

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 2. С. 194–203.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (2): 194–203.

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 639.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203

EDN: SFQVOS

### ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МУФТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

**Артем Михайлович Устинов, Анатолий Анатольевич Клопотов,  
Андрей Сергеевич Пляскин, Геннадий Георгиевич Волокитин**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Муфтовые соединения арматуры для фиксации стыков в строительных конструкциях широко используются на практике, и, как следствие, необходима информация об особенностях распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения при деформационных воздействиях для получения расчетных зависимостей при эксплуатации таких арматурных соединений.

*Цель работы* – исследование напряженно-деформированного состояния стыков арматурных стержней при растяжении, натуральных узлов сопряжения элементов из арматурных стержней класса А500 методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений, а также изучение влияния деформационного воздействия на микроструктуру из стали марки Ст20 методом просвечивающей электронной микроскопии.

*Результаты.* В ходе испытаний получены деформационные кривые муфтового соединения арматуры в координатах «нагрузка – перемещение» и на основе их анализа выявлены три стадии: стадия I обусловлена упругой деформацией муфтового соединения; стадия II отражает стадию параболического упрочнения; стадия III соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Анализ распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах на образце. Выявлено, что эволюция распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения коррелирует со стадиями на деформационной кривой.

Установлено, что значение податливости исследуемого муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП, изготовленного из бесшовной горячедеформирован-

ной трубы с наружным диаметром 51 мм и внутренним диаметром до 32 мм из стали марки Ст20, при действии растягивающей продольной силы вызывает появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа.

Электронно-микроскопические исследования арматурной стали позволили установить, что при деформации растяжением при  $\varepsilon = 0\text{--}5\%$  наблюдается разрушение перлита, которое сопровождается дальнейшей поляризацией дислокационной структуры. Амплитуда внутренних напряжений полей увеличивается, и при деформации  $\varepsilon = 5\%$  дальнедействующие напряжения  $\sigma_d$  становятся больше, чем напряжения, вызванные «лесом» дислокаций  $\sigma_l$ . Показано, что основной вклад в величину дальнедействующих напряжений и её изменение при  $\varepsilon = 5\%$  вносит упругая составляющая, что способствует процессу образования микротрещин.

**Ключевые слова:** муфтовое соединение, деформация, деформационные поля, электронная микроскопия, оптическая система Vic-3D

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации по проектам № FEMN-2023-0003 и №. FEMN-2022-0004.

**Для цитирования:** Устинов А.М., Клопотов А.А., Пляскин А.С., Волокитин Г.Г. Эволюция полей напряжений на поверхности муфтового соединения арматурных стержней при одноосной деформации растяжением // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 194–203. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203. EDN: SFQVOS

## ORIGINAL ARTICLE

### STRESS FIELD EVOLUTION ON REBAR COUPLING CONNECTION AT UNIAXIAL TENSION

Artem M. Ustinov, Anatoly A. Klpotov,  
Andrey S. Plyaskin, Gennady G. Volokitin

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

**Abstract.** Rebar coupling connections are widely used for joints, and it is necessary to get information about the stress field distribution on the coupling surface at uniaxial tension to characterize operation of such joints.

**Purpose:** The aim of the work is to study the stress-strain state of rebar connections under tension, full-scale junctions of the type A500 rods, and the deformation influence on the steel microstructure of grade C1020.

**Methodology:** Non-contact three-dimensional imaging system VIC-3D and digital image correlation and tracking for studying stress-strain state of rebar connection; transmission electron microscopy for studying the steel microstructure.

**Research findings:** Load-displacement curves are suggested for the valve coupling, and three deformation stages are identified: 1) elastic deformation of the coupling connection, 2) parabolic hardening, 3) preceding the coupling connection destruction. The analysis of the strain field distribution on the coupling connection shows that at any time, plastic strain localizes in certain zones of the sample. The stress field evolution on the coupling connection correlates with the indicated deformation stages. The compliance of the rebar joint made of seamless hot-deformed tube with an outer and inner diameters 51 and 32 mm, respectively, made of C1020 steel grade, induces 500 MPa stress in the normal section of rebar under the tensile axial load.

**Value:** It is shown that during uniaxial tension of 0 to 5 %, perlite fractures, which is accompanied by further polarization of the dislocation structure. The internal stress amplitude increases and at 5% tension, far-range stresses grow as compared with those induced forest

dislocations. The main contribution to far-range stresses and their change at 5 % tension is made by the elastic component, that promotes to the microcrack formation.

**Keywords:** coupling connection, deformation, strain field, electron microscopy, VIC-3D optical system

**For citation:** Ustinov A.M., Klopotov A.A., Plyaskin A.S., Volokitin G.G. Stress field evolution on rebar coupling connection at uniaxial tension. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 194–203. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-194-203. EDN: SFQVOS

## Введение

В Российской Федерации в настоящее время в практике строительства находит широкое применение способ механического соединения в монолитном бетоне арматурных стержней и элементов сборного железобетона. Это связано с повышением требований по условиям эксплуатационной безопасности сложных сооружений и повышенной устойчивости сооружений при сейсмических воздействиях [1]. Для решения этой проблемы необходимы исследования влияния деформационных воздействий как на сам материал, так и на элементы конструкций на разных структурных уровнях [2]. На основе *in situ* исследований эволюции распределений деформационных полей в пространстве и во времени на поверхности образцов на разных масштабных уровнях в процессе пластической деформации можно получить данные, которые необходимы для решения технических задач при создании конструкций [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Здесь важным является то, что для полного представления об особенностях изменения структурно-фазового состояния арматурной стали под действием внешних приложенных напряжений необходимы структурные исследования на микроструктурном уровне, которые можно осуществить при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Возможности этого метода хорошо представлены в работах [10, 11, 12] по изучению влияния деформации на структурно-фазовые состояния в мартенситных сталях. В этих работах показано, что в ходе пластической деформации происходят коррелированные субструктурные превращения и изменения состояния углерода хромоникелевых сталей мартенситного класса. Превращения эти носят самосогласованный характер. Субструктурные превращения сетчатой структуры в ячеистую и затем во фрагментированную контролируются плотностью дефектов и силами твердорастворного и карбидного превращения, препятствующими их перемещению. В такой последовательности субструктур происходит переход от высокоэнергетической субструктуры к низкоэнергетической, который оказывается возможным из-за разрушения карбидов и, соответственно, уменьшения сопротивления сдвигу недислокационного происхождения. Эти процессы идут в том же направлении, что и субструктурные превращения, – в сторону термодинамического равновесия.

Вероятно, подобные явления и процессы происходят также в арматурных сталях при деформационном воздействии на них. Это обусловлено тем, что субструктурные превращения на микроструктурном уровне носят самосогласованный характер, поскольку управляющие превращением параметры сами ме-

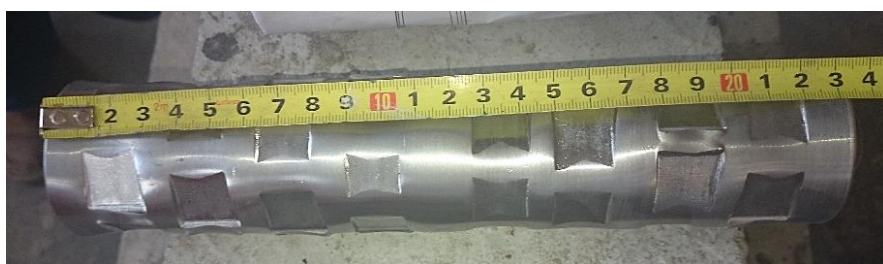
няются в ходе деформации. Поэтому необходимы исследования как механических свойств, так и влияния деформации на микроструктуру арматурной стали.

Цель настоящей работы – провести исследования напряженно-деформированного состояния стыков арматурных стержней при растяжении натуральных узлов сопряжения элементов из арматурных стержней класса А500 методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений, а методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучить влияние деформационного воздействия на микроструктуру стали.

### Материалы и методы исследования

**Конструкция опытного образца.** Образец для испытания изготовлен в виде узла соединения двух арматурных стержней класса А500СП с помощью обжимной муфты, представляющей собой бесшовную горячедеформированную трубу с наружным диаметром 51 мм и внутренним диаметром до 32 мм из стали марки Ст20 (ГОСТ 8732–78).

Фиксация стержней в отверстии трубы выполнялась поочередным обжатием трубы (опрессовка). На рис. 1 показано изменение геометрической формы соединительной муфты после проведения прессования при соединении двух арматурных стержней класса А500СП. Обжатие осуществляется прессом арматурным ПП-А80М с рабочим усилием обжатия 80 тс.



*Рис. 1.* Муфтовое соединение двух арматурных стержней в сборе после обжатия в четырех сечениях с каждой стороны

*Fig. 1.* Coupling connection of two rebars assembled after compression in four sections on each side

**Исследование механических свойств.** Механические испытания муфтового соединения при одноосном растяжении проводили на разрывной машине МР-500, на которой возможно достижение предельной нагрузки порядка 500 кН (50,96 тс). Создание напряжений проводили с постоянной скоростью 1,6 Н/мм<sup>2</sup> в секунду.

Для получения распределения перемещений и относительных деформаций по поверхности испытуемых образцов использовалась цифровая оптическая система Vic-3D [3]. Применение этой системы на основе метода численной корреляции цифровых изображений позволяет исследовать эволюцию распределений полей деформаций и перемещений на поверхности образцов.

**Исследование структуры.** Электронно-микроскопические исследования проведены методом просвечивающей электронной микроскопии с ис-

пользованием электронного микроскопа ЭМ-125. Для микроскопических исследований электроискровым методом были вырезаны пластинки после деформации из зоны разрушения образцов из арматурного стержня класса А500СП. Затем из этих образцов были получены тонкие фольги при помощи электрополировки.

### Результаты и обсуждение

**Результаты исследования механических свойств.** Были получены диаграммы деформаций муфтового соединения стальных арматурных стержней на растяжение (рис. 2). На основе анализа диаграмм установлено, что увеличение растягивающей силы до  $N = 234$  кН привело к возникновению растягивающего напряжения в сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа. Значение податливости муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП диаметром 28 мм при действии растягивающей продольной силы, вызывающей появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа, равно  $W = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м/Н.

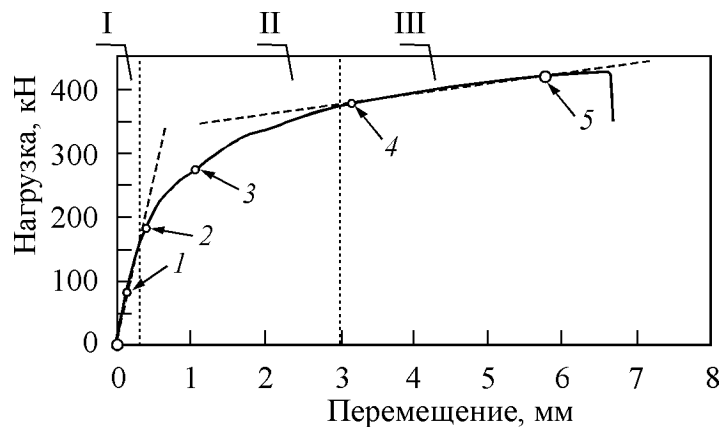


Рис. 2. Диаграммы деформаций муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП диаметром 28 мм при растяжении. Цифрами показаны места на диаграмме, соответствующие картинам, приведенным на рис. 3

Fig. 2. Load-displacement relation of coupling connection of A500SP rebar with a diameter 28 mm under tension. Figures 1–5 match points in Fig. 3

Анализ деформационных кривых показал (рис. 2), что для исследуемого муфтового соединения характерно наличие трех стадий:

I стадия обусловлена упругой деформацией муфтового соединения;

II стадия отражает стадию параболического упрочнения;

III стадия характеризует процесс, предшествующий разрушению муфтового соединения.

Здесь при помощи измерительной системы VIC-3D получены картины, отражающие эволюцию распределения изополей относительных деформаций в процессе деформационного воздействия (рис. 3). Анализ приведенных на рис. 3 картин распределений деформационных полей на приповерхностных слоях муфтового соединения с позиций теории многостадийного деформаци-

онного упрочнения показывает хорошую корреляцию со стадиями на деформационной диаграмме в координатах «нагрузка – перемещение» (рис. 2).

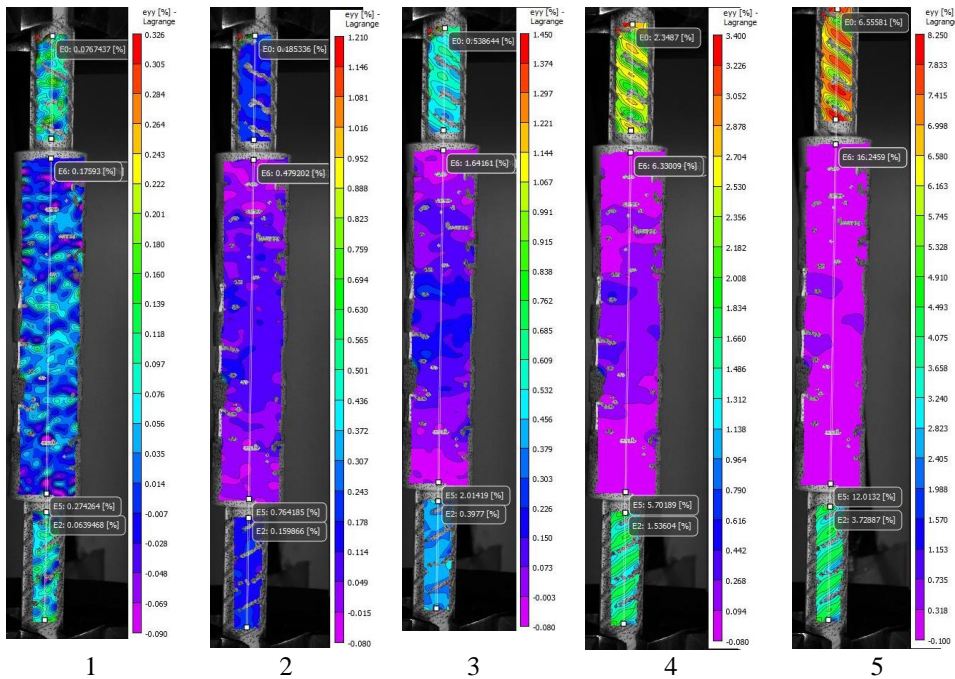


Рис. 3. Картины вертикальных относительных деформаций с поверхностями муфтового соединения на разных стадиях деформации при растяжении. Цифры показывают на диаграмме на рис. 2 соответствующие деформационно-напряженные состояния образца при испытании

Fig. 3. Vertical relative strain on coupling connection at different strain stages. Figures 1–5 match points in Fig. 2

В работе [12] показано, что характер распределения очагов пластической деформации хорошо коррелирует со стадиями на деформационных кривых на монолитных образцах. На параболической стадии на монолитных образцах наблюдается стационарная картина очагов локализованной деформации. В данном случае мы имеем дело со сборной конструкцией, а именно с муфтовым соединением (см. рис. 1). Несмотря на такое различие между монолитными и сборными образцами, также наблюдаются различные стадии на деформационных кривых, характеризующие упругий и пластический характер деформации.

Переход к стадии III сопровождается уменьшением коэффициента деформационного упрочнения  $\theta = \frac{\partial P}{\partial l}$  ( $P$  – нагрузка,  $l$  – перемещение) (рис. 2) и изменением в характере расположения структурных элементов (рис. 3). Эта стадия соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Анализ распределений локальных очагов пластической деформации муфтового соединения показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах образца. При этом в других объемах материала при заданном приросте деформация практически не наблюдает-

ся (рис. 3). На стадии параболического упрочнения (см. рис. 2) на картинах распределений деформационных полей (рис. 3) проявляется распределение локальных очагов деформаций в виде зон локализации деформации, расположенных на одинаковых расстояниях.

Картины распределений поверхностных деформаций муфтового соединения арматурных стержней класса А500СП при одноосном растяжении приведены на рис. 3, где видно, что картины распределений деформационных полей на разных стадиях имеют разный характер. Картина распределения деформационных полей на стадии I отражает упругие деформации на поверхности муфтового соединения. На стадии II картина распределения деформационных полей соответствует неупругим деформациям на поверхности муфтового соединения. На стадии III, предшествующей разрушению муфтового соединения, происходит образование ограниченного числа локализованных областей со значительными значениями пластической деформации.

**Результаты структурных исследований.** Проведенные исследования методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонкой структуры арматурной стали класса А500СП показали, что морфологически составляющими матрицы стали являются полностью разрушенный пластинчатый перлит и фрагментированный феррит. Дислокационная структура частично поляризована. Внутренние поля напряжений невелики.

При деформационном нагружении при растяжении образцы разрушались. Методом просвечивающей электронной микроскопии были проведены исследования в зоне разрыва с целью выявления источников, приводящих к разрушению образца.

На рис. 4 приведено изображение тонкой структуры феррита, полученное методом ПЭМ. Фрагменты во фрагментированном феррите присутствуют как близкие к изотропным, так и анизотропные.

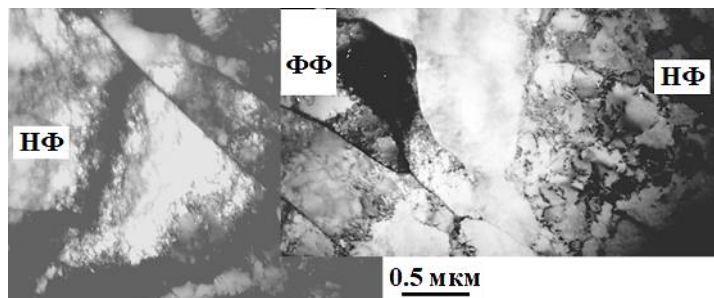


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры феррита в основном металле (НФ – нефрагментированный феррит, ФФ – фрагментированный феррит)

Fig. 4. TEM image of ferrite structure in the base metal (non-fragmented ferrite, fragmented ferrite)

На основе анализа микродифракционных картин установлено, что изотропные фрагменты имеют точечную микродифракционную картину, на которой присутствуют рефлексы, принадлежащие только одной плоскости. Это означает, что изотропные фрагменты практически не разориентированы ( $\alpha_{ав} = 1-3^\circ$ ). Мик-

родифракционные картины, полученные от анизотропных фрагментов, содержат также рефлексы, принадлежащие только одной плоскости, но все рефлексы имеют тяжи. Из этого следует, что фрагменты разориентированы, а угол азимутальной разориентации соответствует величине  $\alpha_{аз} = 10-15^\circ$ .

Исследования показали, что на границах фрагментов (как изотропных, так и анизотропных) часто присутствуют микротрещины. Установлено, что более крупные трещины образуются по границам раздела «феррит – перлит». При этом, с одной стороны, в результате аннигиляции дислокаций произошло «рассыпание» дислокационных границ фрагментов. Фрагментированная структура превратилась в нефрагментированную. А поскольку на границах фрагментов феррита присутствовали частицы  $Fe_3C$ , то фактически образовалась феррито-карбидная смесь.

### Заключение

Выявлено три стадии деформационных кривых исследуемого муфтового соединения: стадия I обусловлена упругой деформацией муфтового соединения; стадия II отражает стадию параболического упрочнения; стадия III соответствует стадии, предшествующей разрушению муфтового соединения.

Установлено, что значение податливости исследуемого муфтового соединения арматурных стержней при действии растягивающей продольной силы, вызывающей появление напряжения в нормальном сечении арматурного стержня  $\sigma_{02} = 500$  МПа, равно  $W = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м/Н.

Анализ распределений деформационных полей на поверхности муфтового соединения методом бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы с использованием метода корреляции цифровых изображений показал, что в каждый момент времени пластическая деформация локализована в определенных зонах на образце. Выявлено наличие зон локализованной деформации, и распределение этих зон имеет разный характер на разных стадиях деформационной кривой муфтового соединения.

В результате измерения структурных параметров арматурной стали электронно-микроскопическим методом установлено, что деформация растяжением при  $\epsilon = 0-5$  % приводит к разрушению перлита и дальнейшей поляризации дислокационной структуры. Амплитуда внутренних напряжений полей увеличивается, и при  $\epsilon = 5$  %  $\sigma_d > \sigma_l$  ( $\sigma_d$  – дальнедействующие напряжения;  $\sigma_l$  – напряжения, вызванные «лесом» дислокаций). Основной вклад в величину  $\sigma_d$  и её изменение при  $\epsilon = 5$  % вносит упругая составляющая, что приводит к образованию микротрещин.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. РД ЭО 0657-2006. Положение по применению механических соединений арматуры для железобетонных конструкций зданий и сооружений атомных станций.
2. Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей / под ред. В.Ф. Пичугина. Томск : Изд-во ТПУ, 2013. 236 с.
3. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Москва : Наука, 1983. 280 с.



4. Разумовский И.А. Развитие оптических методов механики деформируемого тела (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 10. С. 45–54.
5. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения VIC-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 2. С. 162–171.
6. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПГТУ. Механика. Пермь : Перм. ГТУ. 2011. № 2. С. 92–100.
7. Ustinov A., Kopanitsa D., Potekaev A., Klopotov A. Distribution of local deformations on the near-surface layers and scale effects of low alloy steel specimens // AIP Conference Proceedings. 2015. V. 1683. 020233.
8. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kopanitsa G.D. Macro-carriers of Plastic Deformation of Steel Surface Layers Detected by Digital Image Correlation // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) AIP Conf. Proc. 1698, 030014-1–030014-8.
9. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. Москва : Наука, 1992. 159 с.
10. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А. Субструктурные и карбидные превращения при пластической деформации в отпущенной хромоникелевой мартенситной стали // Известия вузов. Физика. 1992. № 12. С. 25–32.
11. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А., Клопотов А.А. Закономерности субструктурно-фазовых превращений при пластической деформации мартенситной стали // Известия вузов. Физика. 1994. № 4. С. 52–60.
12. Козлов Э.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н., Теплякова Л.А., Клопотов А.А., Конева Н.А. Влияние типа субструктуры на перераспределение углерода в стали мартенситного класса в ходе пластической деформации // Известия вузов. Физика. 2002. № 3. С. 72–86.

## REFERENCES

1. Regulations on the use of mechanical rebar connections for reinforced concrete structures and nuclear power plants. (In Russian)
2. Marushchak P.O., Panin S.V., Student A.Z., Ovechkin B.B. Deformation destruction of heat-resistant steels. Tomsk: TPU, 2013. 236 p. (In Russian)
3. Alyokhin V.P. Physics of strength and plasticity of surface layers of materials. Moscow: Nauka, 1983. 280 p. (In Russian)
4. Razumovsky I.A. Development of optical methods of deformable body mechanics (review). *Zavodskaya lab. Diagnostics of materials*. 2008; 74 (10): 45–54. (In Russian)
5. Tretyakova T.V. VIC-3D software for digital image correlation for inelastic deformations. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2014; 7 (2): 162–171. (In Russian)
6. Tretyakova T.V., Tretyakov M.P., Wildeman V.E. Measurement accuracy evaluated by video system for analyzing displacement and deformation fields. *Vestnik PGTU. Mekhanika*. 2011; (2): 92–100. (In Russian)
7. Ustinov A., Kopanitsa D., Potekaev A., Klopotov A. Distribution of local deformations on the near-surface layers and scale effects of low alloy steel specimens. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683. 020233.
8. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kopanitsa G.D. Macro-carriers of plastic deformation of steel surface layers detected by digital image correlation. *Advanced Materials in Technology and Construction. AIP Conf. Proc.* 1698, 030014-1–030014-8.
9. Ivanova B.C. Synergetics. Strength and fracture of metal materials. Moscow: Nauka, 1992. 159 p. (In Russian)
10. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A. Substructural and carbide transformations during plastic strain of tempered chromium-nickel martensitic steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1992; (12): 25–32. (In Russian)
11. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A., Klopotov A.A. Structure and phase transformations during plastic strain of martensitic steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1994; (4): 52–60. (In Russian)

12. Kozlov E.V., Popova N.A., Ignatenko L.N., Teplyakova L.A., Klopotov A.A., Koneva N.A. Influence of substructure type on carbon redistribution in martensitic steel during plastic strain. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2002; (3):72–86. (In Russian)

#### Сведения об авторах

Устинов Артем Михайлович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [ustinov\\_a\\_m@tsuab.ru](mailto:ustinov_a_m@tsuab.ru)

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

Пляскин Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [Plyaskinandrei@mail.ru](mailto:Plyaskinandrei@mail.ru)

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [vvg-tomsk@mail.ru](mailto:vvg-tomsk@mail.ru)

#### Authors Details

Artem M. Ustinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [ustinov\\_a\\_m@tsuab.ru](mailto:ustinov_a_m@tsuab.ru)

Anatoly A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [klopotovaa@tsuab.ru](mailto:klopotovaa@tsuab.ru)

Andrey S. Plyaskin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [Plyaskinandrei@mail.ru](mailto:Plyaskinandrei@mail.ru)

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [vvg-tomsk@mail.ru](mailto:vvg-tomsk@mail.ru)

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2024  
Одобрена после рецензирования 19.03.2024  
Принята к публикации 20.03.2024

Submitted for publication 04.03.2024  
Approved after review 19.03.2024  
Accepted for publication 20.03.2024