

УДК 539.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-5-101-110

А.С. ПЛЯСКИН¹, А.А. КЛОПОТОВ^{1,2}, А.И. ПОТЕКАЕВ², Б.О. КОШКО¹,¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,²Национальный исследовательский

Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СТАЛЬНОМ СТЕРЖНЕ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены результаты исследования *in situ* эволюции полей деформаций при сжатии цилиндрических стальных стержней на мезо- и макромасштабном уровнях методом корреляции цифровых изображений. Установлена эволюция распределений локализованных областей деформации на поверхности при сжатии цилиндрических стальных стержней на II и III стадиях. Выявлено, что изменение деформационных картин на поверхности при сжатии цилиндрических стальных стержней коррелирует со стадиями на деформационных кривых «напряжение – деформация» и отражает смену механизмов деформации. Исследования динамических параметров сжатых цилиндрических стержней показали, что с ростом сжимающих напряжений наблюдается нелинейное увеличение значений частот собственных колебаний образцов, которое коррелирует со стадиями на деформационной кривой.

Ключевые слова: деформация сжатием; стальные стержни; деформационные кривые; локализация пластической деформации.

Для цитирования: Пляскин А.С., Клопотов А.А., Потекаев А.И., Кошко Б.О. Исследование распределения деформаций в цилиндрическом стальном стержне на основе механических испытаний методом корреляции цифровых изображений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 101–110.

A.S. PLYASKIN¹, A.A. KLOPOTOV^{1,2}, A.I. POTEKAEV², B.O. KOSHKO¹,¹Tomsk State University of Architecture and Building,²National Research Tomsk State University

DEFORMATION DISTRIBUTION DURING MECHANICAL TESTS OF CYLINDRICAL STEEL ROD USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

This paper presents *in situ* investigations of the deformation field distribution during compression of cylindrical steel rods at meso and macroscale levels using digital image correlation. The distribution of localized deformation areas on the surface is studied during compressive tests of cylindrical steel rods at stages II and III. It is shown that the change in the deformation patterns on the surface during the compression of cylindrical steel rods correlates with the stress-strain curves and reflects the change in the deformation mechanisms. A study of the dynamic parameters of compressed cylindrical rods shows that with increasing compressive stresses a nonlinear increase is observed in the eigen-frequency of the samples, which correlates with stages on the deformation curve.

Keywords: compressive deformation; steel rod; deformation curve; localized plastic deformation.

For citation: Plyaskin A.S., Klopotov A.A., Potekaev A.I., Koshko B.O. Issledovanie raspredeleniya deformatsii v tsilindricheskom stal'nom stezhne na osnove mekhanicheskikh ispytaniy metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazhenii [Deformation distribution during mechanical tests of cylindrical steel rod using digital image correlation]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 5. Pp. 101–110.

Решение проблемы, направленной на определение устойчивости инженерных конструкций и технических устройств с учетом их собственных колебаний, имеет длительную историю [1–8]. Важными являются данные об изменении собственных частот колебаний в нелинейных деформируемых системах. Это связано с тем, что со временем в несущих конструкциях зданий и сооружений накапливаются дефекты. Накопление дефектов может происходить по различным причинам. Поэтому представляется важным проведение комплексного экспериментального исследования деформационных полей на поверхности образцов в процессе пластической деформации с целью получения данных для прогнозирования условий разрушения деформируемых тел и разработки технических решений для повышения несущей способности и живучести конструкций. Кроме того, значимыми являются данные по определению влияния дефектов на частотные характеристики как элементов конструкций, так и самих конструкций.

Цель данной работы – исследовать *in situ* на мезо- и макромасштабном уровнях эволюцию деформационных полей при сжатии стальных цилиндрических стержней методом корреляции цифровых изображений и изменение собственных частот образцов в процессе нагружения.

Эксперимент проводился на стальных образцах цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 150 мм, выполненных из стали марки Ст3сп. На рис. 1, а и б приведены фотографии цилиндрических образцов в исходном состоянии и после испытаний.

Нагрузка на образцы создавалась поэтапно с шагом 20 кН с выдержкой 30–40 с после каждого этапа нагружения при помощи гидравлического пресса UTM-4500 (рис. 2). Далее производилось ударное воздействие для возбуждения собственных колебаний с дальнейшей фиксацией динамических параметров бесконтактным виброметром RSV-150 на уровне середины образца.

Для определения эволюции распределения относительных и абсолютных деформаций использовалась стереоскопическая измерительная система VIC-3D [2, 3, 9–12]. На поверхность испытуемых образцов наносилась спекл-поверхность в виде хаотически распределенных черных точек на белой поверхности. Это позволяло определять поля смещений локальных участков поверхности вдоль оси OX – «поперечная деформация», вдоль оси OY – «продольная деформация». В процессе испытания при помощи программы VicSnap проводились синхронные записи изображений с двух камер (рис. 1), которые затем обрабатывались программой Vic-3D. В результате были вычислены для каждой анализируемой точки геометрические параметры поверхности (координаты X и Y), определены относительные деформации (ε_{xx} – по оси X и ε_{yy} – по оси Y) в локальных местах на поверхности исследуемого образца.

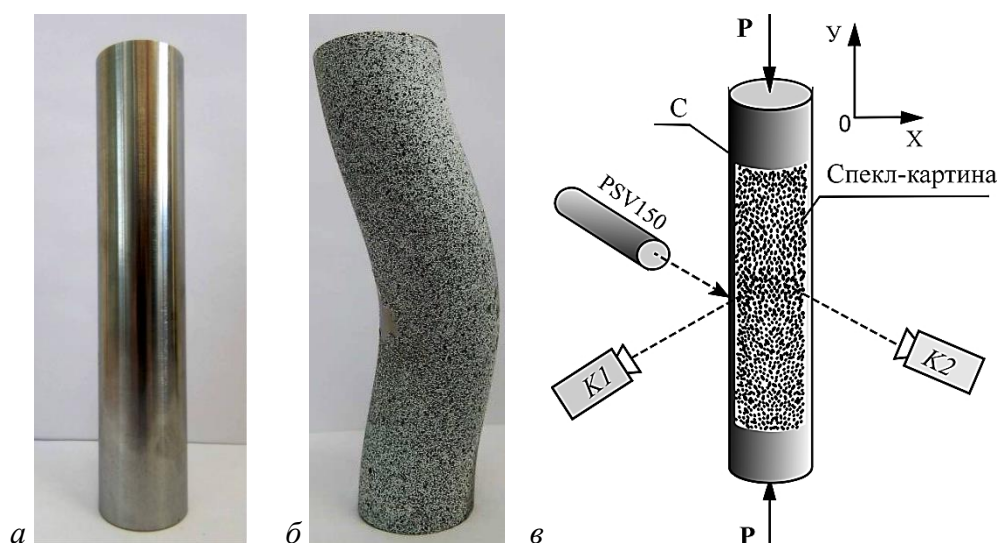


Рис. 1. Общий вид опытного цилиндрического образца:

a – до испытания; *б* – после; *в* – схема регистрации изображений со спекл-картины на стальном цилиндрическом стержне

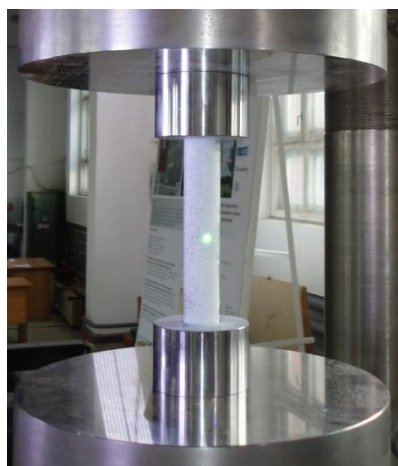


Рис. 2. Общий вид испытаний стального цилиндрического стержня

В процессе испытаний фиксировался частотный сдвиг между излучённым и отражённым оптическими сигналами, который пропорционален мгновенной виброскорости. При фиксации фазового сдвига было определено мгновенное виброперемещение исследуемой локальной области на поверхности образца.

В процессе сжатия образцов были получены диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » (рис. 3) на базе экстензометра, установленного в пределах рабочей части исследуемых образцов. Экспериментальная диаграмма функциональной зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ показывает изменение относительной деформации сжатия рабочей части образцов от внешней приложенной нагрузки. Анализ зависимости $\sigma = f(\epsilon)$, получен-

ной при сжатии цилиндрического образца, позволил выделить три стадии (рис. 3). Начальная стадия деформации образца относится к упругой (стадия I) и отражает линейный характер зависимости между напряжением и деформацией. Затем с ростом приложенного напряжения начинается пластическая деформация образца. На этой части деформационной кривой $\sigma = f(\varepsilon)$ можно выделить линейную стадию с низким коэффициентом деформационного упрочнения $\theta = \partial\sigma/\partial\varepsilon$ (стадию II). Наличие линейного характера изменения напряжения (σ) от деформации (ε) на стадии II отражает линия ABC на рис. 3. Далее следует параболическая стадия деформационного упрочнения (стадия III). При деформации цилиндрического образца переход от стадии II к стадии III характеризуется более высоким значением коэффициента деформационного упрочнения θ на стадии III, чем на стадии II. Здесь важно отметить, что на этой стадии на функциональную зависимость деформационной кривой $\sigma = f(\varepsilon)$ оказывает значительное влияние изменение геометрии образца (рис. 3, з).

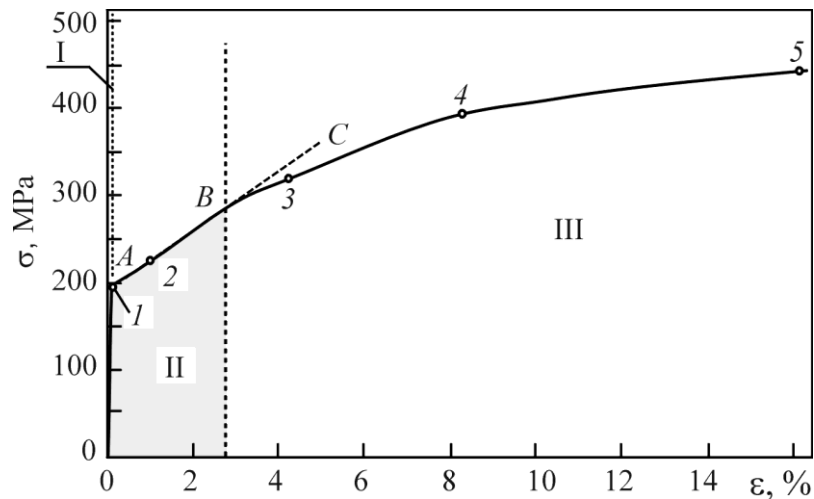


Рис. 3. Диаграмма деформирования цилиндрического образца из углеродистой стали при сжатии:

I – стадия упругой деформации; II, III – стадии пластической деформации. Цифры соответствуют положению на кривой картин деформационных структур на рис. 4

Применение измерительной системы VIC-3D позволило получить картины, отражающие изменение распределения областей микросмещений на поверхности образцов в направлении продольных и поперечных смещений (рис. 4).

На деформационной картине (рис. 4), соответствующей максимальному значению напряжений на стадии I (рис. 3, точка 1), на поверхности цилиндрического образца наблюдается хаотическое распределение локализованных областей деформации.

С ростом приложенного напряжения на стадии II на поверхности цилиндрического образца образуются очаги локализованной деформации, которые граничат с менее деформированными областями (рис. 3, точка 2). На по-

верхности цилиндрических образцов на стадии II остается хаотическое распределение локализованных областей деформации, только значения деформации в этих локализованных очагах деформации более высокие, чем в локальных областях деформации на стадии I (рис. 3, точки 1 и 2).

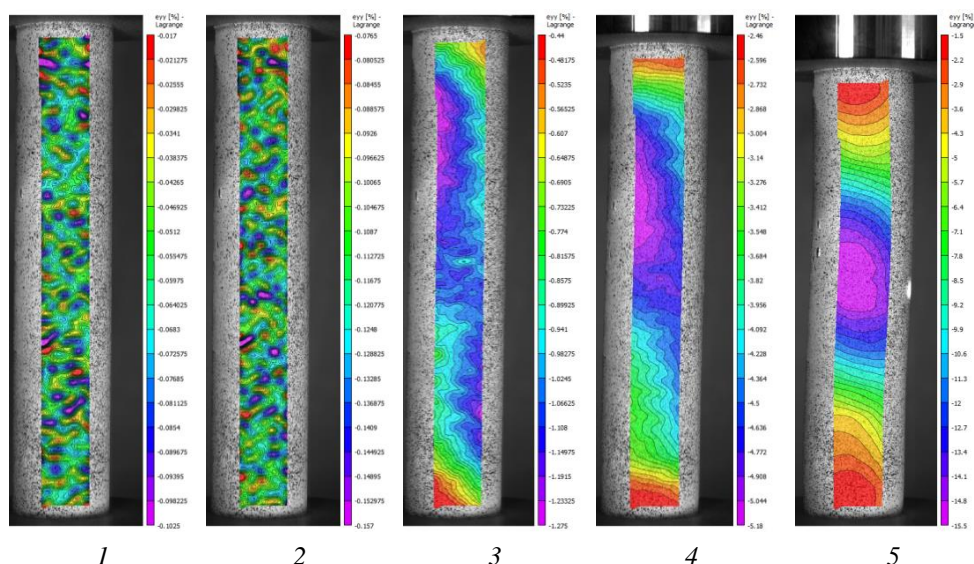


Рис. 4. Картины распределения вертикальных относительных деформаций на поверхности цилиндрического образца:

1–5 – деформационно-напряженные состояния образца при испытании на деформационной кривой

Анализ картин распределения областей деформации на поверхности цилиндрического образца на III стадии (рис. 3, точки 3, 4 и 5) позволил четко установить, что на этой стадии происходит переход от хаотически распределенных локализованных очагов пластической деформации к распределению областей деформации в виде обширных областей со значительными значениями деформации в них (рис. 4).

Таким образом, установлена эволюция распределения областей деформации на поверхности цилиндрического образца при переходе к III стадии. При переходе от II к III стадии наблюдается качественное изменение распределения деформационных областей: хаотически распределенные мелкие очаги пластической деформации трансформируются в обширные деформационные области со значительными деформациями внутри этих областей. Такая эволюция распределений деформационных областей свидетельствует о смене носителей деформации на разных масштабных уровнях и, как следствие, смене механизмов деформации [13, 14].

С ростом деформации всего образца (рис. 3) на III стадии картина распределения областей деформации на поверхности образца сопровождается значительным изменением формы образца (см. рис. 1, б). Рассмотрим подробнее это явление. Наблюдается образование обширных областей с высокими значе-

ниями деформаций. При этом установлен значительный градиент продольных и поперечных деформаций с возрастанием значений от верхней и нижней частей образца к центру (рис. 4, картины 3–5). В конечной точке на деформационной кривой (рис. 3, точка 5) общая продольная пластическая деформация всего образца достигает значения порядка 15 %. В то же время как в верхней, так и нижней частях образца продольная пластическая деформация имеет значения порядка 1,5 %. Только в обширной области в центральной части образца пластическая деформация достигает высоких значений 15,5 %. Наличие значительного градиента деформаций в локальных местах образца сопровождается существенным изменением формы образца, и это приводит к совпадению максимальной деформации в центре образца с пластической деформацией всего образца, определенной по деформационной кривой (рис. 3, точка 5).

Таким образом, в локальных деформационных областях в цилиндрических образцах пластическая деформация при достижении предельных деформаций всего образца, предшествующих его разрушению (коэффициента деформационного упрочнения $\theta \rightarrow 0$ на деформационной кривой), достигает значений порядка 15 %.

Одновременно с исследованием распределений деформационных полей на поверхности стальных стержней были определены частотные параметры образцов в процессе нагружения в виде велосиграм и спектров мощностей. На рис. 5 приведены велосиграммы, полученные от образцов с имитацией заделки с разными значениями нагрузок.

Собственные частоты, формы колебаний и параметры, характеризующие затухания, являются характеристиками, которые позволяют судить не только о динамических параметрах колебательных систем, но и о состоянии всей системы. Таким образом, результаты исследования позволяют получить информацию о влиянии приложенного напряжения на собственные колебания в цилиндрическом образце, возбужденные ударным воздействием.

В общем случае упругая система может совершать колебания по различным формам или модам [4]. В то же время деформационное воздействие на образец приводит к генерации различных типов дефектов кристаллического строения на различных масштабных уровнях. Это воздействие переводит систему в другое состояние, и, как следствие, это находит отклик в изменении формы и моды колебаний.

Анализ полученных велосиграм в зависимости от нагрузки показывает, что с ростом приложенного напряжения при деформации цилиндрического стального образца происходит изменение параметров, характеризующих велосиграммы. На основе обработки полученных данных был построен график зависимости частот собственных колебаний от нагрузки (рис. 6). Из этого графика следует, что частота колебаний цилиндрического стального образца нелинейным образом зависит от приложенной нагрузки. Разная функциональная зависимость частоты от нагрузки $\nu = f(P)$ коррелирует со стадиями на деформационной кривой $\sigma = f(\epsilon)$ (рис. 6). На упругой стадии (стадия I) наблюдается незначительное увеличение частоты с ростом приложенной нагрузки. Дальнейший рост нагрузки приводит к пластической деформации (стадии II и III) и вызывает нелинейное увеличение частоты с ростом приложенной нагрузки.

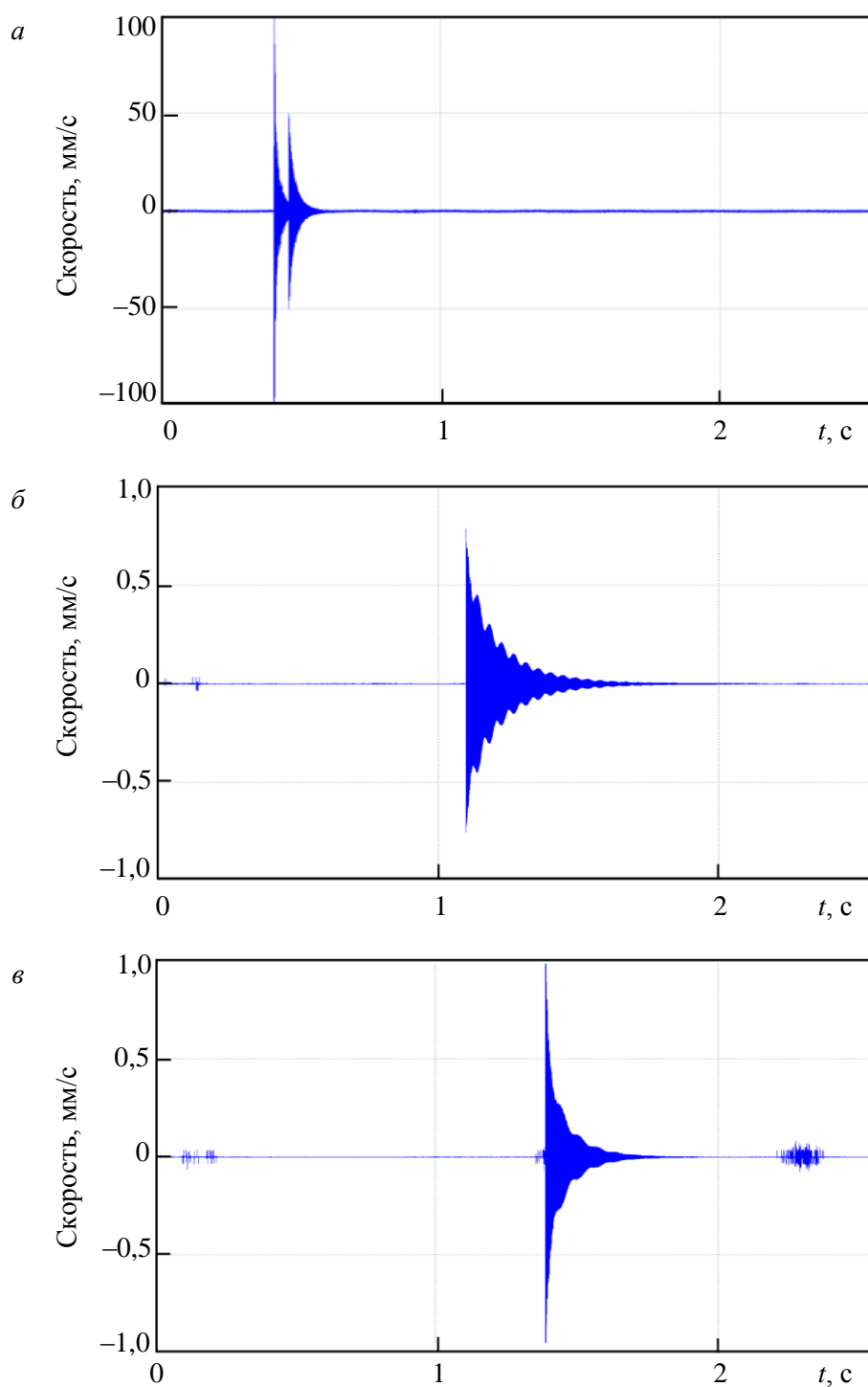


Рис. 5. Велосиграммы цилиндрического образца при значениях осевой сжимающей силы:
a – 49 кН; *б* – 157 кН; *в* – 274,5 кН. Нагрузка 157 кН соответствует точке 1 на диаграмме рис. 3; нагрузка 274,5 кН соответствует точке 2 на рис. 3

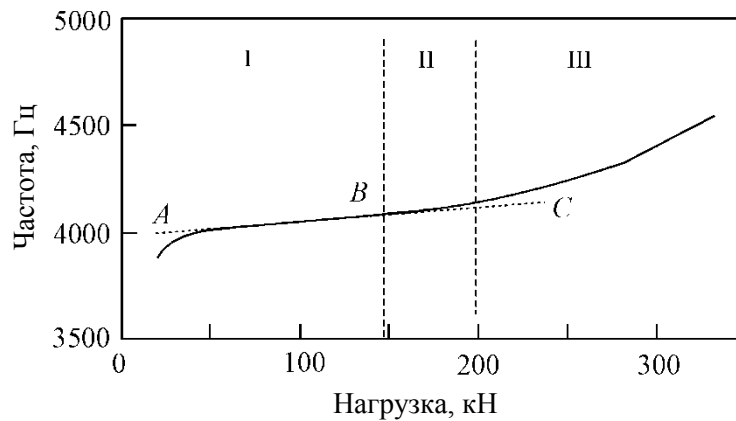


Рис. 6. Зависимость частоты колебаний от приложенной нагрузки:

I – стадия упругой деформации; II, III – стадии пластической деформации

Установлено, что в процессе деформации цилиндрического образца при переходе от II стадии к III наблюдается изменение распределения областей деформации на поверхности образца от хаотически распределенных локализованных очагов пластической деформации к распределению областей деформации в виде обширных областей со значительными значениями деформации в них. Такое изменение деформационных картин на поверхности образцов коррелирует с функциональными зависимостями $\sigma = f(\varepsilon)$ и свидетельствует о смене носителей деформации на разных масштабных уровнях и, как следствие, о смене механизмов деформации.

Анализ частотных параметров цилиндрического стального образца позволил установить, что с ростом приложенной нагрузки наблюдается нелинейное увеличение значений собственных частот колебаний образцов, которое коррелирует со стадиями на деформационной кривой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Риз П.М. Деформация стержней, закрученных и слабоизогнутых в ненапряженном состоянии // Труды ЦАГИ. 1940. Вып. 471. 27 с.
2. Биценко К.Б., Граммель Р. Техническая динамика // ГТТЛ. 1952. Т. 2. 220 с.
3. Меерович И.И. Распределение напряжений в компрессорных лопатках при колебаниях. М.: Оборонгиз, 1961. 108 с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 444 с.
5. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания: Т. 1–3. М.: Машиностроение, 1968.
6. Хронин Д.В. Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 412 с.
7. Воробьев Ю.С., Шорр Б.Ф. Теория закрученных стержней. Киев: Наук. думка, 1983. 188 с.
8. Биргер И.А. [и др.]. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
9. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Marchenko E.S. Condensed-state physics changes in the stress-strain states of subsurface layers of steel during loading // Russian Physics Journal. 2018. V. 60. № 9. P. 1577–1585.
10. Ustinov A., Klopotov A., Potekaev A., Plevkov V., Marchenko E. Evolution of the reinforced I-beam strain state // MATEC Web of Conferences. 2018. 143. 01017.

11. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потехаев А.И., Абзаев Ю.А., Плевков В.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений // Известия Алтайского государственного университета. 2018. № 1. С. 58–69.
12. Федоров В.С., Копаница Д.Г., Клопотов А.А. [и др.]. Экспериментальные исследования упруго-пластической деформации клеевых соединений методом корреляции цифровых изображений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 79–97.
13. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А. В, Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 62–70.
14. Конева Н.А., Тришкина Л.И., Потехаев А.И., Козлов Э.В. Структурно-фазовые превращения в слабоустойчивых состояниях металлических систем при термосиловом воздействии. Томск: НТЛ, 2015. 344 с.

REFERENCES

1. Riz P.M. Deformacija sterzhnej, zakruchennyh i slaboizognutyh v ne naprjazhennom sostojanii [Deformation of rods, twisted and slightly bent in the non-stressed state]. *Trudy TsAGI*. 1940. No. 471. 27 p. (rus)
2. Bicenok K.B., Grammel' R. Tehnicheskaja dinamika [Technical dynamics]. *GTTL*. 1952. V. 2. 220 p. (rus)
3. Meerovich I.I. Raspredelenie naprjazhenij v kompressornyh lopatkah pri kolebaniyah [Stress distribution in compressor blades due to oscillations]. Moscow: Oborongiz, 1961. 108 p. (rus)
4. Timoshenko S.P. Kolebanija v inzhernom dele [Oscillations in engineering studies]. Moscow: Nauka, 1967. 444 p. (rus)
5. Birger I.A., Panovko Ja.G. Prochnost', ustojchivost', kolebanija [Strength, stability, fluctuations]. V. 1–3. Moscow: Mashinostroenie, 1968. (rus)
6. Hronin D.V. Teorija i raschet kolebanij v dvigatel'nyh apparatov [Theory and calculation of oscillations in aircraft engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 412 p. (rus)
7. Vorob'ev Ju.S., Shorr B.F. Teorija zakruchennyh sterzhnej [Theory of twisted rods]. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 188 p. (rus)
8. Birger I.A., et al. Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik [Handbook on strength analysis of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 640 p. (rus)
9. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Marchenko E.S. Condensed-state physics changes in the stress-strain states of subsurface layers of steel during loading. *Russian Physics Journal*. 2018. V. 60. No. 9. P. 1577–1585.
10. Ustinov A., Klopotov A., Potekaev A., Plevkov V., Marchenko E. Evolution of the reinforced I-beam strain state. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. P. 01017.
11. Ustinov A.M., Klopotov A.A., Potekaev A.I., Abzaev Ju.A., Plevkov V.S. Jeksperimental'noe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija poverhnostnyh sloev ugleplastika pri osevom rastjazhenii metodom korrelyacii cifrovych izobrazhenij [Experimental study of stress-strain state of carbon fiber surface layers with axial tension using digital image correlation]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. No. 1. Pp. 58–69. (rus)
12. Fedorov V.S., Kopanica D.G., Klopotov A.A., et al. Jeksperimental'nye issledovanija uprugoplasticheskoj deformacii kleevyh soedinenij metodom korrelyacii cifrovych izobrazhenij [Digital image correlation of elasto-plastic deformation of adhesive bonding]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 2. Pp. 79–97. (rus)
13. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V, Moiseenko D.D. Priroda lokalizacii plasticheskoj deformacii tverdyh tel [The nature of localized plastic deformation of solids]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. 2007. V. 77. No. 8. Pp. 62–70. (rus)
14. Koneva N.A., Trishkina L.I., Potekaev A.I., Kozlov Je.V. Strukturno-fazovye prevrashhenija v slaboustojchivyh sostojanijah metallicheskih sistem pri termosilovom vozdejstvii [Structure and phase transformation in weakly stable states of metallic systems under thermal exposure]. Tomsk: NTL, 2015. 344 p. (rus)

Сведения об авторах

Клопотов Анатолий Анатольевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, klopotovaa@tsuab.ru

Потекаев Александр Иванович, докт. физ.-мат. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Potekaev@spti.tsu.ru

Пляскин Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Plyaskinandrei@mail.ru

Кошко Богдан Олегович, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, koshkobogdan@mail.ru

Authors Details

Anatolii A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, klopotovaa@tsuab.ru

Aleksandr I. Potekeav, DSc, Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, Potekaev@spti.tsu.ru

Andrei S. Plyaskin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Plyaskinandrei@mail.ru

Bogdan O. Koshko, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, koshkobogdan@mail.ru