

Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации заготовки из УМЗ Ti Grade 4, подвергнутой безабразивной ультразвуковой финишной обработке

© 2022 г. Р.Н. Асфандияров^{1,3}, Г.И. Рааб², Д.В. Гундеров^{1,3}, Д.А. Аксенов^{1,3}, А.Г. Рааб³

¹ Институт физики молекул и кристаллов (ИФМК)

Уфимского федерального исследовательского центра РАН (УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

³ Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), г. Уфа, Россия

Статья поступила в редакцию 27.03.2022 г., доработана 29.04.2022 г., подписана в печать 04.07.2022 г.

Аннотация: Эффективным подходом к повышению сопротивления усталости металлических изделий является создание на поверхности изделия сжимающих остаточных напряжений с помощью его обработки методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Один из эффективных методов ППД – процесс безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО). Также известным подходом к повышению механических характеристик, в том числе усталостного сопротивления, является создание в изделии ультрамелкозернистого (УМЗ) структурного состояния. Настоящая работа посвящена исследованию с помощью конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния УМЗ-заготовки, подвергнутой ППД методом БУФО. В качестве материала заготовки выбран технически чистый титан марки Grade 4 в УМЗ-состоянии, полученный методом равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К). В ходе исследования проведен анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации после однократного удара индентора с последующей разгрузкой в упругопластической постановке задачи. Рассмотрено влияние амплитуды колебаний индентора и его геометрических характеристик на радиальные остаточные напряжения, в том числе глубину их залегания, среднее нормальное напряжение и интенсивность деформации. Установлено, что с увеличением радиуса индентора снижается значение интенсивности деформации (e). Характер распределения параметра e – градиентный, с уменьшением значений от поверхности к центру заготовки. Анализ результатов моделирования показывает, что радиальные остаточные напряжения в области очага деформации являются преимущественно сжимающими и, соответственно, позволят повысить сопротивление усталости готового изделия. Выявлено, что с увеличением амплитуды колебаний индентора возрастают и значения сжимающих радиальных остаточных напряжений – их максимум достигает 540 МПа при амплитуде 75 мкм с глубиной залегания этих напряжений до 0,3 мм. Увеличение радиуса индентора, т.е. фактически площади контакта, ведет к повышению величины сжимающих радиальных остаточных напряжений, причем практически линейно.

Ключевые слова: безабразивная ультразвуковая финишная обработка, конечно-элементное компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, радиальные остаточные напряжения, УМЗ, титан Grade 4.

Асфандияров Р.Н. – канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории физики твердого тела ИФМК УФИЦ РАН (450054, г. Уфа, пр. Октября, 71). E-mail: a.r.n@list.ru.

Рааб Г.И. – докт. техн. наук., вед. науч. сотр. Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38). E-mail: giraab@mail.ru.

Гундеров Д.В. – докт. физ.-мат. наук., вед. науч. сотр. лаборатории физики твердого тела ИФМК УФИЦ РАН. E-mail: dimagun@mail.ru.

Аксенов Д.А. – мл. науч. сотр. лаборатории физики твердого тела ИФМК УФИЦ РАН. E-mail: aksyonovda@mail.ru.

Рааб А.Г. – канд. техн. наук, науч. сотр. Научно-исследовательского института физики перспективных материалов УГАТУ (450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12). E-mail: agraab@mail.ru.

Для цитирования: Асфандияров Р.Н., Рааб Г.И., Гундеров Д.В., Аксенов Д.А., Рааб А.Г. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния очага деформации заготовки из УМЗ Ti Grade 4, подвергнутой безабразивной ультразвуковой финишной обработке. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. No. 5. С. 36–45.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-36-45.

Finite element analysis of stress-strain state of the deformation zone of a UFG Ti Grade 4 workpiece subjected to abrasive-free ultrasonic finishing

R.N. Asfandiyarov^{1,3}, G.I. Raab², D.V. Gunderov^{1,3}, D.A. Aksenov^{1,3}, A.G. Raab³

¹ Institute of Molecules and Crystals Physics of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IMCP UFRC RAS), Ufa, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Received 27.03.2022, revised 29.04.2022, accepted for publication 04.07.2022

Abstract: An effective approach to increasing the fatigue resistance of metal products is to create compressive residual stresses on the surface of the product using surface plastic deformation (SPD) processing. One of the effective SPD methods is the process of abrasive-free ultrasonic finishing (AFUF). Another well-known approach to improving mechanical properties including fatigue resistance is to create an ultrafine-grained (UFG) structural state in the product. This research focuses on the finite-element study of the stress-strain state of a UFG workpiece subjected to SPD by the AFUF method. Commercially pure Grade 4 titanium in the UFG state obtained by the ECAP-Conform method was chosen as a workpiece material. In the course of the study, the stress-strain state of the deformation zone was analyzed after a single indentation with subsequent unloading under the elastic-plastic scenario. The effect of the indenter oscillation amplitude and its geometry on radial residual stresses including their depth of occurrence, average normal stress and strain intensity was analyzed. It was found that as the indenter radius increases, the strain intensity (ϵ) value decreases. The ϵ parameter distribution has a gradient nature with a decrease in values from the surface to the center of the workpiece. An analysis of simulation results shows that radial residual stresses in the deformation zone are predominantly compressive, and, accordingly, they will increase the fatigue resistance of the finished product. It was established that as the indenter oscillation amplitude increases, the values of compressive radial residual stresses also increase. Their maximum values reach 540 MPa at an amplitude of 75 μm with the depth of these stresses up to 0.3 mm. An increase in the indenter radius, i.e. in fact the contact area, leads to an increase in the magnitude of compressive radial residual stresses with an almost linear behavior.

Keywords: abrasive-free ultrasonic finishing, finite element computer modeling, stress-strain state, radial residual stresses, UFG, Ti Grade 4.

Asfandiyarov R.N. — Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Laboratory of solid state physics of the Institute of Molecules and Crystals Physics of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IMCP UFRC RAS) (450054, Russia, Ufa, Oktyabrskaya ave., 71). E-mail: a.r.n@list.ru.

Raab G.I. — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of the Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin ave., 38). E-mail: giraab@mail.ru.

Gunderov D.V. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), leading researcher of the Laboratory of solid state physics, IMCP UFRC RAS. E-mail: dimagun@mail.ru.

Aksenov D.A. — junior researcher of the Laboratory of solid state physics, IMCP UFRC RAS. E-mail: aksyonovda@mail.ru.

Raab A.G. — Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Research Institute of Physics of Advanced Materials of the Ufa State Aviation Technical University (450008, Russia, Ufa, K. Marks str., 12). E-mail: agraab@mail.ru.

For citation: Asfandiyarov R.N., Raab G.I., Gunderov D.V., Aksenov D.A., Raab A.G. Finite element analysis of stress-strain state of the deformation zone of a UFG Ti Grade 4 workpiece subjected to abrasive-free ultrasonic finishing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 5. P. 36–45 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-5-36-45.

Введение

Циклические знакопеременные напряжения являются одним из основных факторов, приводящих к усталостному разрушению имплантатов, работающих в условиях активных нагрузок [1]. Исходя из этого, разработка и исследование подходов к обработке конструкционных материалов медицинского назначения для повышения сопротивления усталости представляют собой важную и актуальную задачу. В качестве материалов для имплантатов широко используются титан и его сплавы [2, 3] — этому способствуют такие их свойства, как хорошая биоинертность, высокая

коррозионная стойкость и т.д. Однако усталостные характеристики технически чистого титана не всегда удовлетворяют современным требованиям, а применение легирующих элементов в сплавах может оказывать негативное влияние на организм пациента. Одним из решений данной проблемы является использование технически чистого титана, например марки Grade 4, подвергнутого деформационной упрочняющей обработке. К перспективным видам обработки относятся методы, основанные на принципах интенсивной пластической деформации, ведущие к формированию

ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния, обеспечивающего повышенный комплекс свойств. Такие методы включают равноканальное угловое пресование, волочение со сдвигом, всестороннюю изотермическую ковку и др. [4—6].

Как правило, усталостное разрушение детали начинается на поверхности, где в условиях знакопеременных нагрузок под действием растягивающих напряжений и вследствие несовершенства рельефа на поверхности возникает микротрещина, которая развивается вплоть до разрушения [7—10]. Однако если в поверхностном слое присутствуют сжимающие остаточные напряжения, то вероятность появления трещин снижается. Это объясняется тем, что при нагрузке приложенные растягивающие напряжения будут суммироваться со сжимающими остаточными напряжениями и, таким образом, суммарное напряжение, действующее на изделие, будет меньше.

Исследования показывают, что для повышения сопротивления усталости титана и его сплавов весьма эффективными являются методы поверхностно-пластического деформирования (ППД). К ним относятся обдувка дробью, обкатка роликами, ультразвуковая обработка поверхности и др. [11—13]. Как правило, в поверхностном слое, порядка сотен мкм, осуществляется интенсивное измельчение структуры с градиентным распределением по размеру зерна, с преобладанием более мелких зерен ближе к поверхности. Но главное, при такой обработке формируются остаточные сжимающие напряжения, а также происходит снижение шероховатости поверхности, что в итоге приводит к существенному повышению сопротивления усталости готового изделия.

Анализ литературы показал, что на текущий момент комплексных исследований обработки металлов в УМЗ-состоянии методами поверхностно-пластического деформирования нет. Однако, исходя из вышесказанного, исследования в этом направлении могут иметь перспективы развития.

Среди различных методов ППД стоит выделить безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО). Процесс БУФО представляет собой импульсно-упрочняющую чистовую обработку с использованием ультразвуковых колебаний. Данный метод ППД заключается в поверхностном пластическом деформировании обрабатываемой заготовки посредством механических колебаний деформирующего инструмента с ультразвуковой частотой. Механические колебания обеспечива-

ются ультразвуковым генератором, магнитострикционным преобразователем и волноводом-концентратором [14].

Основной задачей БУФО является упрочняющая отделочная обработка, т.е. снижение шероховатости поверхности и ее упрочнение, при этом происходит формирование преимущественно сжимающих остаточных напряжений на поверхности. Результаты исследований показывают, что применение БУФО позволяет достигать существенного повышения усталостной прочности титана, вплоть до 50 % [15]. Также градиентное по размеру зерна измельчение структуры приводит к повышению ряда других эксплуатационных характеристик [16—20].

Выбор режима обработки методом БУФО зависит от довольно большого количества взаимосвязанных между собой технологических параметров, среди которых ключевыми являются: шаг подачи инструмента, определяющий перекрытие между обработанными областями после ударов индентора; статическая сила прижатия индентора к обрабатываемой заготовке; мощность ультразвукового генератора, определяющая амплитуду механических колебаний индентора, т.е. фактически глубину проработки; геометрические параметры индентора. К преимуществам обработки методом БУФО стоит отнести то, что оборудование для нее можно устанавливать на различные виды металлообрабатывающих станков: например, на токарный — обработка деталей вращения, фрезерный — обработка деталей плоской конфигурации и т.д. [21—24].

Колебания индентора в процессе БУФО происходят с частотой 22 кГц, т.е. задается очень высокая скорость деформации. Это сильно усложняет исследование поведения материалов при такой обработке. Большое количество различных комбинаций технологических параметров также затрудняет исследования, в том числе напряженно-деформированного состояния заготовки. Таким образом, экспериментальные исследования процесса БУФО представляют собой непростую научно-техническую задачу. Однако развитие конечно-элементного моделирования (КЭМ) позволяет решить эту задачу и изучить сложный ударный процесс. С помощью КЭМ становится возможным провести детальные исследования влияния различных технологических параметров на напряженно-деформированное состояние, которое в итоге определяет результат деформационной обработки.

В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрической заготовки из технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ-состоянии, подвергнутой безабразивной ультразвуковой финишной обработке. Так как остаточные напряжения оказывают существенное влияние на усталостные свойства конечных изделий, то особое внимание уделено изучению влияния на их величину и глубину залегания амплитуды колебаний и геометрических параметров индентора.

Постановка задачи и условия проведения моделирования

Для конечно-элементного моделирования БУФО технически чистого титана марки Grade 4 в УМЗ-состоянии использовался программный комплекс «Defom 3D». В целом процесс БУФО — это многократное воздействие на заготовку, и для моделирования полного процесса обработки потребуется большой объем расчетов и, соответственно, значительное время. В связи с этим проводилось моделирование одиночного удара с различными контролируемыми параметрами с последующим разгрузением заготовки в упругопластической постановке задачи. Полученные результаты при разработке и исследовании модели в постановке с одиночным ударом можно будет в дальнейшем применить для проведения моделирования процесса с многократным воздействием индентора.

С помощью программного комплекса твердотельного моделирования «Компас 3D» были созданы модели заготовки и оснастки, показанные на рис. 1. В ходе моделирования проводилась имитация установки заготовки на токарном станке: заготовка 1 одним концом была зафиксирована в патроне 2, а другим — одета на конусную оправку 3. Индентор 4 совершает возвратно-поступательное движение в направлениях, указанных стрелкой.

В качестве постоянной величины, на основе литературных данных [21–24], была принята частота колебаний индентора, равная 22 кГц. Время деформирования при этом составляет 22,7 мкс. Начальная скорость индентора, согласно [25], определяется формулой

$$V_{\text{нач}} = 2Af, \quad (1)$$

где f — частота колебаний индентора, кГц; A — амплитуда его колебаний, мкм.

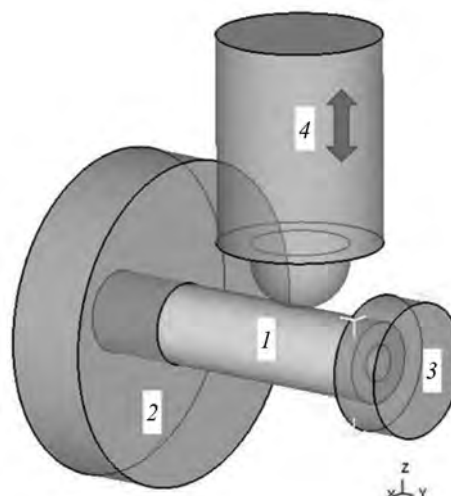


Рис. 1. Сборка 3D-моделей оснастки и заготовки для моделирования процесса БУФО

1 — заготовка; 2 — патрон станка; 3 — конусная оправка; 4 — индентор

Fig. 1. Assembly of 3D-models of tooling and a workpiece for AFUF process simulation

1 — workpiece; 2 — machine tool chuck; 3 — taper arbor; 4 — indenter

Для исследований были выбраны 3 варианта скоростей движения индентора при постоянном времени удара: 1100, 2200 и 3300 мм/с.

В процессе удара установкой БУФО совершается некоторая работа, которая далее преобразуется в кинетическую энергию индентора, а та, в свою очередь, — в энергию деформации: часть энергии затрачивается на трение, а часть — на разогрев. В разработанной конечно-элементной модели индентор совершает 1 цикл возвратно-поступательного движения (в течение 22,7 мкс происходит деформирование) с последующим отведением индентора в обратную сторону, т.е. процессом разгрузки. Моделирование процесса разгрузки необходимо для получения данных по остаточным напряжениям. Время, требуемое для процесса разгрузки, определяли по графику «энергия—время». Согласно полученным данным, время от начала удара до разгрузки (т.е. одного цикла) составило 47,7 мкс.

В реальном процессе на степень проработки оказывается совместное воздействие статической силы прижатия и амплитуды колебаний индентора, и точно разделить их вклад — нетривиальная задача. Исходя из этого было принято решение при моделировании оценивать фактическую величину

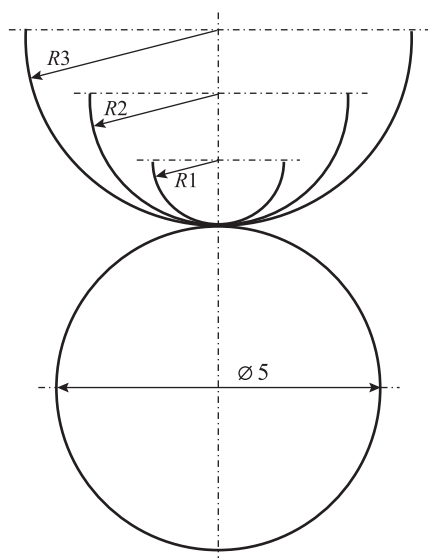


Рис. 2. Вариации радиуса закругления индентора

Fig. 2. Variations of indenter bending radius

внедрения индентора в выбранных временных и скоростных условиях.

Следующим фактором, оказывающим существенное влияние на результат БУФО, являются геометрические характеристики индентора. От формы, размеров, чистоты поверхности индентора зависят такие параметры обработанной поверхности, как напряженно-деформированное состояние, шероховатость, чистота и т.д. В настоящем исследовании был проведен анализ трех вариантов радиуса закругления индентора: $R1 = 1$ мм, $R2 = 2$ мм, $R3 = 3$ мм (рис. 2).

Граничные условия и принятые допущения. Материалом для проведения исследований выбран технически чистый титан марки Grade 4 в УМЗ-состоянии, полученный методом равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К). История деформирования оказывает существенное влияние на конечный результат деформационной обработки. Однако для того, чтобы оценить влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки именно процесса БУФО, было принято решение моделирование предварительной РКУП-К-обработки не проводить, а УМЗ-состояние учесть с помощью кривых упрочнения для материала после такой обработки. Кривые деформационного упрочнения и упругие свойства данного материала заданы на основе литературных данных [26, 27]. Для получения данных по остаточным напряжениям моделирование проводилось

в упругопластической постановке, т.е. материал заготовки в исходном состоянии принят упругопластическим. При этом, исходя из вышесказанного, материал заготовки является изотропным, и в нем отсутствуют начальные напряжения и деформации, а оснастка задана как абсолютно жесткое тело.

Трехмерные твердотельные модели заготовки и оснастки были созданы с помощью системы CAD—КОМПАС-3D и сохранены в формате «stl». Заготовка представляет собой цилиндр длиной 20 мм с диаметром 5 мм. Была сгенерирована сетка конечных элементов с локальным сгущением в области очага деформации (рис. 3). Данное локальное сгущение повышает точность результатов. Конечные элементы представлены в виде тетраэдров — их количество выбиралось исходя из предварительно проведенных расчетов и составило 30 000. Моделирование проводилось с учетом компенсации объема модели заготовки. Модели инструментов на конечно-элементную сетку не разбивали.

Так как проводили моделирование объемной схемы деформации с высокими контактными напряжениями, то был использован фактор трения по Зибелю. На основе литературных данных [28] фактор трения принимали равным 0,3. На контактных поверхностях оснастки было задано условие непроницаемости.

Моделирование осуществлялось 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.

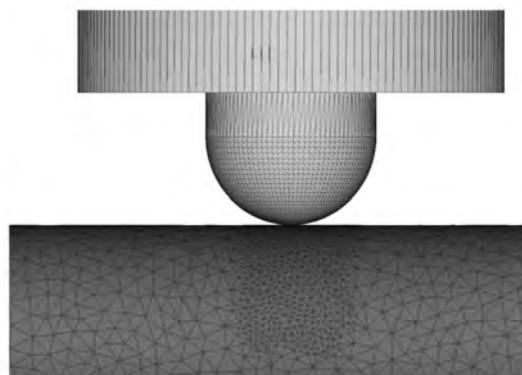


Рис. 3. Конечно-элементная сетка на заготовке

Fig. 3. Finite-element mesh on the workpiece

Результаты моделирования и их обсуждение

Деформированное состояние. На рис. 4 изображено распределение интенсивности деформации (e_i) для варианта обработки с радиусом инструмента $R3$ и амплитудой колебаний индентора $A = 50$ мкм. Здесь и далее приведены амплитуды, рассчитанные по формуле (1), т.е. величины внедрения индентора в заготовку. Распределение является градиентным, с максимальным значением e на поверхности в области касания индентора и в приповерхностном слое. Такое распределение является закономерным и характерным для всех рассмотренных случаев.

Увеличение амплитуды колебаний индентора (скорости) ведет к повышению интенсивности деформации. При большем радиусе индентора происходит увеличение отпечатка, однако при этом уменьшается максимальное значение величины интенсивности деформации. Например, изменение радиуса с 1 до 3 мм для амплитуды $A = 75$ мкм приводит к снижению e в 1,8 раза. Это можно объяснить тем, что в случае применения индентора с меньшим радиусом площадь воздействия соответственно меньше, а величина интенсивности напряжений при одной и той же амплитуде больше, так при уменьшении радиуса с 3 до 1 мм величина интенсивности напряжений растет с 1150 до 1300 МПа.

Как видно из рис. 5, максимальные величины e_i наблюдаются для варианта с радиусом 1 мм ($R1$)

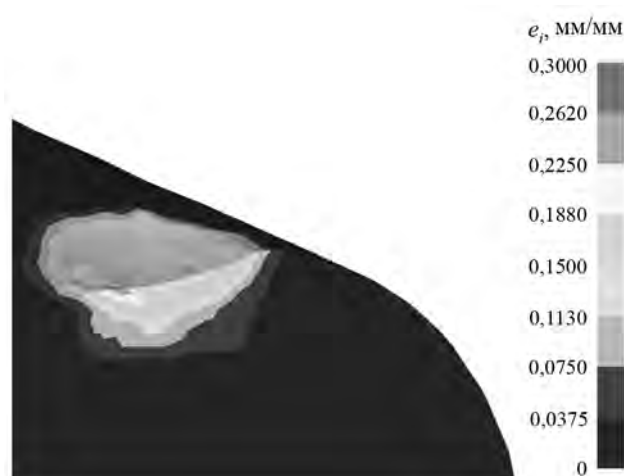


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации (e_i) для случая $R3$ и $A = 75$ мкм

Fig. 4. Deformation intensity (e_i) distribution for case $R3$ and $A = 75$ μm

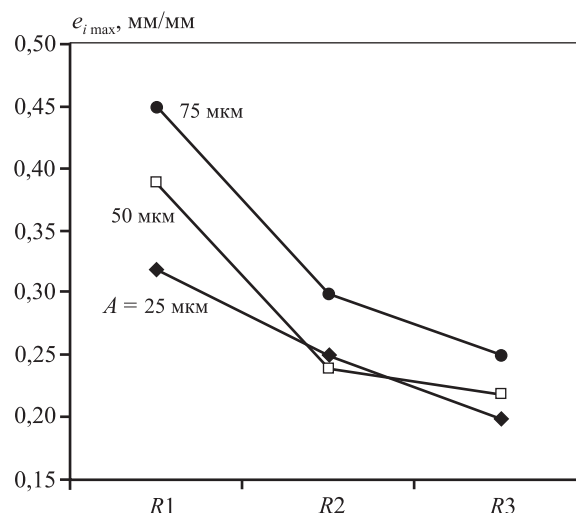


Рис. 5. Зависимость максимальных значений интенсивности деформации ($e_{i \max}$) от радиуса инструмента при разных амплитудах колебания индентора

Fig. 5. Maximum deformation intensity values ($e_{i \max}$) as a function of tool radius at different indenter oscillation amplitudes

и достигают значений $e_i = 0,45$ при амплитуде индентора 75 мкм. Стоит отметить, что увеличение радиуса инструмента ведет к снижению разницы между максимальными значениями интенсивности деформации для разных величин амплитуды колебаний. Так, при радиусе $R1$ разница между значениями e_i для $A = 25$ и 75 мкм составляет порядка 30 %, при $R3$ она равна 20 %, а в случае $R2$ и $R3$ для $A = 25$ и 50 мкм разницы практически не наблюдается.

Напряженное состояние. Для оценки напряженного состояния рассматривались следующие параметры: среднее нормальное напряжение, остаточные радиальные напряжения и глубина их залегания.

Среднее нормальное напряжение. Данный показатель характеризует схему напряженного состояния в момент удара. Так, в случае преобладания сжимающих напряжений схема считается «мягкой», с меньшей вероятностью образования дефектов, а преобладающие растягивающие напряжения, наоборот, характеризуют схему как «жесткую», с большей вероятностью дефектов или даже разрушения заготовки в процессе обработки.

На рис. 6 представлено распределение среднего нормального напряжения в очаге деформации при БУФО ($R3$, $A = 75$ мкм). Данное распределение характерно для всех проанализированных случаев,

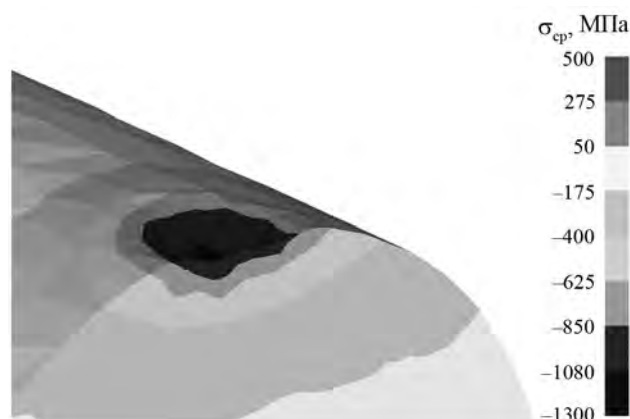


Рис. 6. Распределение среднего нормального напряжения ($\sigma_{ср}$) в поперечном сечении заготовки для случая R3 и $A = 75$ мкм

Fig. 6. Average normal stress (σ_{av}) distribution across the workpiece cross section for case R3 and $A = 75$ μm

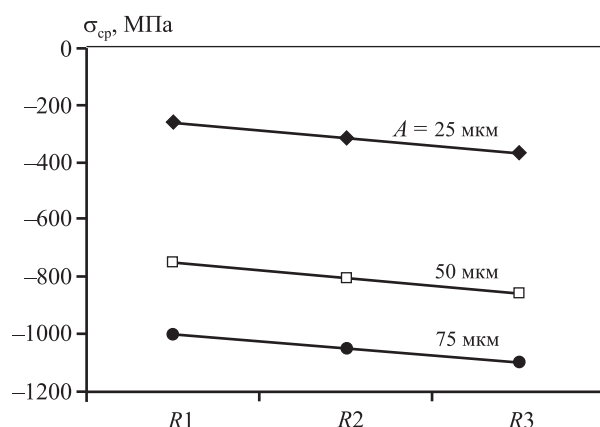


Рис. 7. Зависимость среднего нормального напряжения ($\sigma_{ср}$) от радиуса инструмента при разных амплитудах колебаний индентора

Fig. 7. Average normal stress (σ_{av}) as a function of tool radius at different indenter oscillation amplitudes

преобладающими являются сжимающие напряжения. Объяснить это можно тем, что фактически реализуется схема осадки. Вокруг отпечатка при этом наблюдается растягивающее напряжение, однако оно незначительно по величине и существенного влияния на процесс обработки не оказывает. Увеличение амплитуды колебаний закономерно повышает необходимую силу, а соответственно, и уровень напряжения. Некоторую роль играет величина радиуса инструмента, так как определяет площадь, и ее увеличение также ведет к повышению напряжения. Согласно полученным данным (рис. 7), максимальные сжимающие напряжения

характерны для амплитуды 75 мкм и достигают 1000—1100 МПа. Таким образом, вне зависимости от радиуса инструмента и амплитуды колебаний индентора схема напряженного состояния при БУФО является «мягкой».

Остаточные радиальные напряжения и глубина их залегания. Одной из наиболее важных характеристик поверхностного слоя изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, являются остаточные напряжения — напряжения, действующие в изделии после любых видов механического и термического воздействия. В случае цилиндрических деталей обычно используются понятия осевых, окружных и радиальных остаточных напряжений. Остаточные напряжения оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей. Сжимающие остаточные напряжения повышают характеристики сопротивления усталости деталей, растягивающие — наоборот, снижают [20, 29, 30]. Для оценки эффективности упрочняющей обработки в настоящей работе ограничимся сравнительными исследованиями радиальных остаточных напряжений.

На рис. 8 показано распределение радиальных остаточных напряжений в поперечном сечении заготовки для R3 и $A = 50$ мкм.

Моделирование показывает, что радиальные остаточные напряжения в области очага деформации — преимущественно сжимающие, их значения с возрастанием амплитуды колебаний увеличива-



Рис. 8. Глубина залегания и распределение радиальных остаточных напряжений (σ_r) в поперечном сечении заготовки для R3 и $A = 50$ мкм

Fig. 8. Depth of occurrence and residual stress (σ_r) distribution across the workpiece cross section for R3 and $A = 50$ μm

ются. Формирование сжимающих напряжений, как и в случае среднего нормального напряжения, можно связать с реализацией схемы осадки. Вокруг отпечатка также наблюдаются растягивающие напряжения, однако в случае остаточных напряжений в условиях многократного воздействия индентора они могут оказать влияние на конечный результат. Как видно из данных рис. 9, и величина радиуса инструмента, и амплитуда его колебаний в случае остаточных напряжений оказывают существенное влияние на итоговую величину напряжений. Вероятно, это связано с тем, что величина напряжений в ходе нагружения (обработки) определяет процесс релаксации, и зависимость при этом не является линейной. Максимальные значения наблюдаются в случае амплитуды колебаний, равной 75 мкм, и достигают 540 МПа (см. рис. 9).

Исследования показали, что с увеличением радиуса инструмента, т.е. фактически с расширением площади контакта величина остаточных радиальных напряжений возрастает. Стоит обратить внимание на то, что величина интенсивности напряжений ведет себя наоборот, т.е. снижается с увеличением радиуса индентора, что требует дополнительных исследований. Разница при этом довольно существенна и может достигать более 2 раз. Из картины распределения радиальных остаточных напряжений (см. рис. 8) видно что оно градиентное, с максимальными значениями σ_r под индентором с дальнейшим уменьшением к центру заготовки. Данная картина характерна для всех рассмотренных случаев. Глубина залегания

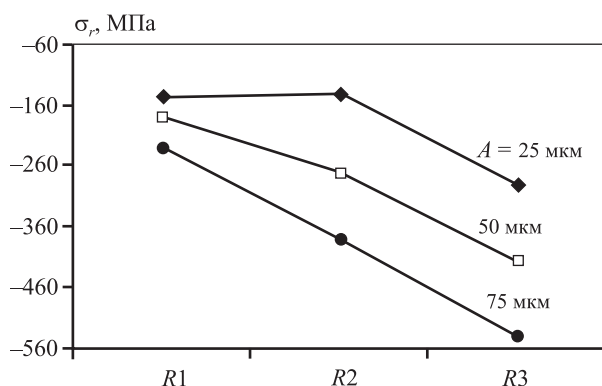


Рис. 9. Зависимость радиальных остаточных напряжений (σ_r) от радиуса инструмента при разных амплитудах колебаний индентора

Fig. 9. Radial residual stresses (σ_r) as a function of tool radius at different indenter oscillation amplitudes

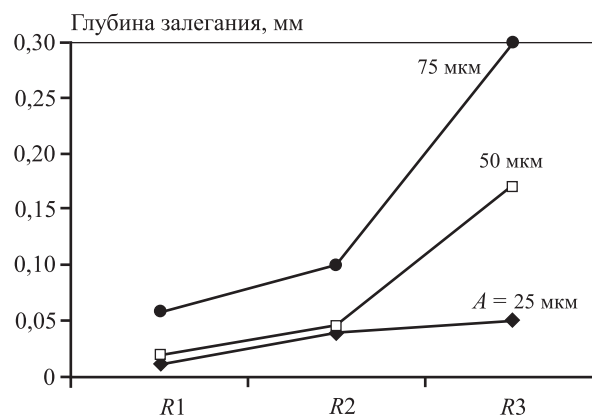


Рис. 10. Зависимость глубины залегания радиальных остаточных напряжений от радиуса инструмента при разных амплитудах колебаний индентора

Fig. 10. Depth of radial residual stress occurrence as a function of tool radius at different indenter oscillation amplitudes

(рис. 10) также зависит и от радиуса индентора. Так, в случае R1 и R2 разница глубины залегания составляет порядка 2 раз, в то время как между R2 и R3 разница достигает уже 3 раз.

Заключение

Методом конечно-элементного компьютерного моделирования проведено исследование напряженно-деформированного состояния очага деформации заготовки из технически чистого титана марки Grade 4 в процессе безабразивной ультразвуковой финишной обработки при воздействии индентора с амплитудой колебаний 25–75 мкм и радиусами закругления 1–3 мм. Установлено, что с увеличением радиуса индентора уменьшается значение интенсивности деформации ϵ_i . Характер распределения показателя ϵ градиентный, с уменьшением значений от поверхности к центру заготовки. Максимальные величины ϵ_i наблюдаются для варианта с радиусом 1 мм и достигают значений 0,45 при глубине проработки 75 мкм.

Схема напряженного состояния при БУФО является «мягкой», т.е. преобладающими в очаге деформации являются сжимающие напряжения. Согласно полученным данным, максимальные сжимающие напряжения наблюдаются в случае амплитуды колебаний, равной 75 мкм, и достигают 1000–1100 МПа.

Анализ результатов моделирования показывает, что радиальные остаточные напряжения

в области очага деформации преимущественно сжимающие и, соответственно позволяют увеличить сопротивление усталости готового изделия. Установлено, что с ростом амплитуды колебаний индентора увеличиваются и значения сжимающих радиальных остаточных напряжений. Максимальные значения достигают 540 МПа при $A = 75$ мкм. Глубина залегания этих напряжений при этом составляет 0,3 мм. Увеличение радиуса индентора, т.е. фактически площади контакта, ведет к повышению величины сжимающих радиальных остаточных напряжений, причем практически линейно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00124, <https://rscf.ru/project/21-79-00124/>

Acknowledgments. The research was funded by Grant of the Russian Science Foundation No. 21-79-00124, <https://rscf.ru/project/21-79-00124/>

Литература/References

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002.
Terentiev V.F. Fatigue of materials. Moscow: Nauka, 2002 (In Russ.).
2. Brunette D.M., Tengvall P., Textor M., Thomsen P. Titanium in medicine. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
3. Elias C.N., Lima J.H.C., Valiev R., Meyers M.A. Bio-medical applications of titanium and its alloys. *JOM*. 2008. Vol. 60. P. 46–49. DOI: 10.1007/s11837-008-0031-1.
4. Lowe T., Valiev R.Z. Investigations and applications of severe plastic deformation: NATO Science Partnership Subser. 3. Springer Science & Business Media, 2000.
5. Zehetbauer M.J., Valiev R.Z. Nanomaterials by severe plastic deformation. John Wiley & Sons, 2006.
6. Segal V.M. Materials processing by simple shear. *Mater. Sci. Eng. A*. 1995. Vol. 197. P. 157–164.
7. Эрдеди А.А., Медведев Ю.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика: Теоретическая механика. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1991.
Erdedi A.A., Medvedev Yu.A., Erdedi N.A. Technical mechanics: Theoretical mechanics. Strength of materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1991 (In Russ.).
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
Fedchishin O.V., Trofimov V.V., Klimenov V.A. Effect of ultrasonic treatment on the structure and physical and mechanical properties of titanium VT1-0. Sibirskii Meditsinskii Zhurnal. 2009. No. 6. P. 189–192 (In Russ.).
12. 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.
13. 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.
14. Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов — технология XXI века. *Металлообработка*. 2002. No. 4. С. 46–48.
Kholopov Yu.V. Non-abrasive ultrasonic finishing of metals — technology of the 21st century. Metalloobrabotka. 2002. No. 4. P. 46–48 (In Russ.).
15. 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.
Alexandrov M.K., Papsheva N.D., Akushskaya O.M. Ultrasonic hardening of GTD parts. Bulletin of Samara State Aerospace University. 2011. No. 3 (27). P. 271–276 (In Russ.).
16. Козлов Э.В., Громов В.Е., Коваленко В.В., Попова Н.А. Градиентные структуры в перлитной стали. Новокузнецк: СибГИУ, 2004.
Kozlov E.V., Gromov V.E., Kovalenko V.V., Popova N.A. Gradient structures in pearlitic steel. Novokuznetsk: SibGIU, 2004 (In Russ.).
17. 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.

- Ivanov Yu.F., Efimov O.Yu., Popova N.A., Kovalenko V.V., Konovalov S.V., Gromov V.E., Kozlov E.V. Formation of gradient structural-phase states at the nanoscale level in rolling rolls. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2008. No. 4. P. 55–58 (In Russ.).
18. Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients. *Science*. 2014. Vol. 345. P. 1455–1456.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. Aleš Z., Pavlík 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.
 23. 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. СХУ им. В. Даля*. 2010. Т. 152. No. 10. С. 117–121.
Klimenov V.A., Kovalevskaya Zh.G., Kaminskii P.P., Sharkeev Yu.P., Lotkov A.I. Ultrasonic surface treatment — a promising way to increase the service life of railway transport parts. *Bull. Dahl Nat. Res. Univ.* 2010. Vol. 152. No. 10. P. 117–121 (In Russ.).
 24. Ковалевская Ж.Г., Иванов Ю.Ф., Первалова О.Б., Клименов В.А., Уваркин П.В. Исследование микроструктуры поверхностных слоев малоуглеродистой стали после точения и ультразвуковой финишной обработки. *Физика металлов и металловедение*. 2013. Т. 114. No. 1. С. 47–60.
Kovalevskaya Zh.G., Ivanov Yu.F., Perevalova O.B., Klimenov V.A., Uvarkin P.V. Investigation of microstructure of surface layers of low-carbon steel after turning and ultrasonic finishing. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2013. Vol. 114. No. 1. P. 47–60 (In Russ.).
 25. Chao Guo, Wang Zhijiang, Wang Dongpo, Hu Shengsun. Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models. *Appl. Surf. Sci.* 2015. Vol. 347. P. 596–601.
 26. Gunderov D.V., Polyakov A.V., Churakova A.A., Semenova I.P., Raab G.I., Valiev R.Z., Gemaletdinova E., Sabirov I., Segurado J., Sitdikov V.D., Alexandrov I.V., Enikeev N.A. Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-Conform. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. Vol. 562. P. 128–136. DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.007.
 27. Sibum H., Güther V., Roidl O., Habashi F., Uwe H., Wolf H., Siemers C. Titanium, titanium alloys, and titanium compounds. In: *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. 2017. P. 1–35.
 28. Meier L., Schaal N., Wegener K. In-process measurement of the coefficient of friction on titanium. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 58. P. 163–168.
 29. Morikage Y., Igi S., Oi K., Jo Y., Murakami K., Gotoh K. Effect of compressive residual stress on fatigue crack propagation. *Procedia Eng.* 2015. Vol. 130. P. 1057–1065.
 30. Kodama S., Misawa H., Ohsumi K. Compressive residual stress on fatigue fractured surface. In: *Int. Conf. on residual stresses*. Dordrecht: Springer, 1989.