

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 621.9.048

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

В. В. Головкин<sup>1</sup>, О. М. Батищева<sup>2</sup>, В. А. Папшев<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>1</sup> ms-ap@samgtu.ru, <sup>2</sup> omb@list.ru, <sup>3</sup> pva\_samara@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Предложен способ и специальные ультразвуковые устройства, повышающие эффективность технологического процесса нарезания резьбы с учетом особенностей процесса обработки. *Материалы и методы.* Представлена модель напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы, полученная по результатам эксперимента с варьированием видов ультразвуковых колебаний, что позволило оценить их влияние на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, формирующегося во впадинах резьбы. *Результаты и выводы.* Основные результаты работы иллюстрируются эпюрами распределения полей остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое впадины резьбы.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, резьба, ультразвуковые колебания, упрочнение поверхностного слоя

**Для цитирования:** Головкин В. В., Батищева О. М., Папшев В. А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя резьбовых деталей в условиях нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 5–11. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

### STUDY OF THE FORMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SURFACE LAYER OF THREADED PARTS UNDER THE CONDITIONS OF THREADING WITH ULTRASONIC VIBRATIONS

V.V. Golovkin<sup>1</sup>, O.M. Batishcheva<sup>2</sup>, V.A. Papshev<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>1</sup> ms-ap@samgtu.ru, <sup>2</sup> omb@list.ru, <sup>3</sup> pva\_samara@mail.ru

**Abstract.** *Background.* A method and special ultrasonic devices are proposed that increase the efficiency of the technological process of threading, taking into account the features of the processing process. *Materials and methods.* A model of the stress-strain state of the surface layer of the thread cavity is presented, obtained from the results of an

experiment with varying types of ultrasonic vibrations, which made it possible to evaluate their influence on the formation of the stress-strain state of the surface layer formed in the thread cavity. *Results and conclusions.* The main results of the work are illustrated by diagrams of the distribution of residual stress fields in the hardened surface layer of the thread root.

**Keywords:** stress-strain state, residual stresses, thread, ultrasonic vibrations, hardening of the surface layer

**For citation:** Golovkin V.V., Batishcheva O.M., Papshev V.A. Study of the formation of the stress-strain state of the surface layer of threaded parts under the conditions of threading with ultrasonic vibrations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):5–11. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

### Введение

В современном машиностроении, а также других отраслях промышленности наибольшее распространение получили технологии сборки на основе резьбовых соединений. Преимуществом резьбовых соединений по сравнению с прессовыми соединениями, а также соединениями с помощью заклепок является возможность многократной их разборки и последующей сборки при ремонте и техническом обслуживании агрегатов и машин. При этом соединение деталей осуществляется с необходимым оптимальным усилием (моментом затяжки), что часто является крайне важным условием сборки узла. По различным данным более 60 % сборочных единиц имеет резьбу. При этом качество крепежных резьбовых соединений зависит от всех стадий жизненного цикла изделия – проектирования, изготовления, сборки и эксплуатации. Отметим, что важным этапом является технологический процесс формирования резьбовой поверхности детали. При этом получать резьбу возможно различными способами, например, накатыванием, шлифованием, нарезанием лезвийными инструментами. Кроме того, при необходимости повышения качества поверхностного слоя ответственных резьбовых деталей их подвергают дополнительным упрочняющим операциям, например, обработке микрошариками, щетками, алмазному выглаживанию и др. В результате удается уменьшить шероховатость поверхности, увеличить степень деформационного упрочнения (наклепа), а также получить значительные по величине сжимающие остаточные напряжения, что особо значимо в условиях переменных нагрузок. При этом сжимающие остаточные напряжения суммируются с растягивающими рабочими напряжениями, тем самым повышая циклическую прочность [1, 2].

Следует отметить, что для повышения надежности деталей все более широкое применение получают материалы с высокими физико-механическими характеристиками, позволяющими значительно повысить работоспособность, в том числе ответственных резьбовых деталей. Однако в ряде случаев механическая обработка данных материалов – особенно нарезание резьбы – вызывает серьезные затруднения. Для повышения эффективности обработки применяют различные физико-химические методы, основанные на комбинированном воздействии различных видов энергии. Вследствие применения ультразвуковых технологий удалось повысить производительность операций, стойкость инструмента, точность и качество поверхностного слоя резьбы [1–3].

Анализ разрушения резьбовых деталей показал, что наиболее проблемным местом является впадина резьбы, которая является концентратором напряжений и, соответственно, в ней формируется усталостная трещина, приводящая к дальнейшему разрушению. Поэтому наиболее важным является определение остаточных напряжений, формирующихся именно во впадине резьбы. В соответствии с вышеизложенным целью данной работы является теоретико-экспериментальное определение процесса формирования остаточных напряжений во впадине резьбы в условиях нарезания с ультразвуковыми колебаниями. При этом сначала экспериментально определяется одна из компонент осевых остаточных напряжений, а далее расчетным путем оценивались три составляющие: осевые, окружные и радиальные напряжения.

### Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием ультразвуковых технологий и специального инструмента для нарезания резьб. Технологии и инструмент (рис. 1) разработаны в Самарском государственном техническом университете. В эксперименте использованы калиброванные заготовки из титанового сплава ВТ3-1 [1–3].

Методика заключалась в нарезании резьбы М5 (имеет меньшие прочностные свойства в сравнении с большими диаметрами и вместе с тем является наиболее распространенной). Режимы резания были следующими: скорость резания 0,6 м/мин, продольная подача 1 мм/об, частота ультразвуковых

колебаний, связанная с резонансной частотой ультразвукового инструмента, – 19 000 – 21 000 Гц, амплитуда колебаний – 5 мкм. Согласно методике нарезание производилось как без ультразвуковых колебаний, так и с ультразвуковыми колебаниями. Колебания были приложены соответственно в осевом, тангенциальном (окружном) и радиальном направлении.

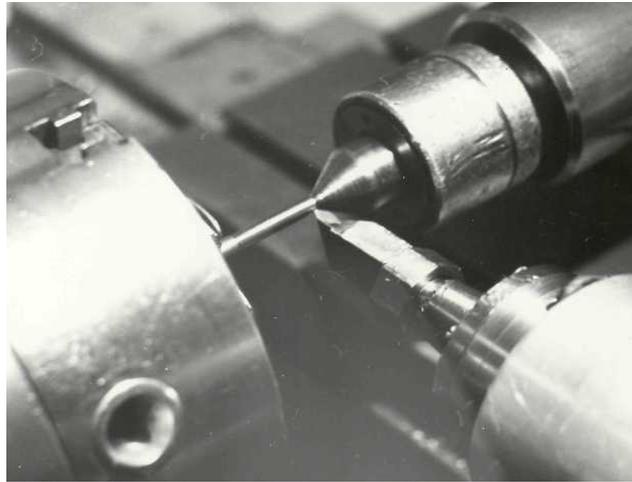


Рис. 1. Установка для ультразвукового нарезания резьбы

Цель экспериментальных исследований заключалась в оценке динамики состояния резьбового образца с использованием специальной методики [4]. На первом этапе половина поверхности впадин резьбы покрывалась лаком. Далее образец подвергался травлению. При травлении происходила деформация образцов и измерялись перемещения от действующих напряжений. Далее производился расчет по формуле

$$\sigma_z^{rez}(h_j) = \frac{C}{X_p(h_j)} \left[ \frac{df(h)}{dh} \right]_j,$$

где  $X_p(h_j)$  – коэффициент, учитывающий масштабный фактор;  $f(h)$  – перемещение образца;  $C$  – коэффициент, определяемый по соотношению

$$C = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ (L-l) \frac{l}{P} + \frac{l^2}{2P} \right],$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $L$  – длина образца с удлинителем;  $l$  – длина образца;  $P$  – шаг резьбы.

### Анализ результатов эксперимента

В результате анализа выявлено, что в поверхностном слое заготовок из титанового сплава ВТЗ-1 при нарезании резьбы формируются сжимающие осевые остаточные напряжения, распределение которых происходит следующим образом:

1. В случае нарезания резьбы без воздействия ультразвука на поверхностный слой остаточные напряжения формируются следующим образом: около поверхности на глубине залегания 0,01 мм имеют значение около 100 МПа, при 0,10 мм достигают 440 МПа, а затем плавно уменьшаются (по модулю) до нуля на глубине 0,16 мм. Затем переходят в растягивающие величиной до 40 МПа.

2. При ведении ультразвуковых колебаний распределение остаточных напряжений меняется в зависимости от их направления. Например, при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями напряжения уменьшаются до 40 МПа на глубине 0,01 мм, при 0,09 мм достигают значений 290 МПа (по модулю), а после 0,15 мм становятся растягивающими и имеют значение около 50 МПа. При введении в зону резания ультразвуковых колебаний в осевом и радиальном направлениях наблюдался значительный рост сжимающих остаточных напряжений (рис. 2).

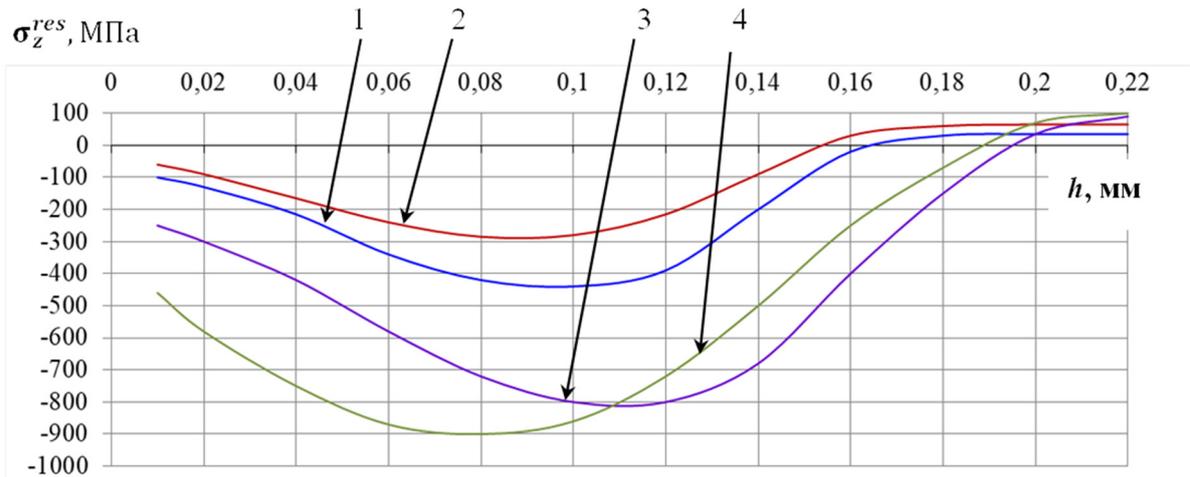


Рис. 2. Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадины резьбы М5 при обработке титанового сплава ВТ3-1: 1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

При осевых ультразвуковых колебаниях удалось достичь значений 810 МПа (по модулю) на глубине 0,11 мм, а при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями получили 900 МПа уже на глубине 0,08 мм.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний в осевом или радиальном направлении позволяет сформировать во впадине резьбы значительные по величине благоприятные остаточные напряжения.

### Результаты и методика оценки напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы

Специальная методика [5] оценки напряженно-деформированного состояния основана на том, что восстановление остаточных напряжений во впадине резьбы производится как в бесконечно малом цилиндрическом образце диаметром, равным диаметру исследуемой впадины резьбы. В качестве исходных данных берутся полученные экспериментальным путем зависимости распределения остаточных напряжений в осевом направлении.

На основе уравнения равновесия:

$$r \frac{d\sigma_r^{rez}}{dr} + \sigma_r^{rez} = \sigma_\theta^{rez}.$$

После определения пластических деформаций можно найти  $\varepsilon_z^0$  и определить значения остаточных напряжений  $\sigma_z^{rez}(r)$ :

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{rez}(r) + \sigma_\theta^{rez}(r)] \right\} dr.$$

С учетом того, что имелись экспериментальные значения осевой компоненты остаточных напряжений, то при расчете последовательно задавали значения окружных остаточных напряжений до момента, пока расхождение экспериментальных и теоретических результатов будет минимальным (рис. 3–5).

Из представленных результатов видно, что значения остаточных напряжений в окружном и осевом направлениях близки. При этом в радиальном направлении формируются растягивающие напряжения и после 0,2 мм остаются постоянными. При радиальных ультразвуковых колебаниях получили 53 МПа, при осевых – 48 МПа, при тангенциальных – 13 МПа, без колебаний – 20 МПа.

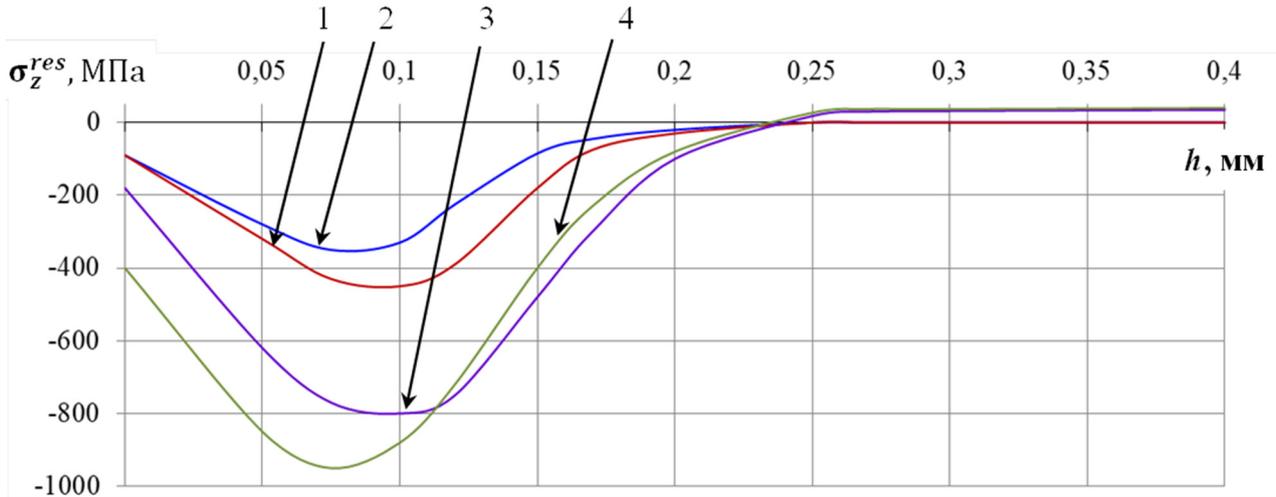


Рис. 3. Распределение окружных остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:  
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание;  
 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

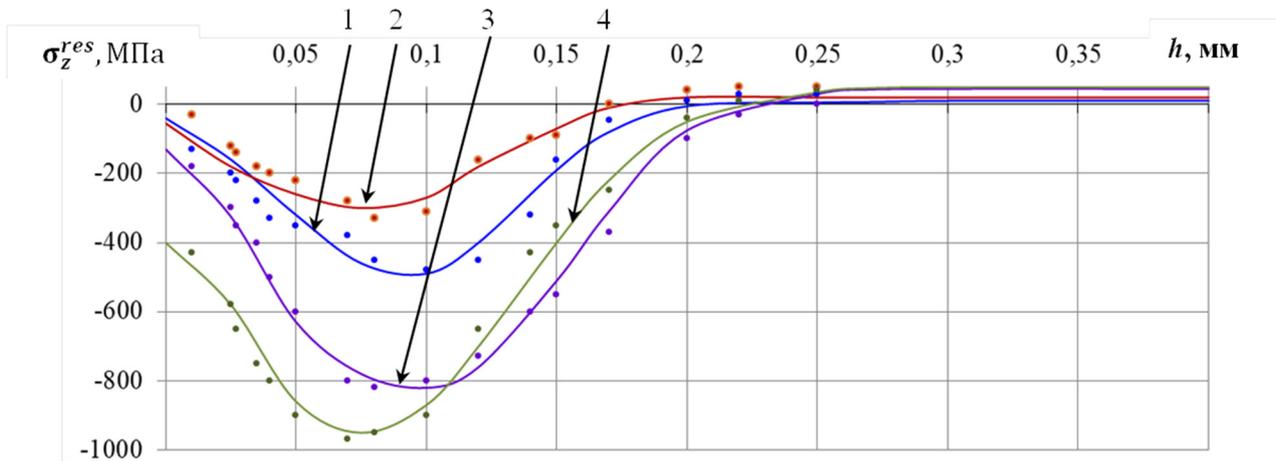


Рис. 4. Распределение осевых остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:  
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание; 3 – резание с осевыми колебаниями;  
 4 – резание с радиальными колебаниями (точки – эксперимент, сплошная линия – расчет)

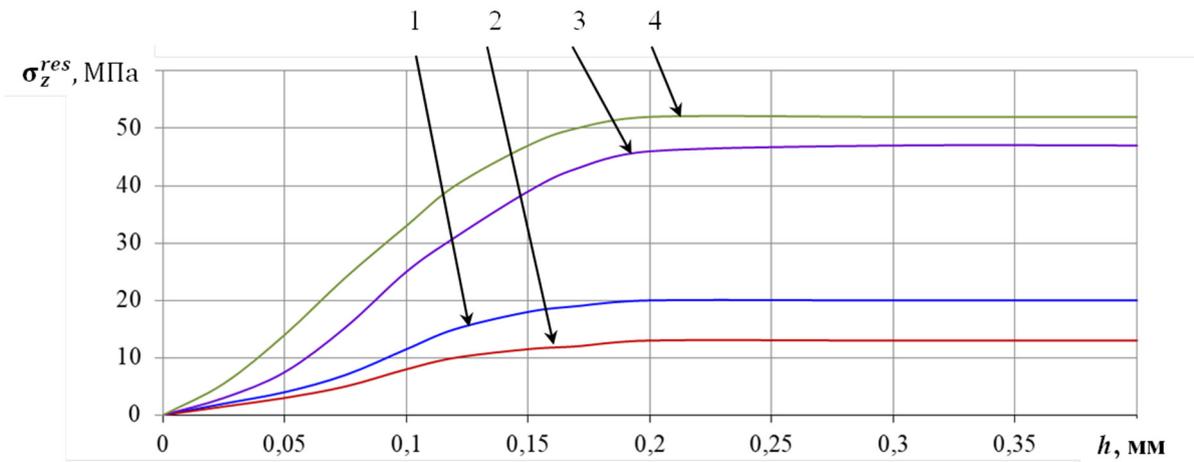


Рис. 5. Распределение радиальных остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:  
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание;  
 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Формирование остаточных напряжений в окружном и осевом направлениях существенно отличается. Сначала происходит возрастание по модулю сжимающих остаточных напряжений до глубины 0,7–0,9 мм, затем уменьшение по модулю до нуля на глубине 0,16–0,20 мм.

Отклонение значений выполненных расчетов и результатов эксперимента в среднем составило 5–13 %. Важным является то, что обработка с применением ультразвуковых колебаний в осевом или радиальном направлении дает возможность достижения значений сжимающих напряжений (окружных и осевых), равных 800–900 МПа.

### Заключение

Выполненные экспериментальные исследования влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы при обработке заготовок из титанового сплава ВТ3-1 позволили установить взаимосвязь влияния различных по направлению ультразвуковых колебаний на формирование полей остаточных напряжений. Показана эффективность применения осевых и радиальных ультразвуковых колебаний: значения остаточных сжимающих напряжений увеличиваются в 1,5–2 раза по сравнению с нарезанием резьбы без ультразвука. Разработана и апробирована математическая модель, дающая возможность определить расчетным путем распределение полей остаточных напряжений во впадине резьбы.

Представленные модели и методики могут быть использованы при прогнозировании эксплуатационного ресурса резьбовых деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

### Список литературы

1. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic influence on the quality formation of surface layer when cutting thread // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. P. 033043.
2. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic Impact Study on Strain Hardening of Thread Profile Surface Layer // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1035–1041.
3. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Enhance the efficiency of the internal threads cutting process with taps by applying ultrasonic vibrations // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 01113.
4. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений : монография. Самара : Изд-во СНЦ, 2008. 64 с.
5. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М. : Машиностроение-1, 2005. 226 с.

### References

1. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic influence on the quality formation of surface layer when cutting thread. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:033043.
2. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic Impact Study on Strain Hardening of Thread Profile Surface Layer. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020:1035–1041.
3. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Enhance the efficiency of the internal threads cutting process with taps by applying ultrasonic vibrations. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:01113.
4. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Ivanov V.B. *Ostatochnyye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti uprochnennykh detaley s kontsentratorami napryazheniy: monografiya = Residual stresses and fatigue resistance of hardened parts with stress concentrators : monograph*. Samara: Izd-vo SNTs, 2008:64. (In Russ.)
5. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnennykh konstruktivnykh = Creep and relaxation of residual stresses in reinforced structure*. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005:226. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Валерий Викторович Головкин

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры транспортных процессов  
и технологических комплексов,  
Самарский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)  
E-mail: ms-ap@samgtu.ru

#### Valery V. Golovkin

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of transport processes and technological complexes,  
Samara State Technical University  
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

**Оксана Михайловна Батищева**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой транспортных процессов  
и технологических комплексов,  
Самарский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)  
E-mail: omb@list.ru

**Валерий Александрович Папшев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры транспортных процессов  
и технологических комплексов,  
Самарский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)  
E-mail: pva\_samara@mail.ru

**Oksana M. Batishcheva**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department of transport processes  
and technological complexes,  
Samara State Technical University  
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

**Valery A. Papshev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of transport processes and technological complexes,  
Samara State Technical University  
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 18.02.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 18.03.2023**

**Принята к публикации/Accepted 21.04.2023**