УДК 532.66:532.528: 621.923
DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-10

Н. П. Симонов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ С НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Функциональные характеристики деталей машин во многом определяются свойствами их поверхности. Особую роль играет дефектная структура поверхности, которая в большинстве случаев является причиной усталостного разрушения металла. В этой связи задача разработки технологий модифицирования дефектной структуры поверхности деталей становится весьма актуальной. Цель данной работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании возможности использования наномодифицированной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в условиях развития кавитации как упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

Материалы и методы. Для расчета времени схлопывания кавитационного пузырька использовалось уравнение Нолтинга – Непайреса. Расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин (МТ) за счет действия кумулятивной струи, выполнен с использованием закона сохранения энергии. Расчет эффективного модуля Юнга поверхностного слоя металла выполнен с помощью формулы, полученной путем модификации формулы для модуля Юнга пористого материала. Для экспериментальных исследований влияния наномодифицированной СОЖ на характеристики поверхности использовались лопатки турбокомпрессора, материал образцов – сплав ЖС6К. Обработка образцов проводилась на плоскошлифовальном станке высокопористыми кругами.

Результаты. В приближении несжимаемой жидкости и в пренебрежении вязкими потерями получена аналитическая формула для времени схлопывания кавитационного пузырька. Показано, что время схлопывания кавитационного пузырька зависит от частоты вибрации, радиуса пузырька, плотности СОЖ, амплитуды колебаний давления в жидкости, а также от декремента затухания. С учетом выявленных ограничений на приведенные параметры установлено, что наиболее эффективной с точки зрения влияния кумулятивной струи является величина времени схлопывания $\geq 10^{-8}$ с. Получена аналитическая формула для расчета числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин за счет действия кумулятивной струи. Проведена оценка числа наночастиц, оказавшихся в МТ; показано, что эта величина существенно зависит от времени схлопывания кавитационного пузырька и геометрических параметров МТ. Получена аналитическая формула для эффективного модуля Юнга поверхностного слоя металла. Показано, что эффективный модуль Юнга является функцией числа наночастиц, попавших в канал МТ, а также размера наночастиц и МТ. Проведенная оценка показала, что эффективный модуль Юнга в зависимости от величины времени схлопывания кавитационного пузырька может превышать свою начальную величину примерно на порядок. Выявлено качественное соответствие теоретических результатов результатам эксперимента: при использовании СОЖ с наночастицами Ni при шлифовании образцов лопатки турбокомпрессора было достигнуто снижение шероховатости поверхности по параметру R_a на 10 % и повышение микротвердости поверхности более чем на 20 %.

Выводы. Путем использования кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности в процессе финишной обработки можно обеспечить требуемые прочностные характеристики поверхностного слоя металла.

Ключевые слова: кавитационная технология, наномодифицированная смазочно-охлаждающая жидкость, время схлопывания кавитационного пузырька, наночастицы металла, эффективный модуль Юнга поверхностного слоя металла, шероховатость, микротвердость.

N. P. Simonov

APPLYING THE CAVITATION TECHNOLOGY WITH NANOMODIFIED LUBRICANT-COOLING LIQUID TO INCREASE THE STRENGTH OF THE SURFACE LAYER WHEN FINISHING CONSTRUCTIONAL MATERIALS

Background. The functional characteristics of machine parts are largely determined by the properties of their surface. A special role is played by the defective structure of the surface, which in most cases is the cause of the fatigue failure of metal. In this regard, the task of developing technologies for modifying the defective structure of the surface of parts becomes very urgent. The aim of this work is to theoretically and experimentally substantiate the possibility of using nanomodified cutting fluid in the conditions of cavitation development as a strengthening technology for the formation of wear-resistant surface layers.

Materials and methods. To calculate the time of the collapse of the cavitation bubble, the Nolting-Nepires equation was used. The calculation of the number of metal nanoparticles falling into the channels of microcracks (MC) due to the action of the cumulative jet was performed using the energy conservation law. The calculation of the effective Young's modulus of the surface layer of metal was performed using the formula obtained by modifying the formula for the Young's modulus of a porous material. For experimental studies of the effect of nanomodified coolant on the surface characteristics, turbocharger blades were used, the sample material was ZhS6K alloy. The samples were processed on a surface grinding machine with highly porous circles.

Results. In the approximation of an incompressible fluid and neglecting viscous losses, an analytical formula has been obtained for the time of collapse of a cavitation bubble. It is shown that the collapse time of a cavitation bubble depends on the vibration frequency, bubble radius, coolant density, amplitude of pressure fluctuations in the liquid, and also on the damping decrement. Taking into account the identified limitations on the given parameters, it was found that the collapse time $\geq 10^{-8}$ c is most effective from the point of view of the influence of the cumulative jet. An analytical formula has been obtained for calculating the number of metal nanoparticles falling into the channels of microcracks due to the action of a cumulative jet. The number of nanoparticles trapped in MCs was estimated; it is shown that this value substantially depends on the time of collapse of a cavitation bubble and the geometric parameters of MCs. An analytical formula has been obtained for the effective Young's modulus of the metal surface layer. It is shown that the effective Young's modulus is a function of the number of nanoparticles entering the MC channel, as well as the size of the nanoparticles and MCs. The assessment showed that the effective Young's modulus, depending on the value of the time of collapse of a cavitation bubble, could exceed its initial value by about an order of magnitude. A qualitative agreement was found between theoretical results and experimental results: when using coolant with Ni nanoparticles when grinding samples of a turbocompressor blade, a 10% decrease according to R_a parameter in surface roughness and an increase in surface microhardness by more than 20% were achieved.

Conclusions. By using cavitation technologies to modify the defective structure of the surface during finishing, it is possible to provide the required strength characteristics of the surface layer of metal.

Keywords: cavitation technology, nano-modified cutting fluid, time of collapse of a cavitation bubble, metal nanoparticles, effective Young's modulus of the surface metal layer, roughness, microhardness.

Введение

Важной задачей современного машиностроения является обеспечение надежности, долговечности и стабильности устройств и узлов машин разного назначения. Известно [1], что функциональные характеристики деталей определяются свойствами их поверхности. В этой связи становится актуальной разработка технологий поверхностного модифицирования конструкционных материалов. Особое внимание привлекает дефектная структура поверхности, которая при определенных условиях может служить причиной усталостного разрушения металла. Основными дефектами поверхностного слоя являются микротрещины (МТ), инородные включения, повышенная пористость и т.д. В настоящее время активно используются такие методы управления свойствами поверхности, как нанесение покрытий, легирование поверхности и модификация структуры поверхностного слоя [1].

Недавно нами был предложен кавитационный механизм управления качеством поверхностного слоя ферритовых деталей при использовании смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) с нанодобавками в условиях звукокапиллярного эффекта [2]. Основной целью было продемонстрировать возможность целенаправленного снижения хрупкости поверхностного слоя при финишной обработке ферритовых деталей. Было показано [2], что в случае достаточно плотной регулярной цепочки МТ эффективный модуль Юнга поверхностного слоя ферритовых деталей определяется в основном модулем Юнга материала наночастиц в СОЖ, что дает возможность изменять хрупкость поверхностного слоя за счет подбора необходимого материала для наночастиц. В настоящей работе решается задача об упрочнении поверхностного слоя металла путем использования кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности в процессе финишной обработки конструкционного материала. Цель данной работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании возможности использования наномодифицированной СОЖ в условиях развития кавитации как упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

1. Механизм влияния наномодифицированной СОЖ в условиях образования кавитационных пузырьков

Кавитация играет важную роль в эффекте проникновения наномодифицированной СОЖ в каналы МТ. Кавитация может быть реализована в среде СОЖ за счет ударного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью, в результате чего образуются импульсные волны напряжений, которые распространяются по абразивным зернам, а затем передаются в жидкость. Вследствие этого в зоне обработки технологическая жидкость совершает колебательные движения, что способствует развитию кавитационных процессов. Схлопывание кавитационных пузырьков вблизи поверхностного слоя приводит к образованию кумулятивных струй, которые стимулируют проникновение технологической жидкости с наночастицами в каналы МТ (рис. 1).

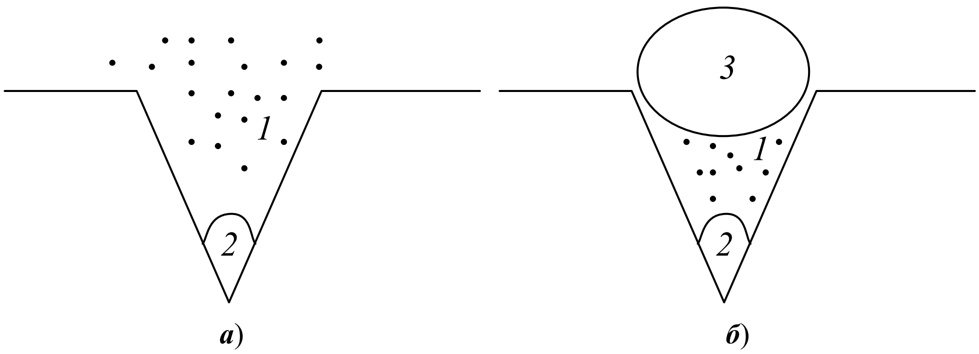

Рис. 1. Схематическое изображение канала МТ на поверхности металла: ***а*** – канал МТ, заполненный СОЖ (*1*) за счет капиллярного эффекта до начала развития кавитации, *2* – воздушный пузырек; ***б*** – канал МТ с кавитационным пузырьком *3*

В результате МТ поверхностного слоя металла заполняются наночастицами, что приводит к изменению эффективного модуля Юнга поверхности. Как известно [3], наномодифицированные технологические жидкости значительно понижают коэффициент трения в зоне обработки, соответственно понижают тангенциальную силу шлифования, в результате возрастает эффективность процесса шлифования. Как будет показано ниже, использование наномодифицированной СОЖ в сочетании с кавитационными процессами может составить основу упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

2. Расчет времени схлопывания кавитационного пузырька

Время схлопывания кавитационного пузырька t_c – это фактически время действия кумулятивной струи у устья МТ, поэтому расчет t_c является достаточно актуальным для рассмотрения баланса энергий между СОЖ и кавитационным пузырьком.

Рассмотрим уравнение Нолтинга – Непайреса, описывающее пульсации кавитационного пузырька [4]:

$$R\cdot\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2+\frac{1}{\rho_0}\left(p_0-p_{vap}+\frac{2\sigma}{R}+p_m\sin\omega t-\right.$$

$$\left.-\left(p_0-p_{vap}+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\cdot\left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3\gamma}\right)=0, \qquad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; давление внутри пузырька складывается из давления газа и давления пара p_{vap}; $2\sigma/R$ – капиллярное давление Лапласа, которое оказывает искривленная поверхность пузырька на имеющийся в нем газ; γ – показатель адиабаты; R_0 – радиус пузырька; ω – частота вибраций; p_m – амплитуда колебаний давления в жидкости; p_0 – атмосферное давление; ρ_0 – плотность жидкости.

Как показывают оценки [4], во многих случаях давлением пара и поверхностным натяжением можно пренебречь, тогда уравнение (1) упрощается:

$$R\cdot\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2+\frac{1}{\rho_0}\left[p_m\sin\omega t+p_0\cdot\left(1-\left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3\gamma}\right)\right]=0. \qquad (2)$$

Уравнение (2) получено также в пренебрежении сжимаемостью жидкости и вязкими потерями. Дальнейшее упрощение, связанное с пренебрежением нелинейными членами, приводит уравнение к виду [4]:

$$\ddot{x}+\omega_0^2 x=-\frac{p_m}{\rho_0 R_0}\sin\omega t, \qquad (3)$$

где $\omega_0=\frac{1}{2\pi R_0}\sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_0}}$ – резонансная частота; $x=R-R_0$.

Уравнение (3) хорошо известно, оно описывает вынужденные линейные колебания системы в бездиссипативной среде.

Решение уравнения (3) можно представить в виде

$$x(t)=-\frac{p_m}{\rho_0 R_0}\cdot\frac{\sin(\omega t+\varphi)}{\omega_0^2\sqrt{(1-\Omega^2)^2+(\delta\cdot\Omega)^2}}, \qquad (4)$$

где $\Omega=\omega/\omega_0$; $\operatorname{tg}\varphi=-\delta\cdot\Omega/(1-\Omega^2)$; δ – декремент затухания.

Продифференцируем обе части (4) по времени:

$$\frac{dx}{dt}=-\frac{p_m}{\rho_0 R_0}\cdot\frac{\omega\cdot\cos(\omega t+\varphi)}{\omega_0^2\sqrt{(1-\Omega^2)^2+(\delta\cdot\Omega)^2}}; \qquad (5)$$

пусть $y=x/R_0$, тогда

$$R_0 dy = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}} dt. \qquad (6)$$

Проинтегрируем обе части (6):

$$R_0 \int_0^{-1} dy = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}} \int_0^{t_c} \cos(\omega t + \varphi)\, dt,$$

в результате для t_c получим

$$t_c = \frac{1}{\omega} \arcsin\left[\frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0}{p_m} \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2} + \sin\varphi\right] - \frac{\varphi}{\omega}. \qquad (7)$$

Оценка величины t_c при следующих значениях параметров, входящих в (7): $R_0 = 10^{-6}$ м, $p_0 = 10^5$ Па, $\rho_0 = 10^3$ кг/м^3, $\gamma = 1{,}4$, $\delta = 0{,}1$, дает $t_c \approx 10^{-8}$ с, при этом приведенные параметры связаны ограничением вида

$$\left| \frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0 \delta}{p_m} \Omega + \sin\varphi \right| \le 1. \qquad (8)$$

3. Расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин за счет действия кумулятивной струи

Необходимо отметить, что процесс образования кавитационных пузырьков носит случайный характер. В этой связи на первом этапе обработки поверхности металла каналы МТ заполняются СОЖ за счет капиллярного эффекта, а затем, по мере развития кавитационного процесса, срабатывает «эффект кумулятивных струй». Используя закон сохранения энергии, выполним расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы МТ:

$$W = E_K + A_C, \qquad (9)$$

где $W = 4\pi R_{\max}^3 \cdot p_o / 3$ – средняя энергия, запасенная в кавитационном пузырьке; $R_{\max}$ – максимальный радиус кавитационного пузырька; A_C – работа сил трения в процессе проникновения наночастиц металла в каналы МТ: $A_C = \mu \rho_{\text{Н}} g L_{\text{МТ}}$, здесь μ – коэффициент трения; $\rho_{\text{Н}}$ – плотность материала наночастиц; $L_{\text{МТ}}$ – средняя длина МТ; E_K – кинетическая энергия струи СОЖ:

$$E_K = N_{\text{Н}} \rho_{\text{Н}} \frac{4}{3} \pi r_{\text{Н}}^3 \frac{v^2}{2},$$

здесь $N_{\text{Н}}$ – число наночастиц, попавших в канал МТ; $r_{\text{Н}}$ – средний радиус наночастицы; v – средняя скорость струи СОЖ: $v = L_{\text{МТ}} / t_c$.

В результате для $N_{\text{Н}}$ получим

$$N_{\text{Н}} = \frac{8R_{\max}^3 \cdot p_o - \rho_0 L_{\text{МТ}}^3 \left(r_0 / t_c\right)^2}{8r_{\text{Н}}^3 \left(\frac{1}{2}\rho_{\text{Н}} \cdot \left(\frac{L_{\text{МТ}}}{t_c}\right)^2 + \mu\rho_{\text{Н}} g L_{\text{МТ}} \right)}. \tag{10}$$

Формула (10) справедлива при выполнении неравенства

$$t_c \geq r_0 \sqrt{\frac{\rho_0 L_{\text{МТ}}^3}{8R_{\max}^3 p_0}},$$

где r_0 – радиус устья МТ; ρ_0 – плотность СОЖ.

Оценка величины $N_{\text{Н}}$ при следующих значениях входящих в (10) параметров: $R_{\max} = 10^{-6}$ м, $p_0 = 10^5$ Па, $r_{\text{Н}} = 5 \cdot 10^{-8}$ м, $t_c = 10^{-8}$ с, $\mu = 0{,}2$, $L_{\text{МТ}} = 10^{-6}$ м, $\rho_{\text{Н}} = 8900$ кг/м^3, – дает $N_{\text{Н}} \approx 16$, в то время как оценка при плотной упаковке дает $(N_{\text{Н}})_{\max} = V_{\text{МТ}} / V_n \approx 20$, V_n – объем одной наночастицы, $V_n \approx 5 \cdot 10^{-22}$ м^3, $V_{\text{МТ}} \approx 10^{-20}$ м^3.

Величина t_c ограничена сверху: $\omega t_c \ll 1$, где ω – частота вибраций. Действительно, за время, меньшее периода вибраций, кавитационный пузырек должен успеть схлопнуться.

4. Расчет эффективного модуля Юнга

Следует отметить, что эффективный модуль Юнга поверхностного слоя металла $E_{\text{эф}}$ является, вообще говоря, функцией числа $N_{\text{Н}}$ наночастиц, осевших в каналах МТ. Воспользовавшись формулой для модуля Юнга пористого материала [5], можно получить качественную зависимость $E_{\text{эф}}(N_{\text{Н}})$:

$$\frac{E_{\text{эф}}}{E_1} = \frac{4r_{\text{Н}}^3}{r_0^2 L_{\text{МТ}}} \cdot N_{\text{Н}} \cdot \left(1 - \frac{16u_0}{\pi N_{\text{МТ}}}\right) + \frac{16u_0}{\pi N_{\text{МТ}}}, \tag{11}$$

где r_0 – радиус основания МТ (геометрическая форма МТ моделируется конусом с высотой равной $L_{\text{МТ}}$ и радиусом основания r_0); E_1 – модуль Юнга в объеме конструкционного материала; u_0 – дисперсия расстояния между МТ; $N_{\text{МТ}}$ – число МТ на поверхности металла.

Из формул (11) и (10) видна существенная зависимость $E_{\text{эф}}$ от времени схлопывания кавитационного пузырька t_c. Поскольку, в свою очередь, t_c зависит от параметров вибрации (p_m и ω), то появляется возможность для управления временем схлопывания кавитационного пузырька, и, следовательно, эффективным модулем Юнга поверхностного слоя металла. Действительно, оценка величины $E_{\text{эф}} / E_1$ для $t_c = n \cdot 10^{-8}$ с дает $E_{\text{эф}} / E_1 \approx 0{,}8$ при $n = 1$ и $E_{\text{эф}} / E_1 \approx 64{,}8$ при $n = 81$.

Таким образом, варьируя t_c, можно управлять такими характеристиками поверхности металла, как шероховатость (за счет заполнения наночастицами металла пор и микровпадин) и микротвердость H (за счет изменения эффективного модуля Юнга) [6]:

$$H = K_1\sqrt{\frac{E\gamma}{d}} + K_2\frac{Gb}{d_0} + K_3\sqrt{\frac{2E\gamma}{L}} + K_4\gamma, \qquad (12)$$

где G – модуль сдвига; γ – свободная поверхностная энергия; b – вектор Бюргерса; d, d_0 – межатомное расстояние и расстояние между атомами в соседних плоскостях сдвига; L – критический размер МТ; K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты пропорциональности.

Так как $b \sim 10^{-9}$ м, $d \sim 10^{-10}$ м, $L_{\text{МТ}} \sim 10^{-6}$ м, то наибольший вклад в величину H даст первое слагаемое, тогда

$$H \approx K_1\sqrt{\frac{E\gamma}{d}}. \qquad (13)$$

С учетом (12) получим

$$\frac{H_2}{H_1} \approx \sqrt{\frac{E_{\text{эф}}}{E_1}}, \qquad (14)$$

где H_1 – микротвердость поверхностного слоя металла до обработки; H_2 – микротвердость после модифицирования дефектной структуры поверхностного слоя в процессе обработки с применением наномодифицированной СОЖ.

Оценка величины H_2 / H_1 при тех же значениях параметров, что и выше, дает $H_2 / H_1 \approx 0{,}9$ при $n = 1$ и $H_2 / H_1 \approx 8{,}5$ при $n = 81$.

5. Эксперимент

Для проверки полученных теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования.

Для формирования кавитационных пузырьков в среде наномодифицированной СОЖ применялась обработка шлифованием с применением наномодифицированной СОЖ. Модифицирование СОЖ проводилось путем добавления в ее состав наночастиц хрома. Концентрация наночастиц составляла 200 на 1 л раствора. Обработке подвергались металлические пластины – образцы плоской формы размерами 25×25×3 мм, которые вырезались из лопаток турбокомпрессора турбонагнетателя ТК 34. Материал образцов – сплав ЖС6К. Обработка образцов проводилась на плоскошлифовальном станке высокопористыми кругами ПП(1) 250×32×76 25А 40 ВМ2 12 К 50 класса точности А, 1 кл.

Оценка качества поверхности проводилась посредством измерения следующих характеристик:

– шероховатость поверхности;
– микротвердость поверхности;

– количество микротрещин, приходящееся на единицу площади поверхности.

Шероховатость поверхности образцов измеряли при помощи профилометра-профилографа «Сейтроник ПШ8–4».

Микротвердость поверхности образцов измеряли при помощи микротвердомера модели HMV-G21DT (Shimadzu, Япония).

Количество микротрещин, приходящихся на единицу площади поверхности, оценивалось при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN при 921-кратном увеличении. Под микротрещиной (МТ) понималась трещина, имеющая величину раскрытия в диапазоне 0,1–10,0 мкм и длину 5–100 мкм. При подсчете отдельно взятой МТ ее границами признавались места разрыва в поверхностном слое материала либо места ветвления. Схема подсчета количества МТ представлена на рис. 2.

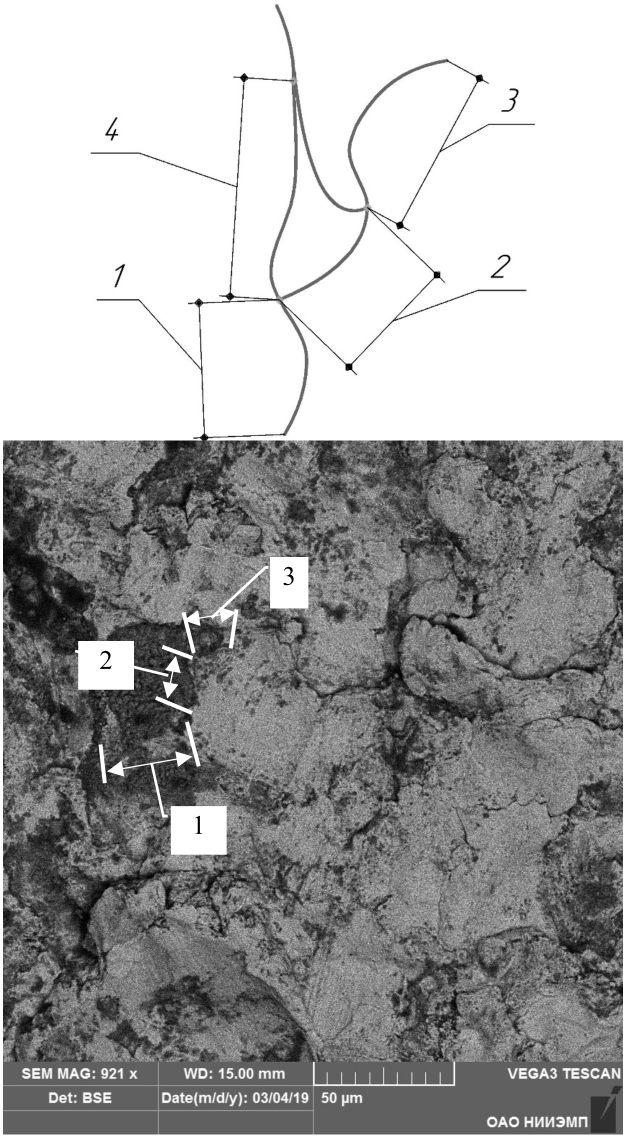

Рис. 2. Схема подсчета количества микротрещин на поверхности образца

Перед проведением экспериментальных исследований была выполнена серия предварительных расчетов с целью проверки характера распределения параметров шероховатости и микротвердости готовых деталей на основе значений, полученных ранее лабораторией АО «Пензадизельмаш». Для обеспечения репрезентативности был выбран метод механической выборки с шагом 10 единиц. Поскольку объем выборки составил 31 единицу, то для проверки нормального характера распределения использовали критерий Шапиро – Уилка.

На основании полученных результатов по формуле был определен минимальный объем выборки $n_{\min Ra}$ и $n_{\min HV}$, равный 5:

$$n_{\min} = \frac{Nt^2\sigma^2}{N\Delta_{\bar{x}}^2 + t^2\sigma^2}, \qquad (15)$$

где $n_{\min}$ – минимальный объем выборки; N – генеральная совокупность; t – коэффициент доверия; σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины; $\Delta_{\bar{x}}^2$ – предельная ошибка выборочной средней.

Полученные значения шероховатости, микротвердости и количества микротрещин на 10 000 мкм^2 площади поверхности образцов представлены в табл. 1–3 соответственно и на рис. 3–5. Результаты эксперимента показывают, что модифицирование СОЖ наночастицами (НЧ) позволяет при шлифовании добиться снижения шероховатости поверхности по параметру *Ra* до 11 %, повышения микротвердости поверхности до 7 % и снижения удельного количества поверхностных микротрещин более чем на 30 %.

Таблица 1

Значения шероховатости *Ra* образцов после шлифования

	Значения шероховатости *Ra* для образцов, мкм					Среднее значение *Ra*, мкм	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	1,16	1,11	1,15	1,22	1,19	1,17	0,042
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	1,07	1,05	1,08	1,01	0,99	1,04	0,039

Таблица 2

Значения микротвердости поверхности образцов после шлифования

	Значения микротвердости *HV* для образцов, ед.					Среднее значение *HV*, ед.	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	471	480	485	481	478	479,00	5,148
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	510	513	517	519	508	513,40	4,615

Таблица 3

Количество микротрещин на 10 000 мкм^2
поверхности образцов после шлифования

	Количество микротрещин на поверхности образцов, ед.					Среднее значение, ед.	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	34	32	43	38	40	37,4	4,450
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	24	28	21	18	26	23,4	3,975

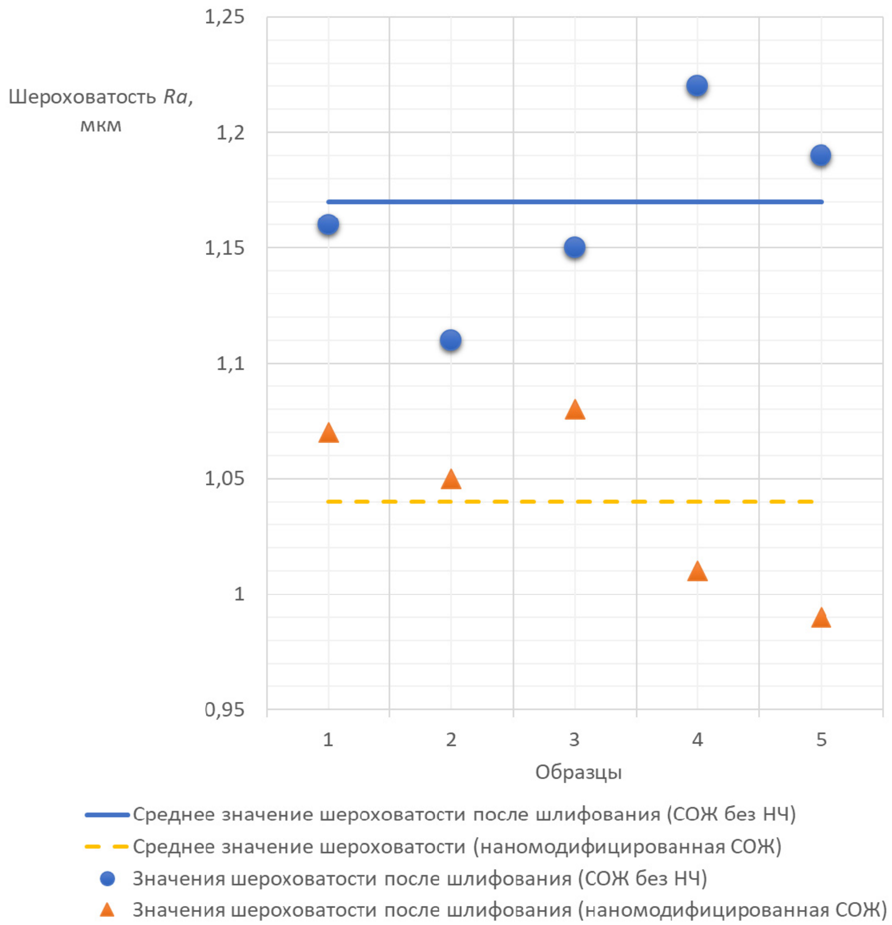

Рис. 3. Распределение значений шероховатости *Ra*
образцов после шлифования

Заключение

В работе показано, что время схлопывания кавитационного пузырька зависит от частоты вибрации, радиуса пузырька, плотности СОЖ, амплитуды колебаний давления в жидкости, а также от декремента затухания.

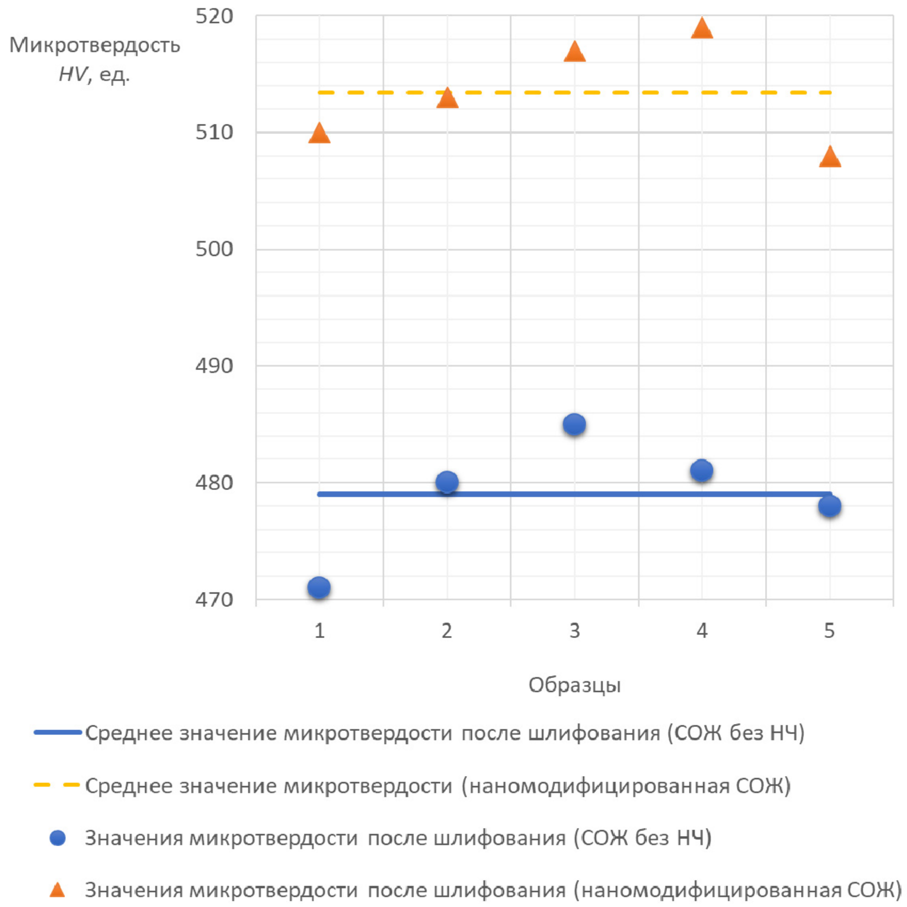

Рис. 4. Распределение значений микротвердости
поверхности образцов после шлифования

Установлено, что наиболее эффективной с точки зрения влияния кумулятивной струи является величина времени схлопывания $\geq 10^{-8}$ с. Показано, что число наночастиц, попадающих в каналы МТ за счет действия кумулятивной струи, существенно зависит от времени схлопывания кавитационного пузырька и геометрических параметров МТ. Показано, что эффективный модуль Юнга в зависимости от величины времени схлопывания кавитационного пузырька может превышать свою начальную величину примерно на два порядка. Выявлено качественное соответствие теоретических результатов результатам эксперимента: в результате добавления в СОЖ наночастиц Ni при шлифовании образцов лопатки турбокомпрессора было достигнуто снижение шероховатости поверхности по параметру R_a на 10 % и повышение микротвердости поверхности более чем на 20 %.

Таким образом, использование кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности деталей машин в процессе финишной обработки сопровождается упрочнением поверхностного слоя металла и снижением его шероховатости.

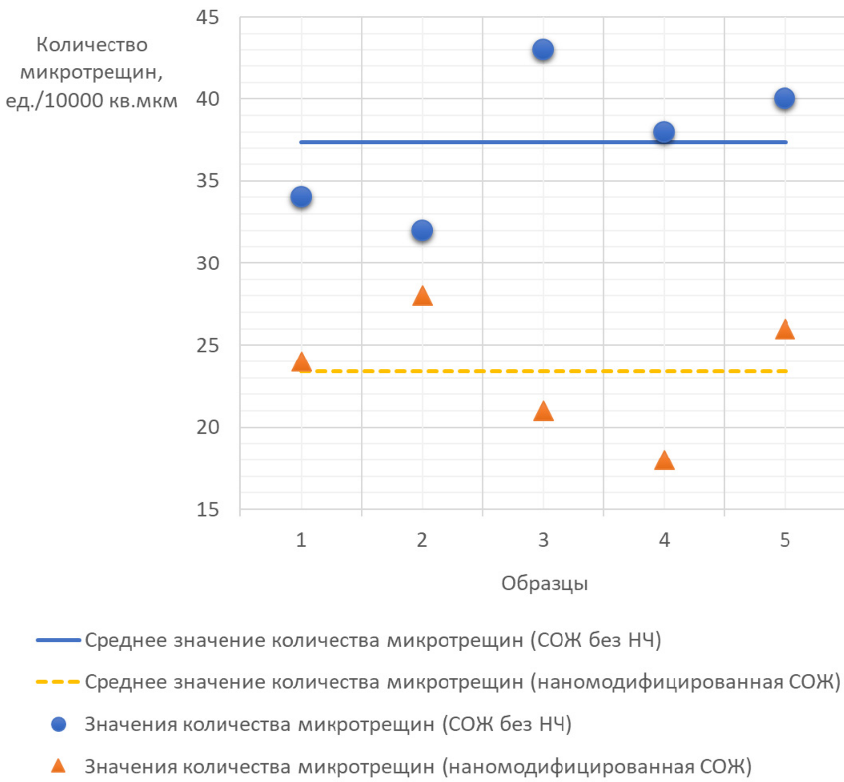

Рис. 5. Распределение значений количества микротрещин, приходящихся на 10 000 мкм^2 поверхности образцов после шлифования

Автор выражает признательность Пензенскому государственному университету и лично Кревчику Владимиру Дмитриевичу, доктору физико-математических наук, профессору, декану факультета приборостроения, информационных технологий и электроники Пензенского государственного университета, а также Артемову Игорю Иосифовичу, доктору технических наук, профессору, директору научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований Пензенского государственного университета за оказанную помощь при проведении исследования.

Библиографический список

1. **Тихоненко, В. В.** Упрочняющие технологии формирования износостойких поверхностных слоев / В. В. Тихоненко, А. М. Шкилько // Физическая инженерия поверхности. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 237–243.
2. Особенности алмазного шлифования изделий из твердого и хрупкого материалов с применением наночастиц в смазочно-охлаждающей жидкости / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик, А. В. Соколов, Н. П. Симонов, Н. Е. Артемова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 145–159.
3. **Белоус, В. И.** Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В. И. Белоус // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 66-70.

4. **Дружинин, Г. А.** Нелинейная акустика / Г. А. Дружинин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2009. – 69 с.
5. **Андриевский, Р.А.** Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Ч. 2. Механические и физические свойства / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 91–112.
6. Синтетические сверхтвердые материалы : в 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / отв. ред. Н. В. Новиков. – Киев : Наукова думка, 1986. – 280 с.

References

1. Tikhonenko V. V., Shkil'ko A. M. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti* [Surface physical engineering]. 2011, vol. 9, no. 3, pp. 237–243. [In Russian]
2. Artemov I. I., Krevchik V. D., Sokolov A. V., Simonov N. P., Artemova N. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 145–159. [In Russian]
3. Belous V. I. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aircraft and space technology]. 2011, no. 7 (84), pp. 66–70. [In Russian]
4. Druzhinin G. A. *Nelineynaya akustika* [Nonlinear acoustics]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2009, 69 p. [In Russian]
5. Andrievskiy R. A., Glezer A. M. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2000, vol. 89, no. 1, pp. 91–112. [In Russian]
6. *Sinteticheskie sverkhtverdye materialy: v 3 t. T. 1. Sintez sverkhtverdykh materialov* [Synthetic superhard materials: in 3 volumes. Vol. 1. Synthesis of superhard materials]. Execut. ed. N. V. Novikov. Kiev: Naukova dumka, 1986, 280 p.

Симонов Николай Петрович
соискатель, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Simonov Nikolay Petrovich
Applicant, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

Образец цитирования:

Симонов, Н. П. Использование кавитационной технологии с наномодифицированной смазочно-охлаждающей жидкостью для повышения прочности поверхностного слоя в процессе финишной обработки конструкционных материалов / Н. П. Симонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 121–134. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-10.