

STUDY OF THE INFLUENCE OF NON-ABRASIVE ULTRASONIC FINISHING ON RESIDUAL STRESSES IN A TITANIUM WORKPIECE USING FINITE ELEMENT COMPUTER MODELING

Rashid Nailevich Asfandiyarov^{1, 2a}, *Denis Alekseevich Aksenov*^{1, 2},
Anna Aleksandrovna Churakova^{1, 2}, *Maria Andreevna Shishkunova*^{1, 2}

¹ Institute of Physics of Molecules and Crystals, Ural Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, 151 Oktyabrya pr., 450054, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

^a a.r.n@list.ru

ABSTRACT

The magnitude and sign of surface residual stresses are among the key factors influencing the fatigue resistance of metal and alloy parts, especially those operating under active cyclic loads. The creation of compressive residual stresses on the surface of a part, for example, through the method of non-abrasive ultrasonic finishing (NAUF), contributes to increased fatigue resistance. This work is dedicated to the study of the stress-strain state (SSS) of the deformation zone of a VT6 titanium alloy workpiece subjected to NAUF. The SSS analysis was carried out using finite element computer modeling in an elastoplastic task setting after a single impact of the deforming indenter followed by unloading. The study examined the effect of the amplitude of the indenter's oscillations and its geometric characteristics on axial residual stresses, their penetration depth, average normal stress, and strain intensity. The analysis of the modeling results shows that the strain intensity (ϵ) increases with the increasing indenter radius. The distribution pattern of the parameter ϵ is gradient, with values decreasing from the surface to the center of the workpiece. It has been shown that the axial residual stresses in the deformation zone during NAUF are predominantly compressive, which contributes to the increased fatigue resistance of the finished product. The analysis of the obtained data indicates that with increasing indenter's oscillation amplitude, the values of compressive axial residual stresses increase, reaching maximum values of 1300 MPa at an amplitude of 100 μm and an indenter radius of R1. The penetration depth of these stresses reaches 0.5 mm.

KEYWORDS

VT6 titanium alloy; non-abrasive ultrasonic finishing; residual stresses; finite element computer modeling.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БЕЗАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТИТАНОВОЙ ЗАГОТОВКЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рашид Наилевич Асфандияров^{1, 2a}, *Денис Алексеевич Аксенов*^{1, 2},
Анна Александровна Чуракова^{1, 2}, *Мария Андреевна Шишкунова*^{1, 2}

АННОТАЦИЯ

Величина и знак поверхностных остаточных напряжений являются одними из ключевых факторов, влияющих на сопротивление усталости деталей из металлов и сплавов, в особенности, работающих в условиях активных циклических нагрузок. Так, повышению сопротивления усталости способствует создание на поверхности детали сжимающих остаточных напряжений, например, с помощью метода безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО). Данная работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) очага деформации заготовки из титанового сплава марки ВТ6, подвергнутой БУФО. Анализ НДС проведен с помощью конечно-элементного компьютерного моделирования в упругопластической постановке задачи после однократного удара деформирующего индентора с последующей разгрузкой. В ходе исследования рассмотрено влияние амплитуды колебаний индентора и его геометрических характеристик на осевые остаточные напряжения, глубину их залегания, среднее нормальное напряжение и интенсивность деформации. Анализ результатов моделирования показывает, что с увеличением радиуса индентора увеличивается значение интенсивности деформации (ϵ). Характер распределения параметра ϵ – градиентный с уменьшением значений от поверхности к центру заготовки. Показано, что осевые остаточные напряжения в области очага деформации при БУФО преимущественно сжимающие, что способствует увеличению сопротивления усталости готового изделия. Из анализа полученных данных видно, что с увеличением амплитуды колебаний индентора увеличиваются значения сжимающих осевых остаточных напряжений, достигая максимальных значений 1300 МПа при амплитуде 100 мкм и инденторе R1. Глубина залегания этих напряжений при этом достигает 0,5 мм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Титановый сплав ВТ6; безабразивная ультразвуковая финишная обработка; остаточные напряжения; конечно-элементное компьютерное моделирование.

Введение

Циклические, а в особенности знакопеременные, напряжения являются одной из основных причин, ведущих к усталостному разрушению деталей и изделий, работающих в условиях активных нагрузок [1]. В особенности данная проблема актуальна в особо ответственных областях, таких как авиация, космонавтика, медицина.

Как правило, усталостное разрушение начинается с поверхности детали, где в условиях знакопеременных нагрузок под дей-

ствием растягивающих напряжений образуется микротрещина и далее развивается вплоть до разрушения [2–5]. Однако если в поверхностных и приповерхностных слоях сформировать преимущественно сжимающие остаточные напряжения, то вероятность появления усталостных трещин снижается, так как суммарное воздействие от приложенных растягивающих и остаточных сжимающих напряжений будет меньше.

Исследования показывают, что для повышения сопротивления усталости металличе-

ских изделий эффективными являются методы поверхностно-пластического деформирования (ППД), например, обдувка дробью, обкатка роликами, ультразвуковая обработка поверхности и др. [6–8]. При ППД в поверхностных слоях, до нескольких сотен мкм, осуществляется интенсивное измельчение структуры, повышается твердость и прочность, снижается шероховатость, но главное, формируются преимущественно сжимающие остаточные напряжения, что в совокупности оказывает благоприятное влияние на сопротивление усталости изделия.

Из методов ППД стоит выделить безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО), представляющую собой импульсно-упрочняющую чистовую обработку с использованием ультразвуковых колебаний. В БУФО реализуется поверхностное пластическое деформирование посредством механических колебаний деформирующего инструмента с ультразвуковой частотой величиной порядка 19–22 кГц. Механические колебания деформирующего индентора обеспечиваются ультразвуковым генератором, магнитострикционным преобразователем и волноводом-концентратором [9].

Результаты исследований показывают, что применение БУФО позволяет достигать существенного повышения сопротивления усталости, например, для титана повышение может достигать 50 % [10]. Формируемое при этом градиентное (по размеру зерна) структурное состояние обеспечивает повышение ряда других эксплуатационных характеристик [11–15]. К плюсам БУФО стоит отнести универсальность применяемых металлообрабатывающих станков, в том числе с ЧПУ: например, токарный – обработка деталей вращения, фрезерный – обработка деталей плоской конфигурации и т.д. [16–19].

Однако определение режима БУФО для обработки конкретного металла или сплава зависит от довольно большого количества взаимосвязанных между собой технологических параметров. К основным можно

отнести: шаг подачи инструмента, определяющий перекрытие между отпечатками после ударов индентора; статическую силу прижатия индентора к заготовке; мощность ультразвукового генератора, определяющую амплитуду колебаний индентора, т.е. фактически глубину проработки; геометрические параметры индентора [20]. Процесс БУФО отличается высокой скоростью: удары индентора происходят с частотой 19–22 кГц, заготовка при этом вращается с частотой до 3000 об/мин, одновременно происходит линейное перемещение индентора вдоль заготовки. Такие скоростные условия заметно усложняют исследование процесса БУФО, особенно в совокупности с большим количеством различных комбинаций технологических параметров. В результате экспериментальные исследования процесса БУФО представляют собой непростую научно-техническую задачу. Однако применение конечно-элементного моделирования (КЭМ) позволяет решать подобные задачи и исследовать сложный процесс БУФО. Применение КЭМ позволяет провести детальные исследования влияния различных технологических параметров на напряженно-деформированное состояние, которое в итоге определяет результат деформационной обработки.

Целью настоящей работы являлось исследование напряженно-деформированного состояния очага деформации цилиндрической заготовки из титанового сплава марки ВТ6, подвергнутой безабразивной ультразвуковой финишной обработке. Сплав ВТ6 является одним из самых распространенных титановых сплавов, активно применяется в конструкциях авиационных изделий, соответственно, повышение его эксплуатационных характеристик является актуальной задачей. Так как остаточные напряжения оказывают существенное влияние на усталостные свойства конечных изделий, особое внимание уделено изучению влияния на их величину и глубину залегания амплитуды колебаний и геометрических параметров индентора.

1. Постановка задачи, граничные условия и принятые допущения

Для конечно-элементного моделирования БУФО был применен программный комплекс «Deform 3D». В данной работе моделирование проводилось для варианта обработки заготовки на токарном станке (рис. 1): заготовка 1 одним концом была зафиксирована в патроне 2, а другим – на конусной оправке 3. Деформирующий индентор 4 совершает возвратно-поступательное движение с ультразвуковой частотой, равной 22 кГц в направлениях, указанных стрелкой. В разработанной конечно-элементной модели рассматривался 1 цикл возвратно-поступательного движения, т.е. с процессом разгрузки. Исходя из принятой частоты колебаний индентора, равной 22 кГц, определено время деформирования при одном ударе, равное 22,7 мкс. Время, необходимое для разгрузки, определяли из графика «энергия–время». Согласно полученным данным, время от начала удара до разгрузки (т.е. одного цикла) составило 47,7 мкс.

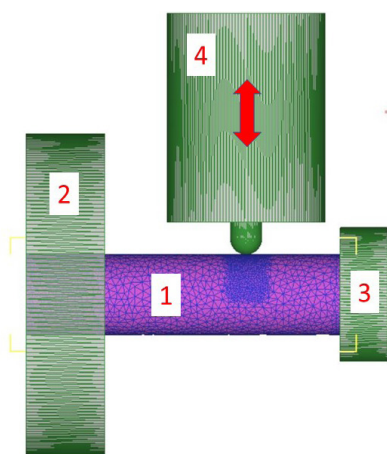


Рис. 1. Сборка 3D-моделей оснастки и заготовки для моделирования процесса БУФО:
1 – заготовка; 2 – патрон станка;
3 – конусная оправка; 4 – индентор

Fig. 1. Assembly of the 3D models of the tooling and workpiece for the modeling of the NAUF process:
1 – workpiece; 2 – machine chuck;
3 – tapered mandrel; 4 – indenter

В реальном процессе БУФО на заготовку оказывается совместное воздействие как статической силы прижатия, так и амплитуды колебаний индентора. Разделение вкладов от этих факторов довольно нетривиальная задача, поэтому было принято решение оценивать фактическую амплитуду (величину) внедрения индентора. Для исследований были выбраны 3 варианта амплитуды внедрения индентора: 10, 50 и 100 мкм. При постоянном времени удара скорость движения индентора составляла соответственно 440, 2200 и 4400 мм/с.

Существенное влияние на результат БУФО также оказывает геометрическое исполнение индентора. В настоящем исследовании был проведен анализ двух вариантов радиуса закругления индентора $R1 = 1$ мм, $R3 = 3$ мм.

В качестве исследуемого материала выбран титановый сплав марки ВТ6, данные о его реологических свойствах были взяты из стандартной библиотеки материалов Deform 3D. Для получения данных по остаточным напряжениям задача решалась в упругопластической постановке и, соответственно, материал заготовки принят упругопластическим, а также изотропным. В начальный момент времени в заготовке отсутствуют напряжения и деформации. Модели оснастки заданы как абсолютно жесткие тела.

Заготовка выполнена в виде цилиндра длиной 20 мм и диаметром 10 мм. Сетка конечных элементов из тетраэдров в количестве 32 тысячи сгенерирована с локальным сгущением в области очага деформации (рис. 1). Моделирование проводилось с учетом компенсации объема заготовки.

На основе литературных данных [21] фактор трения по Зибелю принимали равным 0,25. На контактных поверхностях оснастки было задано условие непроницаемости.

Расчет осуществлялся с постоянным шагом по времени, равным $2,27 \cdot 10^{-7}$ с. Использовался решатель разреженных матриц с итерациями по методу Ньютона–Рафсона.

Конечно-элементная модель описывала движение сплошной среды на основе подхода Лагранжа.

2. Результаты и обсуждение

Деформированное состояние. На рис. 2 показано распределение накопленной степени деформации (ϵ) для случая, когда радиус инструмента составляет R1, а амплитуда равна 100 мкм. Здесь и далее в отчете амплитуды указаны согласно формуле (1), то есть они представляют собой величины внедрения индентора в заготовку. Распределение деформации имеет градиентный характер с максимальным значением на поверхности в области контакта с индентором и в приповерхностном слое, что является типичным для всех рассмотренных случаев. Увеличение амплитуды индентора ведет к увеличению

степени накопленной деформации. С увеличением радиуса индентора площадь воздействия также увеличивается, и максимальное значение накопленной степени деформации увеличивается. Например, увеличение радиуса индентора с 1 до 3 мм при амплитуде 100 мкм приводит к увеличению значения ϵ практически в 2 раза с 0,275 до 0,5.

Максимальные величины ϵ наблюдаются для варианта с радиусом $R = 2$ мм и достигают значений $\epsilon = 0,5$ при амплитуде индентора 100 мкм (рис. 3). Стоит отметить, что увеличение радиуса инструмента при увеличении амплитуды колебаний ведет к увеличению накопленной степени деформации. Так, в случае радиуса R1 значение ϵ для амплитуды = 100 мкм составляет 0,275, а при R3 $\epsilon = 0,5$, что практически в 2 раза больше, однако в случае амплитуды 10 мкм разницы практически нет.

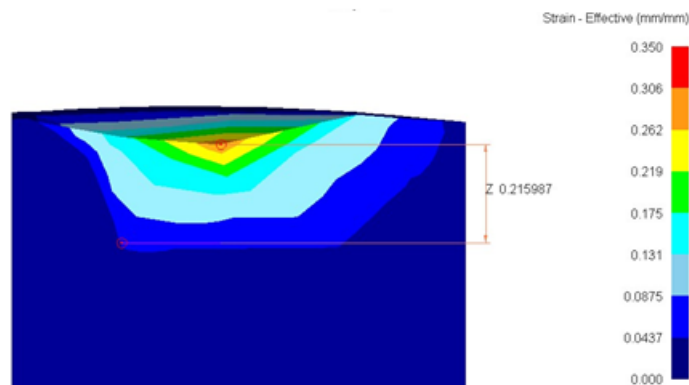


Рис. 2. Распределение накопленной степени деформации (ϵ) для случая R1 и 100 мкм

Fig. 2. Distribution of accumulated strain (ϵ) for the case of R1 и 100 μm

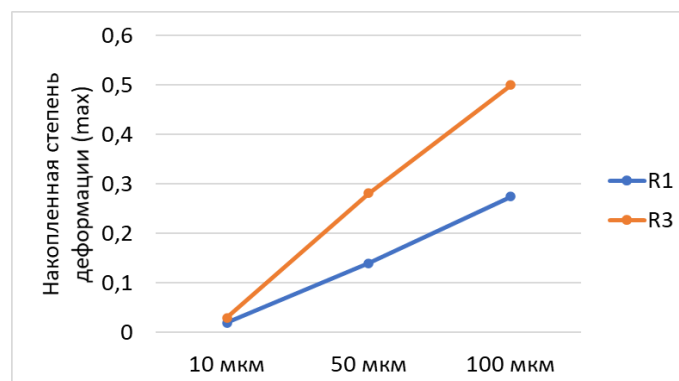


Рис. 3. Зависимость накопленной степени деформации от радиуса инструмента и амплитуды

Fig. 3. Dependence of accumulated strain on the tool radius and amplitude

Напряженное состояние. Средние напряжения характеризуют схему напряженного состояния в момент удара. Если преобладают сжимающие напряжения, схема считается «мягкой», что снижает вероятность образования дефектов. Напротив, преобладающие растягивающие напряжения характеризуют схему как «жесткую», что увеличивает вероятность возникновения дефектов или даже разрушения заготовки в процессе обработки.

На рис. 4 представлено распределение средних напряжений в очаге деформации (R1, 100 мкм). Согласно полученным данным (рис. 4), вне зависимости от радиуса инструмента и амплитуды индентора средние напряжения преимущественно сжимающие, соответственно, схема напряженного состояния при обработке методом БУФО является «мягкой». Максимальные сжимающие напряжения характерны для амплитуды 100 мкм и достигают 1500 МПа.

Осевые остаточные напряжения и глубина их залегания. Одной из наиболее

важных характеристик поверхностного слоя изделий, влияющих на сопротивление усталости, являются остаточные напряжения. В случае цилиндрических деталей обычно используются понятия осевых, окружных и радиальных остаточных напряжений. Для оценки эффективности упрочняющей обработки часто проводят сравнительные исследования осевых остаточных напряжений, поскольку в большинстве случаев они оказывают наиболее значительное влияние на характеристики готового изделия, в том числе на сопротивление усталости.

На рис. 5 показано распределение осевых остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки для R1 и амплитуды 100 мкм.

Анализ результатов показывает, что осевые остаточные напряжения в области очага деформации – преимущественно сжимающие и с увеличением амплитуды колебаний увеличиваются и их значения. Максимальные значения наблюдаются в случае амплитуды, равной 100 мкм, и достигают 1300 МПа (рис. 6).

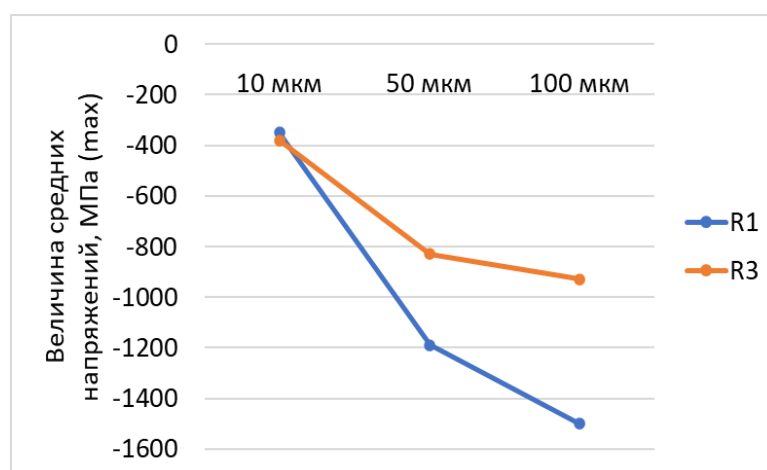


Рис. 4. Зависимость средних напряжений от радиуса инструмента и амплитуды

Fig. 4. Dependence of average stresses on the tool radius and amplitude

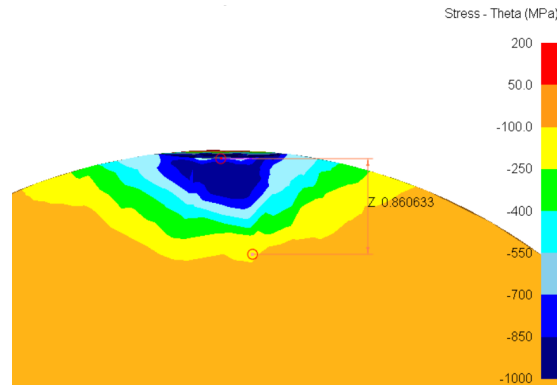


Рис. 5. Глубина залегания и распределение осевых остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки для R1 и 100 мкм

Fig. 5. Occurrence depth and distribution of axial residual stresses in the cross section of the workpiece for R1 and 100 μm

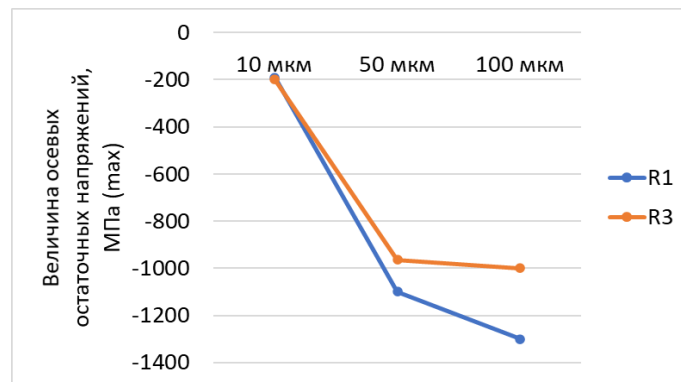


Рис. 6. Зависимость осевых остаточных напряжений от радиуса инструмента и амплитуды

Fig. 6. Dependence of the axial residual stresses on the tool radius and amplitude

Исследование влияния радиуса инструмента показывает, что до величины амплитуды порядка 50 мкм с увеличением радиуса, т.е. фактически с увеличением площади контакта, для величины остаточных осевых напряжений разницы не наблюдается. Однако при амплитуде 100 мкм обработка индентором R1 приводит к большему значению остаточных напряжений до 25% разницы в сравнении с R3. Характер распределения представлен на рис. 5. Видно, что распределение градиентное с максимальными значе-

ниями под индентором с дальнейшим уменьшением к центру заготовки. Данная картина характерна для всех рассмотренных случаев. Глубина залегания (рис. 7) в большей степени зависит от амплитуды колебаний, однако с увеличением амплитуды растет и влияние радиуса индентора. Так, в случае амплитуды, равной 10 мкм, разница глубины залегания практически отсутствует, в то время как для амплитуды 100 мкм разница между R1 и R3 составляет более 40%.

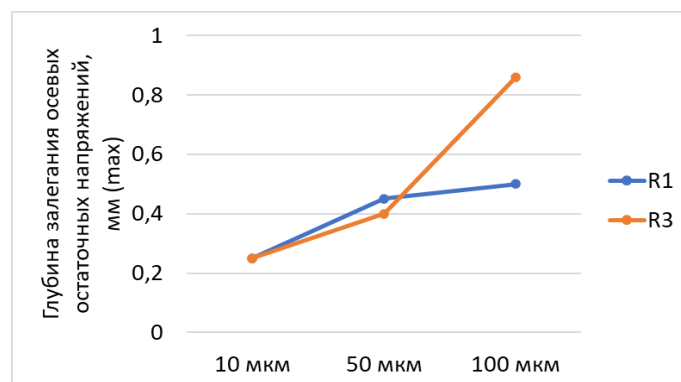


Рис. 7. Зависимость глубины залегания осевых остаточных напряжений от радиуса инструмента и амплитуды

Fig. 7. Dependence of the occurrence depth of the axial residual stresses on the tool radius and amplitude

Выводы

Методом конечно-элементного компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние очага деформации заготовки из титанового сплава ВТ6 в процессе БУФО. Изучалось воздействие индентора с амплитудой 10–100 мкм и радиусами закругления 1 и 3 мм. Показано, что увеличение радиуса индентора ведет к увеличению накопленной степени деформации (ϵ). Характер распределения ϵ является градиентным, с уменьшением значений от поверхности к центру заготовки. Максимальные величины ϵ наблюдаются для варианта с радиусом $R = 3$ мм и достигают значений $\epsilon = 0,5$ при амплитуде колебаний 100 мкм.

В очаге деформации при БУФО преобладают сжимающие напряжения. Согласно анализу полученных данных максимальные сжимающие напряжения наблюдаются при амплитуде колебаний 100 мкм и достигают 1500 МПа.

Анализ результатов моделирования показывает, что осевые остаточные напряжения в области очага деформации преимущественно сжимающие, что способствует увеличению сопротивления усталости готового изделия. Установлено, что с увеличением амплитуды колебаний индентора увеличиваются значения сжимающих осевых остаточных напряжений, достигая максимальных значений 1300 МПа при амплитуде 100 мкм

и инденторе R1. Глубина залегания этих напряжений при этом достигает 0,5 мм.

Применение амплитуды величиной менее 50 мкм нецелесообразно ввиду малых величин сжимающих остаточных напряжений и малой глубины их залегания. Обоснованным является применение инденторов с большей площадью отпечатка, так как это обеспечивает большие значения глубины остаточных сжимающих напряжений, что в итоге приведет к повышению сопротивления усталости готовых изделий.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке молодёжной лаборатории «Комбинированные поверхностные и объёмные методы обработки функциональных и конструкционных материалов» (договор № ЦПД-МЛ-10/РФ-23 от 21 ноября 2023 года).

This research was supported by the Youth Laboratory “Combined Surface and Bulk Methods for the Treatment of Functional and Structural Materials” (agreement No. TsPD-ML-10/RF-23 dated 21 November 2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002.
2. Эрдеди А.А., Медведев Ю.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика: Теоретическая механика. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1991.

3. Pande C.S., Imam M.A., Srivatsan T.S. Fundamentals of fatigue crack initiation and propagation: A review. In: *Fatigue of materials advances and emergences in understanding*. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2010. P. 1–18.
4. Li L., Kim M., Lee S., Bae M., Lee D. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughness and wear performance of SUS301 steel. *Surf. Coat. Technol.* 2016. Vol. 307. P. 517–524.
5. Liu C.S., Liu D.X., Zhang X.H., Liu D., Ma A.M., Ao N., Xu X.C. Improving fatigue performance of Ti–6Al–4V alloy via ultrasonic surface rolling process. *J. Mater. Sci. Technol.* 2019. Vol. 35. P. 1555–1562.
6. Федчишин О.В., Трофимов В.В., Клименов В.А. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и физико-механические свойства титана ВТ1-0. *Сиб. мед. журн.* 2009. No. 6. С. 189–192.
7. Zhang H., Chiang R., Qin H.F., Ren Z.C., Hou X.N., Lin D., Doll G.L., Vasudevan V.K., Dong Y.L., Ye C. The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue performance of 3D-printed Ti64. *Int. J. Fatigue.* 2017. Vol. 103. P. 136–146.
8. Liu J., Suslov S., Ren Z.C., Dong Y.L., Ye C. Microstructure evolution in Ti64 subjected to laser-assisted ultrasonic nanocrystal surface modification. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.* 2019. Vol. 136. P. 19–33.
9. Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов – технология XXI века. *Металлообработка.* 2002. No. 4. С. 46–48.
10. Александров М.К., Папшева Н.Д., Акушская О.М. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД. *Вестн. Самар. гос. аэрокосм. уни-та.* 2011. No. 3 (27). С. 271–276.
11. Козлов Э.В., Громов В.Е., Коваленко В.В., Попова Н.А. Градиентные структуры в перлитной стали. Новокузнецк: СибГИУ, 2004.
12. Иванов Ю.Ф., Ефимов О.Ю., Попова Н.А., Коваленко В.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний на наномасштабном уровне в прокатных валках. *Фундам. пробл. соврем. материаловедения.* 2008. No. 4. С. 55–58.
13. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients. *Science.* 2014. Vol. 345. P. 1455–1456.
14. Kattoura M., Telang A., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy. *Mater. Sci. Eng. A.* 2018. Vol. 711. P. 364–377.
15. Liu D., Liu D.X., Zhang X.H., Liu C.S., Ao N. Surface nanocrystallization of 17-4 precipitation-hardening stainless steel subjected to ultrasonic surface rolling process. *Mater. Sci. Eng. A.* 2018. Vol. 726. P. 69–81.
16. Müller M., Lebedev A., Svobodová J., Náprsková N., Lebedev P. Abrasive-free ultrasonic finishing of metals. *Manuf. Technol.* 2014. Vol. 14 (3). P. 366–370.
17. Aleš Z., Pavlů J., Hromasová M., Svobodová J. Tribological properties of brass surfaces machined by abrasive - free ultrasonic finishing process. *Manuf. Technol.* 2019. Vol. 19 (1). P. 3–8.
18. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Каминский П.П., Шаркеев Ю.П., Лотков А.И. Ультразвуковая поверхностная обработка – перспективный способ повышения ресурса работы деталей железнодорожного транспорта. *Вестн. СНУ им. В. Даля.* 2010. Т. 152. No. 10. С. 117–121.
19. Ковалевская Ж.Г., Иванов Ю.Ф., Перевалова О.Б., Клименов В.А., Уваркин П.В. Исследование микроструктуры поверхностных слоев малоуглеродистой стали после точения и ультразвуковой финишной обработки. *Физика металлов и материаловедение.* 2013. Т. 114. No. 1. С. 47–60.
20. Asfandiyarov R. N., Raab G., Gunderov D. V., Aksenov D. A., Raab A. G. Finite Element Analysis of the Stress–Strain State of the Deformation Zone of a Workpiece from UFG Grade 4 Ti Subjected to Abrasive-Free Ultrasonic Finishing // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 2022. Vol. 63. No. 6. pp. 617–623.
21. Meier L., Schaal N., Wegener K. In-process measurement of the coefficient of friction on titanium. *Procedia CIRP.* 2017. Vol. 58. P. 163–168.