

## **АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРИЗМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

*Зеньков Е.В.*

*Иркутский государственный университет путей сообщения;*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск*

**Ключевые слова:** призматический образец, напряженно-деформированное состояние, метод корреляции цифровых изображений, метод конечных элементов.

**Аннотация.** В статье описываются экспериментальные исследования характеристик напряженно-деформированного состояния лабораторного призматического образца, используемого для оценки конструкционной прочности материала. Данный образец позволяет моделировать в своей рабочей зоне двухосное растяжение материала с различным соотношением величин главных напряжений и при этом его нагружение осуществляется на стандартном испытательном оборудовании с одним силовым приводом. Исследования перемещений и деформаций образцов проводится на стадии их упругого деформирования на основе использования метода корреляции цифровых изображений. Выполнен количественный анализ сравнения результатов, полученных по методу корреляции цифровых изображений, с результатами моделирования физического эксперимента на основе метода конечных элементов. По совокупности представленных данных полученные экспериментальные и расчетные перемещения и деформации имеют расхождение, не превышающее 14%.

## **ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A LABORATORY PRISMATIC SAMPLE FOR MECHANICAL TESTS**

*Zenkov E.V.*

*Irkutsk State Transport University;*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk*

**Keywords:** prismatic specimen, stress-strain state, digital image correlation method, finite element method.

**Abstract.** The article describes experimental studies of the characteristics of the stress-strain state (SSS) of a laboratory prismatic sample used to assess the structural strength of the material. This sample makes it possible to simulate in its working area the biaxial tension of a material with different ratios of principal stresses, and at the same time its loading is carried out on standard testing equipment with one power drive. The study of displacements and deformations of samples is carried out at the stage of their elastic deformation based on the use of the digital image correlation method. A quantitative analysis was performed comparing the results obtained using the ICCI with the results of modeling a physical experiment based on the finite element method. Based on the totality of the presented data, the obtained experimental and calculated displacements and deformations have a discrepancy not exceeding 14%.

### **Введение**

Исследования прочности деталей машин и конструкций в зависимости от вида возникающего в них напряженно-деформированного состояния (НДС) проводятся, как правило, на основе испытания специальных лабораторных образцов, способных создавать в своей рабочей зоне НДС с требуемыми параметрами [1-3]. В свою очередь, наибольшую трудоемкость на лабораторных образцах вызывает моделирование НДС, характеризующее различным соотношением величин главных напряжений и их знаков. Указанное состояние может быть воспроизведено, как правило, на образцах, нагружаемых на нестандартном испытательном оборудовании, имеющим несколько силовых приводов, или на основе использования оснастки сложной формы, преобразующей одноосное силовое воздействие испытательной машины через систему рычагов, соединенных с образцом [4].

В данной работе описываются экспериментальные исследования НДС лабораторного призматического образца, позволяющего моделировать в своей рабочей зоне двухосное

растяжение материала с различным соотношением величин главных напряжений и испытываемого на стандартном испытательном оборудовании с одним силовым приводом [5], с целью оценки достоверности этого НДС, полученного в результате расчетных исследований методом конечных элементов (МКЭ). Как показали результаты этих исследований [6], варьирование геометрических параметров указанного образца (высотой призматической части, углом скоса боковой опоры и т.д.), позволяет воспроизводить требуемое двухосное НДС, подобно тому НДС, которое возникает в исследуемой конструкции, прочность которой оценивается.

### Материалы и методы исследования

Для оценки достоверности характеристик НДС предложенных образцов, полученных в результате исследований по МКЭ, осуществлялись экспериментальные исследования перемещений и деформаций этих образцов. При этом в эксперименте использовал метод корреляции цифровых изображений (МКЦИ) [9], реализованный в цифровой оптической системе Vic-3D Correlated Solutions [7, 8]. Данная система представлена на рисунке 1.

С помощью МКЦИ производится отслеживание смещений одних и тех же физических точек на поверхности тела до и после его деформирования. Свидетелями этому являются смещения элементов системы хаотически распределенных по поверхности объекта и неразрывно связанных с ним малоразмерных меток-пятен – спекл-структуры [8]. Для анализа полей перемещений необходимы, как минимум, два изображения поверхности испытуемого объекта со спекл-структурой. Одно из этих изображений, как правило, регистрируется в исходном состоянии объекта, а второе – при заданной нагрузке. В ходе обработки полученных изображений вся поверхность объекта разбивается на фрагменты, и анализируется перемещение спекл-структуры в пределах каждого элементарного окна [8, 9].



Рис. 1. Система бесконтактного анализа перемещений и деформаций Vic-3D:

1 – компьютер с ПО, 2 – цифровые камеры, 3 – набор калибровочных таблиц, 4 – система подсветки

Наиболее важным параметром, определяющим точность получаемых экспериментальных данных на основе использования системы Vic-3D, является уровень дискретности спекл-структуры, связанной с поверхностью объекта. Для получения эффективной корреляции структура должна быть нерегулярной, изотропной;

высококонтрастной. Для обеспечения метрологически необходимой спекл-структуры на поверхности образца и оценки достоверности получаемых деформационных характеристик проведены тестовые испытания на растяжение пластинчатых образцов с эталонными концентраторами напряжений в виде круглых отверстий [2]. Результаты такой оценки опубликованы в работе [10]. В соответствии с [10] измерительная погрешность МКЦИ при определении всех компонент деформаций около отверстия не превысила 8%.

Для экспериментального исследования характеристик НДС призматических образцов в процессе их испытания использовался образец с геометрическими размерами, представленными на рисунке 2.

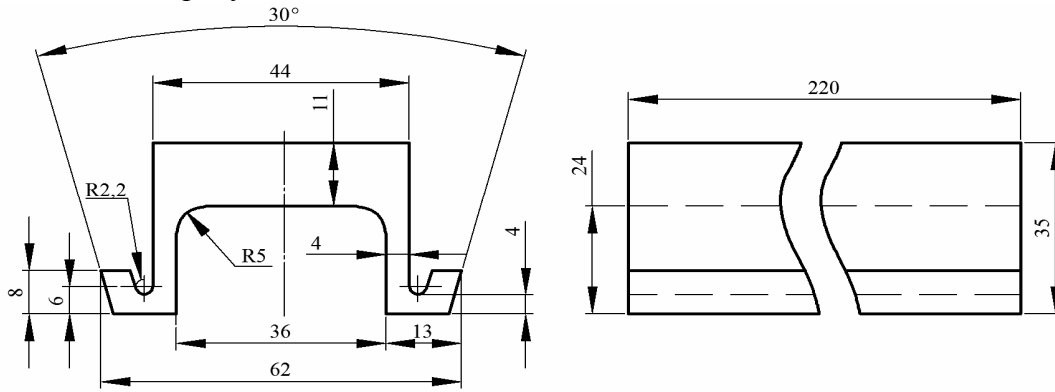


Рис. 2. Геометрические размеры призматического образца

Образцы были изготовлены из полосового сортового проката методом фрезерования. Экспериментальное исследование НДС, соответствующее упругому деформированию образцов, осуществлялось на стандартной одноприводной испытательной машине Instron 5989 (рис. 3). Для создания двухосного растяжения материала в образце использовались призматическая 4 и концевые опоры 3 (рис. 3,а), размещаемые на столе испытательной машины (рис. 3 б).

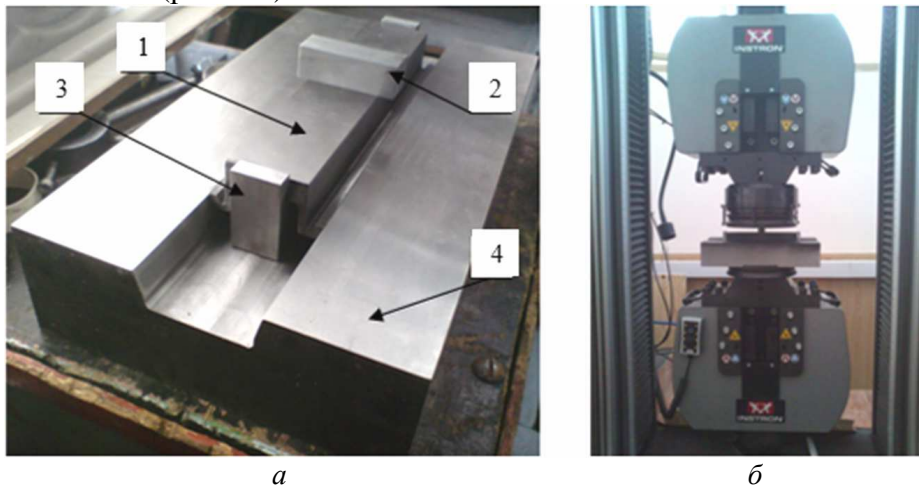


Рис. 3. Лабораторная установка для испытания призматических образцов: а – базирование образца в опорах (1 – образец, 2 – усилие, создаваемое толкателем испытательной машины, 3 – концевые опоры, 4 – призматическая опора), б – базирование призматической опоры с образцом на рабочем столе испытательной машины

Исследование перемещений и деформаций призматического образца выполнялось при постоянной скорости нагружения 2 мм/мин. Измерение перемещений и деформаций осуществлялось для боковой поверхности призматического образца, доступной для экспериментального определения характеристик НДС с помощью МКЦИ. Таким образом, последующее сравнение результатов расчетных и экспериментальных полей компонент перемещений и деформаций позволит оценить достоверность НДС (компонент перемещений и деформаций) по МКЭ [6].

На рисунке 4,*а* представлено начальное состояние исследуемого образца в опорах, установленных на стол испытательной машины Instron 5989, а на рисунке 4,*б* – конечное состояние образца, деформированное упруго усилием испытательной машины.



Рис. 4. Деформированное состояние призматического образца:  
*а* – начальное состояние, *б* – конечное состояние

Определение характеристик перемещений и деформаций осуществлялось на стадии упругого деформирования материала образца. Эта стадия определялась по виду диаграммы нагружения образца испытательным усилием, значение величины которого соответствовала линейному участку этой диаграммы. Найденное усилие далее использовалось в качестве исходных данных для численного моделирования характеристик перемещений и деформаций призматического образца.

#### **Результаты экспериментальных и расчетных исследований**

На рисунке 5 представлены результаты распределения полей перемещений и деформаций поверхности исследуемого образца на стадии его упругого деформирования, зарегистрированное с помощью системы Vic-3D. На рисунке 5,*а* показано цифровое отображение распределения полей продольных  $\Delta l_{xx}$  перемещений, на рисунке 5,*б* – осевых  $\Delta l_{yy}$  перемещений спекл-структуры материала образца. На рисунке 5,*в* приведено цифровое поле продольных  $\epsilon_{xx}$  деформаций, на рисунке 5,*г* – осевых  $\epsilon_{yy}$  деформаций спекл-структуры перемещений реперных точек материала. На рисунке 5,*д* представлены цифровые поля распределения сдвиговой  $\epsilon_{xy}$  деформации, на рисунке 5,*е* – интенсивности  $\epsilon_i$  деформаций.

На рисунке 6 представлены расчетные значения перемещений и деформаций узлов КЭ-модели призматического образца по результатам упругого деформирования, выполненные в системе Femap with NXNastran на основе МКЭ [11]. При этом значение усилия в вычислительном эксперименте соответствовало значению на динамометре испытательной машины в момент фиксации экспериментальных данных, приведенных на рисунке 5.

Анализ сравнения результатов съемки спекл-структуры боковой поверхности образца по МКЦИ (рис. 5) с данными расчётного исследования (рис. 6) в условиях упругого деформирования материала по представленным компонентам перемещений и деформаций показывает их качественное сходство. Эти результаты также позволяют заключить, что разработанные расчетные модели деформирования призматических образцов, моделирующих в своей рабочей зоне двухосное растяжение, а также проведенные на их основе варианты вычислительные исследования, с достаточной степенью точности отражают свойства физического прототипа. В свою очередь, адекватность численных моделей подтверждена количественно сопоставлением деформационных характеристик при численном и физическом экспериментах в контрольных точках исследуемой поверхности, расположенных на ней в определенном порядке, представленном на рисунке 7.

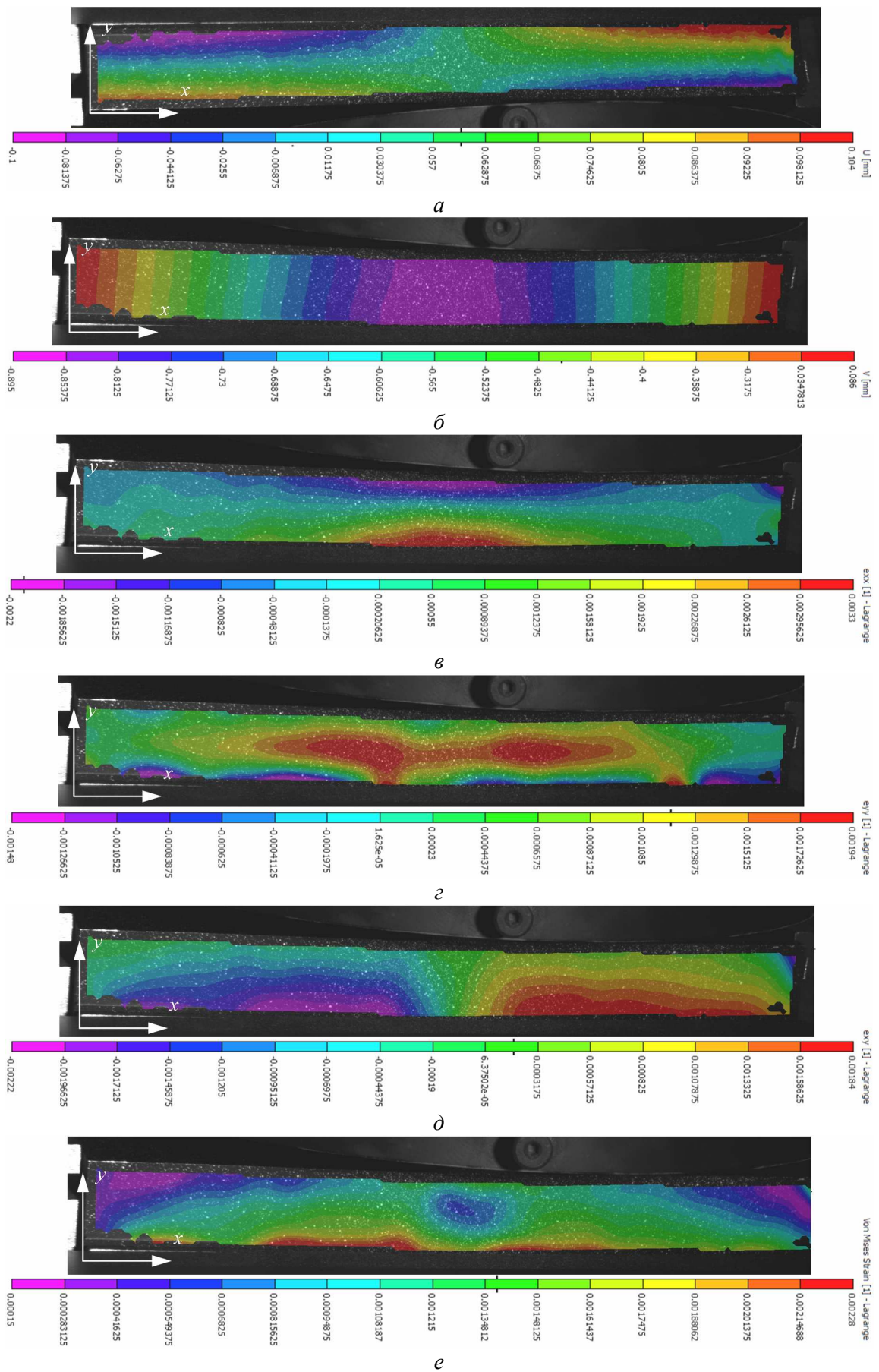


Рис. 5. Распределение экспериментального поля продольных  $\Delta l_{xx}$  (*a*) и осевых  $\Delta l_{yy}$  (*б*) перемещений, продольных  $\epsilon_{xx}$  (*в*) и осевых  $\epsilon_{yy}$  (*г*) деформаций, сдвиговой  $\epsilon_{xy}$  (*д*) деформации и интенсивности  $\epsilon_i$  (*e*) деформаций в результате обработки Vic-3D

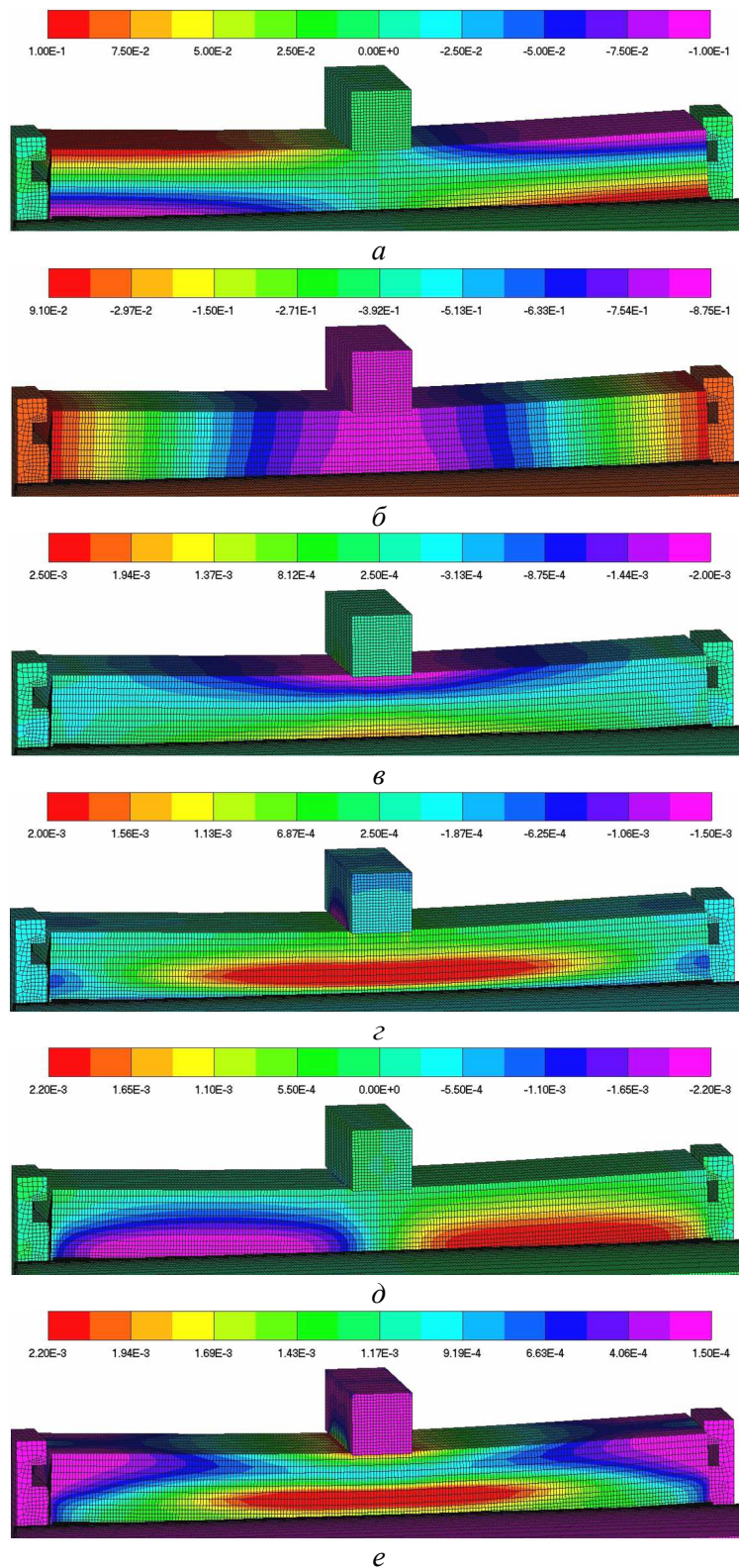


Рис. 6. Распределение расчетного поля продольных  $\Delta l_{xx}$  (*a*) и осевых  $\Delta l_{yy}$  (*б*) перемещений, продольных  $\epsilon_{xx}$  (*в*) и осевых  $\epsilon_{yy}$  (*г*) деформаций, сдвиговой  $\epsilon_{xy}$  (*д*) деформации и интенсивности  $\epsilon_i$  (*e*) деформаций в результате вычислительного эксперимента по МКЭ

В качестве меры относительной погрешности расхождения результатов физического эксперимента при использовании системы Vic-3D с данными численного моделирования рассматривалось отношение

$$\epsilon = \frac{|\chi_{МКЭ} - \chi_{МКЦИ}|}{\chi_{МКЭ}},$$

где  $\chi_{МКЭ}$  – расчётное значение характеристики НДС по МКЭ,  $\chi_{МКЦИ}$  – экспериментальное значение характеристики НДС по МКЦИ.

На рисунке 8 графически представлены значения погрешности расхождения  $\varepsilon$  перемещений и деформаций во всех 14 контрольных точках поверхности (см. рис. 7).

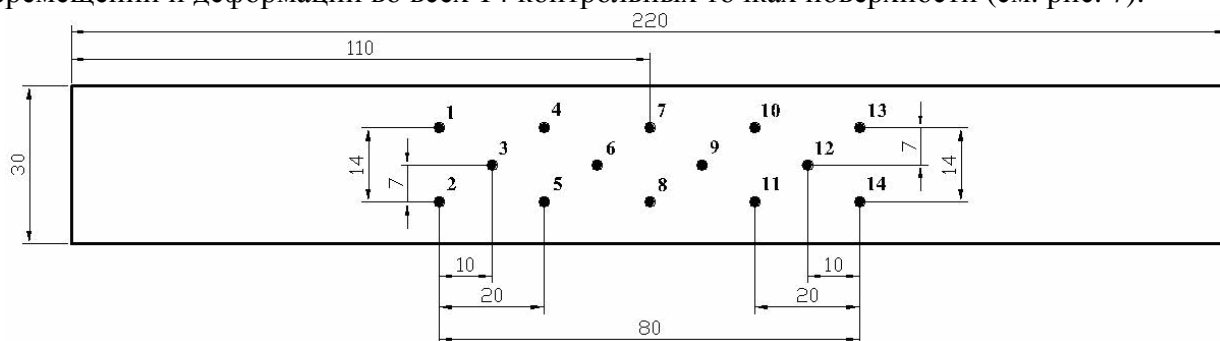


Рис. 7. Расположение контрольных точек на боковой поверхности образца

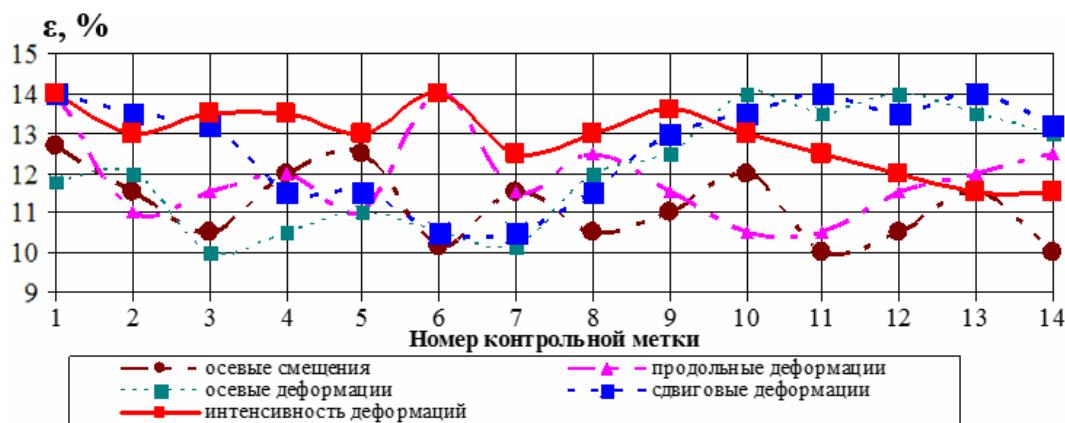


Рис. 8. Относительная погрешность расхождения сравниваемых перемещений и деформаций в контрольных точках исследуемой поверхности образца

Результаты, представленные на рисунке 8, в совокупности показывают, что характеристики перемещений и деформаций исследуемой поверхности образца, полученные по МКЭ (рис. 6) и по МКЦИ (рис. 5), имеют расхождение в диапазоне 10-14%.

### Заключение

По совокупности представленных экспериментальных данных можно заключить, что численная модель деформирования образцов призматического типа позволяет определять их НДС с относительной погрешностью, не превышающей 14%. Это обстоятельство подтверждает адекватность принятых расчетных схем и дискретных моделей, разработанных на основе трехмерных уравнений теории упругости.

Полученный в работе анализ достоверности характеристик НДС призматических образцов позволяет в дальнейшем реализовать предложенную в [12] расчётно-экспериментальную методику расчёта деталей машин и конструкций на статическую прочность с целью уточнения прочностных параметров материала.

### Список литературы

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иоселевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
3. Гагарин Ю.А., Пичков С.Н. Исследование поведения дефектов в полях растягивающих и сжимающих напряжений // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. – С. 11-116.
4. Вансович К.А., Ядров В.И. Усталостные испытания стальных крестообразных образцов с поверхностной трещиной при двухосном нагружении // Омский научный вестник. – 2012. – №3 (113). – С. 117-121.

5. Зеньков Е.В. Повышение достоверности расчетов деталей машин с концентраторами напряжений при двухосном растяжении: дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск: ИРНИТУ, 2015. – 192 с.
6. Zenkov E.V., Elovenko D.A. Deformation of prismatic samples of u-shaped grooves and their stress-strain state // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020, pp. 337-348.
7. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. и др. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под. ред. В.Э. Вильдемана. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. – 204 с.
8. Одинцев И.Н., Апальков А.А., Кокуров А.М., Плугатарь Т.П., Усов С.М. Применение оптико-корреляционных методов в задачах экспериментальной механики // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2015.– № 1(51). – С. 152-160.
9. Sutton M.A., Ortu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
10. Зеньков Е.В. Андреева А.А. Методика экспериментального исследования полей деформаций на основе использования цифровой оптической системы // Проблемы транспорта Восточной Сибири. Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – Ч. 1. – С. 95-99.
11. Шимкович Д.Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов – М.: ДМК Пресс, 2008. – 704 с.
12. Zenkov E., Tsvik L. Modeling the structural strength of materials on disk laboratory specimens // Materials Science Forum. 2022, vol. 1052, pp. 104-109.

### References

1. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. – М.: Mechanical Engineering, 1985. – 224 p.
2. Birger I.A., Shorr B.F., Ioselevich G.B. Calculation of strength of machine parts. – М.: Mechanical Engineering, 1993. – 640 p.
3. Gagarin Yu.A., Pichkov S.N. Study of the behavior of defects in fields of tensile and compressive stresses // Problems of strength and ductility. Interuniversity collection. – Nizhny Novgorod: UNN Publ. house, 2000. – P. 11-116.
4. Vansovich K.A., Yadrov V.I. Fatigue testing of steel cross-shaped specimens with a surface crack under biaxial loading // Omsk Scientific Bulletin. 2012, no. 3(113), pp. 117-121.
5. Zenkov E.V. Increasing the reliability of calculations of machine parts with stress concentrators under biaxial tension: diss. ... cand. of tech. sc. – Irkutsk: IRNITU, 2015. – 192 p.
6. Zenkov E.V., Elovenko D.A. Deformation of prismatic samples of u-shaped grooves and their stress-strain state // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020, pp. 337-348.
7. Wildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V. and others. Experimental studies of the properties of materials under complex thermomechanical influences / Ed. V.E. Wildeman. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. – 204 p.
8. Odintsev I.N., Apalkov A.A., Kokurov A.M., Plugatar T.P., Usov S.M. Application of optical-correlation methods in problems of experimental mechanics // Progressive technologies and mechanical engineering systems. 2015, no. 1(51), pp. 152-160.
9. Sutton M.A., Ortu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
10. Zenkov E.V. Андреева А.А. Methodology for experimental research of deformation fields based on the use of a digital optical system // Problems of transport of Eastern Siberia. Collection of scientific papers of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference. – Irkutsk, IrGUPS, 2013. – Part 1. – P. 95-99.
11. Shimkovich D.G. Femap & Nastran. Engineering analysis by finite element method. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 704 p.
12. Zenkov E., Tsvik L. Modeling the structural strength of materials on disk laboratory specimens // Materials Science Forum. 2022, vol. 1052, pp. 104-109.

#### *Сведения об авторах:*

#### *Information about authors:*

<p><b>Зеньков Евгений Вячеславович</b> – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и инженерной графики ИрГУПС; доцент кафедры механики и сопротивления материалов ИРНИТУ</p>	<p><b>Zenzov Evgeniy Vjacheslavovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of quality management and engineering graphics Department, IRSTU; associate professor of mechanics and resistance of materials Department IRNRTU</p>
<p>jovanny1@yandex.ru</p>	

Получена 14.11.2023