. 32–40. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.04

3. Вильдеман, В.Э. Задача о кручении цилиндрического тела с учетом разупрочнения / В.Э. Вильдеман, А.И. Мугатаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 4. – С. 29–36. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.03

4. Вильдеман, В.Э. Устойчивость закритического деформирования при кручении толстостенного цилиндрического тела / В.Э. Вильдеман, А.И. Мугатаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 4. – С. 135–147. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.12

5. Радченко, В.П. Метод решения краевой упругопластической задачи о растяжении полосы с концентраторами напряжений с учетом локальных областей пластического разупрочнения материала / В.П. Радченко, С.В. Горбунов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2014. – № 4 (37). – С. 98–110. DOI: 10.14498/vsgtu1366

6. Wildemann, V.E. The analytical and numerical solution of the problem of stretching a system of parallel elements with random strength characteristics taking into account the postcritical stage of deformation and rigidity of the loading system / V.E. Wildemann, A.I. Mugatarov, M.P. Tretyakov // Meccanica. – 2022. – Vol. 57. – P. 2323–2335. DOI: 10.1007/s11012-022-01573-x

7. Вильдеман, В.Э. Моделирование процесса равновесного роста трещины в композитном образце с позиций механики закритического деформирования / В.Э. Вильдеман, А.И. Мугатаров // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2022. – № 1. – С. 48–61. DOI: 10.14498/vsgtu1886

8. Numerical investigation of the post-necking behavior of aluminum sheets in the presence of geometrical and material inhomogeneities / M.B. Gorji, N. Manopulo, P. Hora, F. Barlat // International Journal of Solids and Structures. – 2016. – Vol. 102–103. – P. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.10.017

9. Necking phenomenon based on the Aramis system / S. Dong, A. Xian, Z. Lian, H.S. Mohamed, H. Ren // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2019. – Vol. 233, iss. 11. – P. 3904–3916. DOI: 10.1177/0954406218802300

10. Erpalov, M.P. Optical method to study post-necking material behaviour / M.P. Erpalov, V.A. Khotinov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2288, no. 030007. DOI: 10.1063/5.0028748

11. Построение расчётных кривых деформирования в обеспечение наполнения банка данных по конструкционной прочности материалов авиационных двигателей / Б.Е. Васильев, М.Е. Волков, Е.Н. Бредихина, И.И. Плещеев // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – Т. 42, № 5. – С. 656–670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19

12. Параметры зарождения шейки в деформируемых образцах хромоникелевой стали, облученных нейтронами / М.С. Мережко, О.П. Максимин, Д.А. Мережко, А.А. Шаймерденов, М.Р. Short // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 7. – С. 778–784. DOI: 10.1134/S0015323019050127

13. Identification of post-necking stress–strain curve for sheet metals by inverse method / K. Zhao, L. Wang, Y. Chang, J. Yan // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 92. – P. 107–118. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.09.004

14. Swillo, S. A New Approach for Evaluation True Stress–Strain Curve from Tensile Specimens for DC04 Steel with Vision Measurement in the Post-Necking Phases / S. Swillo, R. Cacko // Materials. – 2023. – Vol. 16, no. 558. DOI: 10.3390/ma16020558

15. Владимиров, С.А. Исследование процесса глубокого деформирования образцов с кольцевой выточкой при их растяжении / С.А. Владимиров, С.И. Трефилов // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – Т. 81, № 3. – С. 81–85.

16. Kamaya, M. A procedure for determining the true stress-strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis / M. Kamaya, M. Kawakubo // Mechanics of Materials. – 2011. – Vol. 43, iss. 5. – P. 243–253. DOI: 10.1016/j.mechmat.2011.02.007

17. Identification of Post-necking Tensile Stress–Strain Behavior of Steel Sheet: An Experimental Investigation Using Digital Image Correlation Technique / S.K. Paul, S. Roy, S. Sivaprasad, H.N. Bar, S. Tarafder // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2018. – No. 27. – P. 5736–5743. DOI: 10.1007/s11665-018-3701-3

18. Моделирование процессов деформирования и локализации пластических деформаций при кручении-растяжении тел

вращения / В.Г. Баженов, С.В. Зефиров, Л.Н. Крамарев, Е.В. Павлёнкова // Прикладная математика и механика. – 2008. – Т. 72, № 2. – С. 342–350.

19. Influence of the type of stress-strain state on the true stress-strain curve for the elastoplastic materials / V.G. Bazhenov, S.L. Osetrov, D.L. Osetrov, A.A. Artemyeva // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Vol. 28. – P. 53–56.

20. Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V.G. Bazhenov, E.G. Gonik, A.I. Kibets, M.V. Petrov, T.G. Fedorova, I.A. Frolova // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Vol. 28. – P. 16–20.

21. Баженов, В.Г. Численное моделирование растяжения стержня и идентификация параметров деформирования материала в режиме сверхпластичности / В.Г. Баженов, С.Л. Осетров, Д.Л. Осетров // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79, № 4. – С. 471–483.

22. Баженов, В.Г. Анализ закономерностей растяжения упругопластических образцов и образования шейки с учетом краевых эффектов / В.Г. Баженов, С.Л. Осетров, Д.Л. Осетров // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59, № 4. – С. 133–140.

23. Численно-экспериментальный анализ процессов растяжения-кручения цилиндрических образцов из стали 09Г2С при больших деформациях до разрушения / В.Г. Баженов, Е.В. Нагорных, Д.Л. Осетров, А.А. Рябов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 495–507.

24. Экспериментальное и теоретическое исследование больших деформаций цилиндрических образцов из стали 09Г2С с концентраторами напряжений при нагружении растяжением-кручением до разрушения / В.Г. Баженов, Д.А. Казаков, Е.В. Нагорных, Д.Л. Осетров, А.А. Рябов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 69–81. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.06

25. Баженов, В.Г. Трехмерное моделирование больших деформаций пористых металлов и построение их диаграмм деформирования / В.Г. Баженов, М.Н. Жестков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 3 (45). – С. 56–63. DOI: 10.37972/chgpu.2020.58.44.005

26. Моделирование поведения упругопластических стержней при растяжении-кручении и построение их диаграмм деформирования до разрыва с учетом вида напряженно-деформированного состояния / В.Г. Баженов, Д.А. Казаков, Е.В. Нагорных, Д.Л. Осетров, А.А. Рябов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 501, № 1. – С. 23–28. DOI: 10.31857/S268674002106002X

27. Анализ методов построения истинных диаграмм деформирования упругопластических материалов при больших деформациях / В.Г. Баженов, Д.А. Казаков, С.С. Куканов, Д.Л. Осетров, А.А. Рябов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 12–22. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.02

28. Ахметзянов, М.Х. Исследование локализации деформаций и напряжений в шейке тонкой полосы методом фотоупругих покрытий / М.Х. Ахметзянов, Г.Н. Албаут, В.Н. Барышников // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 1. – С. 347–350.

29. Степанова, Л.В. Экспериментальное и конечно-элементное определение коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса у вершины трещины в линейно-упругом изотропном материале. Часть I / Л.В. Степанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 237–249. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.20

30. Степанова, Л.В. Экспериментальное и конечно-элементное определение коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса у вершины трещины в линейно-упругом изотропном материале. Часть II / Л.В. Степанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 1. – С. 72-85. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.08

31. Степанова, Л.В. Применение метода голографической интерферометрии для реконструкции ряда М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины / Л.В. Степанова, Д.А. Семенов, Г.С. Анисимов // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 15–46. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-15-46

32. Третьякова, Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций / Т.В. Третьякова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 162–171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.16

33. Закритическое деформирование и разрушение тел с концентраторами в условиях плоского напряженного состояния / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, Т.В. Третьякова, М.П. Третьяков // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2017. – № 5. – С. 22–29.

34. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов / П.С. Любутин, С.В. Панин, В.В. Титков, А.В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 87–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.08

35. The Analysis of Stress Raisers Affecting the GFRP Strength at Quasi-Static and Cyclic Loads by the Theory of Critical Distances, Digital Image Correlation, and Acoustic Emission / D. Lobanov, A. Yankin, M. Mullahmetov, E. Chebotareva, V. Melnikova // Polymers. – 2023. – Vol. 15, no. 2087. DOI: 10.3390/polym15092087

References

1. Wildemann V.E., Sokolkin Y.V., Tashkinov A.A. Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozicionnyh materialov [The mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. Moscow, Nauka. Fizmatlit, 1997, 288 p.

2. Wildemann V.E., Tretyakov M.P., Mugatarov A.I. Modeling the deformation process of a plate with a stress concentrator taking into account the postcritical stage of material deformation // PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, No. 3, pp. 32-40 DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.04

3. Wildemann V.E., Mugatarov A.I. The torsion problem of a cylindrical solid taking into account the material weakening // PNRPU Mechanics Bulletin, 2019, No. 4, pp. 29-36. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.03

4. Wildemann V.E., Mugatarov A.I. Stability of postcritical deformation during torsion of thick-walled cylindrical solid //

PNRPU Mechanics Bulletin, 2022, no. 4, pp. 135-147. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.12

5. Radchenko V.P., Gorbunov S.V. The method of solution of the elastic-plastic boundary value problem of tension of strip with stress raisers with allowance for local domains of softening plasticity of material // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2014, No. 4 (37), pp. 98–110. DOI: 10.14498/vsgtu1366

6. Wildemann V.E., Mugatarov A.I., Tretyakov M.P. The analytical and numerical solution of the problem of stretching a system of parallel elements with random strength characteristics taking into account the postcritical stage of deformation and rigidity of the loading system // Meccanica, 2022, Vol. 57, pp. 2323-2335. DOI: 10.1007/s11012-022-01573-x

7. Wildemann V.E., Mugatarov A.I. Modeling the process of equilibrium crack growth in a composite specimen from the standpoints of the postcritical deformation mechanics // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2022, Vol. 26, No. 1, pp. 48–61. DOI: 10.14498/vsgtu1886

8. Gorji M.B., Manopulo N., Hora P., Barlat F. Numerical investigation of the post-necking behavior of aluminum sheets in the presence of geometrical and material inhomogeneities // Int. J. Solids Struct., 2016, Vol. 102-103, pp. 56-65. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.10.017

9. Dong S., Xian A., Lian Z., Mohamed H.S., Ren H. Necking phenomenon based on the Aramis system // Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci., 2019, Vol. 233, I. 11, pp. 3904-3916. DOI: 10.1177/0954406218802300

10. Erpalov M.P., Khotinov V.A. Optical method to study post-necking material behaviour // AIP Conf. Proc., 2020, Vol. 2288, No. 030007. DOI: 10.1063/5.0028748

11. Vasilyev B.E., Volkov M.E., Bredihina E.N., Pleshcheev I.I. Construction of stress-strain curves for aviation materials database formation // Mater. Phys. Mech., 2019, Vol. 42, I. 5, pp. 656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19

12. Merezhko M.S., Maksimkin O.P., Merezhko D.A., Shaimerdenov A.A., Short M.P. Parameters of necking onset during deformation of chromium–nickel steel irradiated by neutrons // Phys. Met. Metallogr., 2019, Vol. 120, No. 7, pp. 716-721. DOI: 10.1134/S0031918X19050120

13. Zhao K., Wang L., Chang Y., Yan J. Identification of post-necking stress–strain curve for sheet metals by inverse method // Mech. Mater., 2016, Vol. 92, pp. 107-118. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.09.004

14. Swillo S., Cacko R. A New Approach for Evaluation True Stress–Strain Curve from Tensile Specimens for DC04 Steel with Vision Measurement in the Post-Necking Phases // Materials, 2023, Vol. 16, No. 558. DOI: 10.3390/ma16020558

15. Vladimirov S.A., Trefilov S.I. Studying the process of deep deformation of samples with circular recess during stretching // Kosmonavtika i raketostroenie [Cosmonautics and rocket engineering], 2017, Vol. 81, No. 3, pp. 81-85.

16. Kamaya M., Kawakubo M. A procedure for determining the true stress-strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis // Mech. Mater, 2011, Vol. 43, I. 5, pp. 243-253. DOI: 10.1016/j.mechmat.2011.02.007

17. Paul S.K., Roy S., Sivaprasad S., Bar H.N., Tarafder S. Identification of Post-necking Tensile Stress–Strain Behavior of Steel Sheet: An Experimental Investigation Using Digital Image Correlation Technique // J. Mater. Eng. Perform., 2018, No. 27, pp. 5736-5743. DOI: 10.1007/s11665-018-3701-3

18. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kramarev L.N., Pavlenkova Ye.V. Modelling of the deformation processes and the localization of plastic deformations in the torsion-tension of solids of revolution // J. Appl. Math. Mech., 2008, Vol. 72, No. 2, pp. 226-232. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2008.04.001

19. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L., Artemyeva A.A. Influence of the type of stress-strain state on the true stress-strain curve for the elastoplastic materials // Mater. Phys. Mech., 2016, Vol. 28, pp. 53-56.

20. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Petrov M.V., Fedorova T.G., Frolova I.A. Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending // Mater. Phys. Mech., 2016, Vol. 28, pp. 16-20.

21. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L. Numerically modeling tension of a rod and identifying material deformation parameters in the super-plasticity mode // Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of strength and plasticity], 2017, Vol. 79, No. 4, pp. 471-483.

22. Bazhenov V.G., Osetrov S.L., Osetrov D.L. Analysis of Stretching of Elastoplastic Samples and Necking with Edge Effects // J. Appl. Mech. Tech. Phy., 2018, Vol. 59, pp. 693-698. DOI: 10.1134/S0021894418040168

23. Bazhenov V.G., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Numerical and experimental analysis of tension-torsion processes in cylindrical samples made of 09G2S steel under large deformations before destruction // Uchen. zap. Kazan. un-ta. Ser. Fiz.-matem. nauki, 2018, Vol. 160, No. 3, pp. 495-507.

24. Bazhenov V.G., Kazakov D.A., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. The experimental and theoretical study of large deformations of cylindrical samples from steel 09G2S with stress concentrators under tension-torsion loading to failure // PNRPU Mechanics Bulletin, 2018, No. 4, pp. 69-81. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.06

25. Bazhenov V.G., Zhestkov M.N. Three-dimensional modeling of large deformations for porous metals and definition of theirs stress-strain diagrams // Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ja. Jakovleva. Serija: Mehanika predel'nogo sostojanija [Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State, 2020, No. 3 (45), pp. 56-63. DOI: 10.37972/chgpu.2020.58.44.005

26. Bazhenov V.G., Kazakov D.A., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Modeling the Behavior of Elastoplastic Rods during Tension–Torsion Deformation and Plotting Their Strain Diagram before Rupture While Taking into Account the Type of Stress–Strain State // Dokl. Phys, 2021, Vol. 66, pp. 311–315. DOI: 10.1134/S102833582111001X

27. Bazhenov V.G., Kazakov D.A., Kukanov S.S., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Analysis of Methods for Constructing true Deformation Diagrams of Elastoplastic Materials under Large Deformations // PNRPU Mechanics Bulletin, 2023, No. 4, pp. 12-22. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.02

28. Akhmetzyanov M.Kh., Albaut G.N., Baryshnikov V.N. A study of strain and stress localization in the neck of a flat bar by means of photoelastic coating method // Phys. Mesomech., 2004, Vol. 7, No. 1, pp. 347-350.

29. Stepanova L.V. Experimental determination and finite element analysis of coefficients of the multi-parameter Williams series expansion in the vicinity of the crack tip in linear elastic materials. Part I // PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, No. 4, pp. 237-249. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.20

30. Stepanova L.V. Experimental determination and finite element analysis of coefficients of the multi-parameter Williams series expansion in the vicinity of the crack tip in linear elastic materials. Part II // PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, No. 1, pp. 72-85. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.08

31. Stepanova L.V., Semenov D.A., Anisimov G.S. Application ofholography method for the restoration of the Williams series near the crack tip // Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaia seriia [Vestnik of Samara University. Natural Science Series], 2023, Vol. 29, No. 1, pp. 15–46. DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-15-46

32. Tretyakova T.V. Singularities in using Vic-3D digital image correlation software and its application to the study of inelastic strain fields // Comp. Contin. Mech., 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 162-171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.16

33. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P. Supercritical Deformation and Fracture of Bodies with Concentrators under Plane Stress State Conditions // Mech. Solids, 2017, Vol. 52, pp. 488-494. DOI: 10.3103/S002565441705003X.

34. Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Eremin A.V., Sunder R. Development of digital image correlation method to study deformation and fracture processes of structural materials // PNRPU Mechanics Bulletin, 2019, No. 1, pp. 87-107. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.08

35. Lobanov D., Yankin A., Mullahmetov M., Chebotareva E., Melnikova V. The Analysis of Stress Raisers Affecting the GFRP Strength at Quasi-Static and Cyclic Loads by the Theory of Critical Distances, Digital Image Correlation, and Acoustic Emission // Polymers, 2023, Vol. 15, No. 2087. DOI: 10.3390/polym15092087

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00765 (https://rscf.ru/project/22-19-00765/) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with support of the Russian Science Foundation (Project No. 22-19-00765, https://rscf.ru/project/22-19-00765/) in Perm National Research Polytechnic University.

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

The contribution of the authors is equivalent.