УДК 536:621.9 (075.8)

А.В. УСОВ, М.В. КУНИЦЫН
Одесский национальный политехнический университет

# ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Рассмотрены возможности повышения надёжности и долговечности цилиндрической группы технологическими методами, в том числе использование покрытий из износостойких материалов на рабочие поверхности цилиндров. Финишные обработки изделий с износостойкими покрытиями приводят к образованию дефектов на обрабатываемых поверхностях, снижают эксплуатационные характеристики этих изделий. Анализ причин образования сколов и трещин на обрабатываемых поверхностях указанных изделий показал, что появление этих дефектов связано с тепловыми процессами, которые сопровождают механическую обработку. Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием. Проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-$TiO_2$, полученных методом электрохимического осаждения.*

*Ключевые слова: эксплуатационные характеристики, трибокоррозия, износостойкость, отслоение, термомеханические процессы, шлифование, покрытие.*

А.В. УСОВ, М.В. КУНІЦИН
Одеський національний політехнічний університет

## МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

*Розглянуто можливості підвищення надійності і довговічності циліндричної групи технологічними методами зокрема використання покриттів зі зносостійких матеріалів на робочі поверхні циліндрів. Фінішні методи обробки виробів зі зносостійкими покриттями призводять до утворення дефектів на оброблюваних поверхнях, що знижує експлуатаційні характеристики цих виробів. Аналіз причин утворення сколів та тріщин на оброблюваних поверхнях зазначених виробів показав, що поява цих дефектів пов'язана з тепловими процесами, які супроводжують механічну обробку. Розроблено аналітичну модель по визначенню термомеханічного стану робочої поверхні циліндра зі зносостійким покриттям. Проведено трібокорозійне дослідження композиційних матеріалів на основі Ni/Ni-$TiO_2$, отриманих методом електрохімічного осадження.*

*Ключові слова: експлуатаційні характеристики, трібокорозія, зносостійкість, відшарування, термомеханічні процеси, шліфування, покриття.*

A.V. USOV, M.V. KUNITSYN
Odessa National Polytechnic University

## OPPORTUNITIES FOR INCREASING THE OPERATING CHARACTERISTICS OF WORKING SURFACES OF CYLINDERS BY TECHNOLOGICAL METHODS

*The possibilities of increasing the reliability and durability of a cylindrical group by technological methods are considered, including the use of coatings from wear-resistant materials on the working surfaces of cylinders. Finishing of products with wear-resistant coatings leads to the formation of defects on the surfaces to be treated, and reduces the performance characteristics of these products. An analysis of the reasons for the formation of chips and cracks on the surfaces of these products showed that the appearance of these defects is associated with the thermal processes that accompany the machining. An analytical model has been developed to determine the thermomechanical state of the working surface of a cylinder with a wear-resistant coating. The necessary parameters have been determined to ensure the required reliability and durability of the cylindrical coated group and methods for achieving them. Also, the development of technological criteria for managing the defect-free grinding process on the basis of established functional relationships between the physico-mechanical properties of the processed materials of the cylindrical group and coatings and the main technological parameters was carried out. The relationship between the quality of the machined surfaces of the cylindrical group and the control technological parameters is determined, such as processing modes, cutting fluids and tool characteristics, with the values of the grinding temperature and heat flux, as well as the stresses, not exceeding their limit values. It was proposed to implement a system of limiting inequalities in terms of the magnitude of the temperature itself and the*

*depth of its propagation, which avoids the formation of grinding burns and can serve as the basis for the design of grinding cycles by the thermal criterion. To confirm the adequacy of the analytical model, tribocorrosive studies of composite materials based on Ni/Ni-$TiO_2$ obtained by electrochemical deposition were carried out.*

*Keywords: reliability, durability, tribocorrosion, wear resistance, detachment, thermomechanical processes, diamond-abrasive processing.*

**Постановка проблемы**

Анализ исследований по трибологии показал, что за полный жизненный цикл машин эксплуатационные расходы в несколько раз превышают затраты на изготовление новой техники. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4…5% национального дохода [1].

Повышение долговечности машин непосредственно связано с износостойкостью деталей машин. Таким образом, повышение износостойкости деталей машин является актуальным направлением исследований. Долговечность многих машин определяется износостойкостью деталей, имеющих внутренние цилиндрические поверхности, работающие в условиях трения скольжения.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Известно, что задача повышения износостойкости конкретного изделия часто не предусматривает качественной модификации структурного состава используемого материала во всем его объёме, а переносится на видоизменение поверхностного слоя материала, поскольку защита сопрягаемых деталей от износа в ряде случаев решается поверхностным упрочнением. В общем случае под поверхностным упрочнением понимается повышение твёрдости рабочей поверхности детали, что позволяет увеличить износостойкость [2, 3].

Повышению механических характеристик трущихся поверхностей посвящено большое число работ, в результате которых предложены различные способы упрочнения. Перспективные направления развития поверхностно-упрочняющих технологий предполагают использование новых методов получения износостойких покрытий, в основном с использованием износостойких материалов, т.е. покрытий на основе соединений типа оксидов, нитридов и карбидов. Образование упрочняющих покрытий из разнородных материалов приводит не только к модификации поверхностного слоя, но и к образованию, в ряде случаев, принципиально нового композиционного материала поверхностного слоя, обладающего как высокой прочностью и достаточной пластичностью, так и повышенной износостойкостью [3 - 6].

**Цель исследования**

При поступательном движении поршня в цилиндре**,** имеющем некруглость δ, на его рабочей поверхности формируются зоны частичного отслоения покрытия. Эти участки под действием рабочих касательных напряжений могут достигать таких значений, при которых происходит отслаивание покрытия от матрицы цилиндрической поверхности. Изготовление цилиндров с нанесением на их рабочие поверхности износостойких покрытий связано с технологическими операциями по их обработке, которые сопровождаются термомеханическими явлениями.

Поэтому целью исследования являются термомеханические процессы в изделиях с покрытием при их обработке и эксплуатации для определения условий образования дефектов отслоения покрытий от основного материала и их устранения с учётом физико-механического состояния поверхностного слоя, технологических параметров финишной обработки и наследственных дефектов.

**Изложение основного материала исследования**

Найдём, при каких технологических параметрах, связанных с шероховатостью рабочей поверхности цилиндра и его геометрической погрешностью, а также физико-механических свойств покрытия и материала цилиндра, происходит разрушение собственно покрытия.

Расчётная схема по определению напряженно-деформированного состояния системы цилиндр-покрытие следующая (рис. 1).

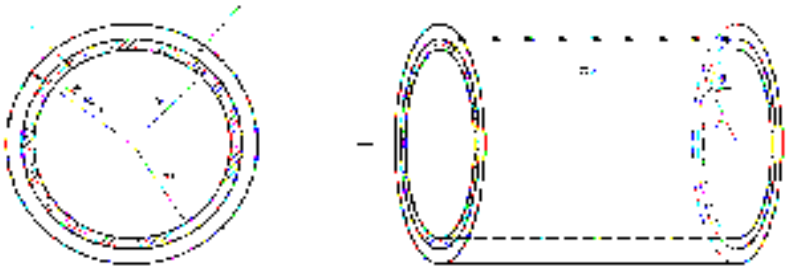

**Рис. 1. Расчётная схема: 1 – тело цилиндра; 2 – тело покрытия**

Рассмотрим уравнение теплопроводности для двухслойного цилиндра при симметричном нагревании, со свободным теплообменом с внутренней и внешней поверхности цилиндра. Температура и тепловой поток окрестности границы раздела изменяется непрерывным образом. Иными словами, получаем следующую задачу: найти непрерывную функцию температуры $t_i(r,\tau)$ в области $D[\mathrm{R}_1 \le r \le R_3, 0 \le \tau < \infty]$, удовлетворяющую уравнению [7, 8, 9]:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \left( \frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t_i}{\partial r} \right), \tag{1}$$

где $i = 1$ для первой области $D[R_1 \le r \le R_3, 0 \le \tau < \infty]$,

$i = 2$ для второй области $D[R_1 \le r \le R_3, 0 \le \tau < \infty]$;

граничным условиям:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial t_1}{\partial r} - h_1[t_1 - T_1(\tau)] = 0, \qquad \text{при } r = R_1, \\ &\frac{\partial t_2}{\partial r} - h_2[t_2 - T_2(\tau)] = 0, \qquad \text{при } r = R_3; \end{aligned} \tag{2}$$

условиям сопряжения:

$$t_1 = t_2, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r}, \qquad при\ r = R_2; \tag{3}$$

начальному условию:

$$t_i(r,0) = \Phi_i. \tag{4}$$

Здесь $a_i, h_i, \lambda_i$ — коэффициенты температуропроводности, относительной теплоотдачи и теплопроводности, соответственно покрытия (*i=2*) и основного материала (*i=1*).

Функции $\overline{\Phi_i}(r), \overline{T_i}(\tau)$ удовлетворяют таким условиям:

а) $T_i(\tau)$ — дифференцируемая по τ функция.

Кроме того

$$\int_0^{\tau}\int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{\partial T_i}{\partial \tau}\left[ Ai_0\left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}}\right) + BN_0\left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}}\right)\right] \exp\left[-\gamma_n^2(\tau - \overline{\tau})\right] dr d\overline{\tau} < \infty .$$

б) $\Phi_i(r)$ — непрерывная по *r* функция, производная которой может иметь разрыв первого рода при $r = R_2$.

Решение задачи будем искать в виде

$$t_i = \left[T_2(\tau) - T_1(\tau)\right]\left(A_i \ln r + B_i\right) + T_i(\tau) + \Theta_i(r,\tau) \tag{5}$$

Получаемая для $\Theta_i$ задача решается методом конечных интегральных преобразований, ядра $u_{in}(r)$ которых удовлетворяют уравнению Бесселя

$$u_{in}'' + \frac{1}{r}u_{in}' + \frac{\gamma_n^2}{\alpha_i}u_{in} = 0, \tag{6}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} u_{1n}' - h_1 u_{1n} &= 0, \qquad \text{при } r = R_1, \\ u_{1n} = u_{2n}, \gamma_1 u_{1n} &= \gamma_2 u_{2n} \qquad \text{при } r = R_2; \\ u_{2n} + h_2 u_{2n}, &\qquad \text{при } r = R_3; \end{aligned} \tag{7}$$

Окончательное решение задачи запишется как

$$t_i(r,\tau) = \psi_i(r,\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\gamma_n^2 \tau\right)\left[\overline{\Theta_n}(0) + \int_0^{\tau} \frac{d\overline{\psi}_n(\overline{\tau})}{d\overline{\tau}} \exp(-\gamma_n^2 \overline{\tau}) d\overline{\tau}\right] u_{in}(r).$$

Здесь $\psi_i(r,\tau) = \left[T_2(\tau) - T_1(\tau)\right]\left(A_i \ln r + B_i\right) + T_i(\tau)$.

Для определения напряжённо-деформированного состояния цилиндра с покрытием, подверженного действию температурного поля, рассмотрим следующую задачу. Двухслойный неограниченный полый цилиндр подвержен действию температурного поля $t_i = t_i(r,\tau)$. Материал цилиндра и покрытие соприкасаются по всей поверхности раздела и, следовательно, перемещения на поверхности раздела будут

непрерывными. Другое условие на границе раздела получаем из условия непрерывности нормальных напряжений $\sigma_r$. На внешних поверхностях $\sigma_r$ полагаются равными нулю. Таким образом, имеем следующую задачу: найти непрерывную функцию деформации $u_i(r,\tau)$ в области $D[R_1 \le r \le R_3, 0 \le \tau \le \tau_0]$, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{1}{c_i^2}\frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_i}{\partial r} - \frac{u_i}{r^2} - m_i \frac{\partial t_i}{\partial r}, \tag{8}$$

где $i=1$ для первой области, то есть когда $r$ изменяется от $R_1$ до $R_2$ и $i=2$ для второй области, когда $r$ изменяется от $R_2$ до $R_3$; $u_i(r,\tau)$ — перемещение, $c_i$ — скорость распространения волн расширения в упругой среде;
граничным условиям

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u_1}{\partial r} + p_1 u_1 = m_1 t_1, \qquad \text{при } r = R_1, \\ &\frac{\partial u_2}{\partial r} + p_2 u_2 = m_2 t_2, \qquad \text{при } r = R_3; \end{aligned} \tag{9}$$

условиям сопряжения:

$$u_1 = u_2, p_{12}\frac{\partial u_1}{\partial r} + q_{12}u_1 = \frac{\partial u_2}{\partial r} + p_{12}m_1 t_1 - m_2 t_2 \qquad \text{при } r = R_2; \tag{10}$$

начальным условиям:

$$u_i(r,0) = \Phi_i(r), \frac{\partial u_i(r,0)}{\partial \tau} = \Psi_i(r). \tag{11}$$

Решение этой задачи будем искать в виде:

$$u_i(r,\tau) = \psi_i(r,\tau) + \Theta_i(r,\tau), \tag{12}$$

здесь

$$\psi_i(r,\tau) = A_i(\tau)r + \frac{B_i(\tau)}{r} + \frac{m_i}{r}\int_{R_i}^{r} t_i(\rho,\tau)\rho d\rho \tag{13}$$

квазистатическое решение задачи (8) – (11). $A_i(\tau)$ и $B_i(\tau)$ — некоторые функции, которые выбираются так, чтобы для функции $\Theta_i(r,\tau)$ получились однородные граничные условия. Полученная для $\Theta_i$ задача решается методом конечных интегральных преобразований.

Соответствующие формулы обращения имеют вид

$$\overline{\Theta}_n = \frac{p_{12}}{c_1^2}\int_{R_1}^{R_2}\Theta_1\omega_{1n} r dr + \frac{1}{c_2^2}\int_{R_2}^{R_3}\Theta_2\omega_{2n} r dr, \tag{14}$$

$$\Theta_i = \sum_{n=1}^{\infty}\overline{\Theta}_n\omega_{in} \qquad (R_i \le r \le R_{i+1}). \tag{15}$$

Здесь $\omega_{in}(r)$ решение уравнения Бесселя

$$\omega_{in}'' + \frac{1}{r}\omega_{in}' + \left(\frac{\gamma_n^2}{c_i^2} - \frac{1}{r^2}\right)\omega_{in} = 0, \tag{16}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} &\omega_{1n}' + p_1\omega_{1n} = 0 \qquad \text{при } r = R_1, \\ &\omega_{1n} = \omega_{2n}, p_{12}\omega_{1n}' + q_{12}\omega_{1n} = \omega_{2n}' \qquad \text{при } r = R_2, \\ &\omega_{2n}' + p_2\omega_{2n} = 0 \qquad \text{при } r = R_2. \end{aligned} \tag{17}$$

Для определения $\overline{\Theta}_n$ имеем уравнение

$$\frac{d^2\overline{\Theta}_n}{d\tau^2}+\gamma_n^2\overline{\Theta}_n=-\frac{d^2\overline{\psi}_n}{d\tau^2}, \tag{18}$$

с начальными условиями:

$$\overline{\Theta}_n=\overline{\Phi}_n-\overline{\psi}_n,\frac{d\overline{\Theta}_n}{d\tau}=\overline{\Psi}_n-\frac{d\overline{\psi}_n}{d\tau} \qquad \text{при } \tau=0. \tag{19}$$

Решение уравнения (18) с начальными условиями (19) запишется так

$$\overline{\Theta}_n=c_{1n}\cos\gamma_n\tau+c_{2n}\sin\gamma_n\tau-\frac{1}{\gamma_n}\int_0^{\tau}\frac{d^2\overline{\psi}_n}{d\overline{\tau}^2}\sin\left[\gamma_n(\tau-\overline{\tau})\right]d\overline{\tau}, \tag{20}$$

где

$$c_{1n}=\overline{\Phi}_n(0)-\overline{\psi}_n(0), c_{2n}=\frac{1}{\gamma_n}\left[\overline{\Psi}_n(0)-\frac{d\overline{\psi}_n(0)}{d\tau}\right].$$

Анализ расчётных зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением шероховатости рабочей зоны цилиндра увеличивается зона отслоения покрытия от волокна в связи с трением на этом участке с поверхностью поршня.

А это значит, что разрушение покрытия произойдёт в том случае, когда технологические напряжения по величине будут превосходить прочность сцепления $\sigma_{сц}$.

На рис. 2 представлен режим обработки рабочих поверхностей цилиндра, которые обеспечивают необходимую шероховатость для сохранения функциональных свойств группы поршень-цилиндр с покрытием [12 - 18].

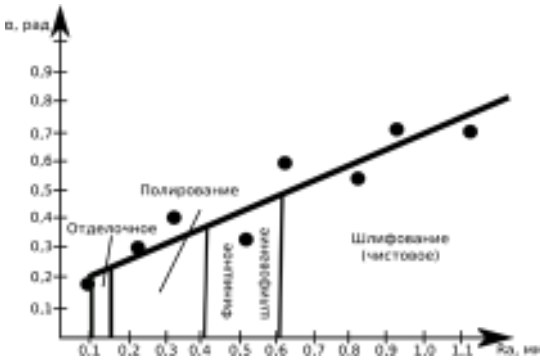


**Рис.**

**Рис. 2. Влияние режимов обработки цилиндрической группы с покрытием на её характеристики**

## Результаты

Для обеспечения требуемой надёжности и долговечности цилиндрической группы с покрытием необходимо при нанесении покрытий на их рабочих поверхностях обеспечить шероховатость $0,8 \le R_a \le 1,2$. Такую шероховатость можно достичь за счёт операций финишного шлифования и последующего отделочного полирования.

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования осуществлена на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов цилиндрической группы и покрытий и основными технологическими параметрами.

Качество обрабатываемых поверхностей цилиндрической группы будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики инструмента, что текущие значения температуры шлифования $T_i(r,\tau)$ и теплового потока $q(\mathrm{r},\tau)$, напряжений $\sigma(\mathrm{r},\tau)$ не будут превосходить своих предельных значений [15].

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(r,\tau)=\frac{C}{2\pi\lambda}\sum_{k=0}^{n}H\left(\tau-\frac{kl}{\upsilon_{kp}}\right)H\left(\frac{L+kl}{\upsilon_{kp}}\right)\int_{\gamma_1}^{\gamma_2}f(r,\tau,\tau')d\tau' \le [T]_M; \tag{21}$$

$$T([h],0,\tau)=\frac{C}{2\pi\lambda}\sum_{k=0}^{n}H\left(\tau-\frac{kl}{\upsilon_{kp}}\right)H\left(\frac{L+kl}{\upsilon_{kp}}\right)\int_{\gamma_1}^{\gamma_2}\psi(r_0,\tau,\tau')d\tau'\le[T]_{c.n.}; \quad (22)$$

$$T_k(r,\tau)=\frac{C\upsilon_{kp}}{\pi\lambda l\sqrt{\upsilon_g}}\int_{\alpha}^{\tau}\int_{-e}^{e}\frac{\chi(\eta,t)e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}}\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}}+\gamma e^{\gamma^2(\tau-t)}\left[1+\Phi\left(\gamma\sqrt{\tau-t}\right)\right]\right\}d\eta dt\le[T]; \quad (23)$$

$$T_k^{max}(r,0)=\frac{C\upsilon_{kp}\alpha}{\lambda l\upsilon_q^2}\sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}\left[1-\exp\left(-\frac{\upsilon_q\sqrt{Dt_{??}}}{\alpha}\right)\right]\le[T]|_{R_1,0,\ r,\ R_1} \quad (24)$$

позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{max}(r,\tau)=2G\frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha_t T_k erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right)\le[\sigma_{сц}]. \quad (25)$$

Для подтверждения адекватности аналитической модели были проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-$TiO_2$, полученные методом электрохимического осаждения (рис. 3) [19].

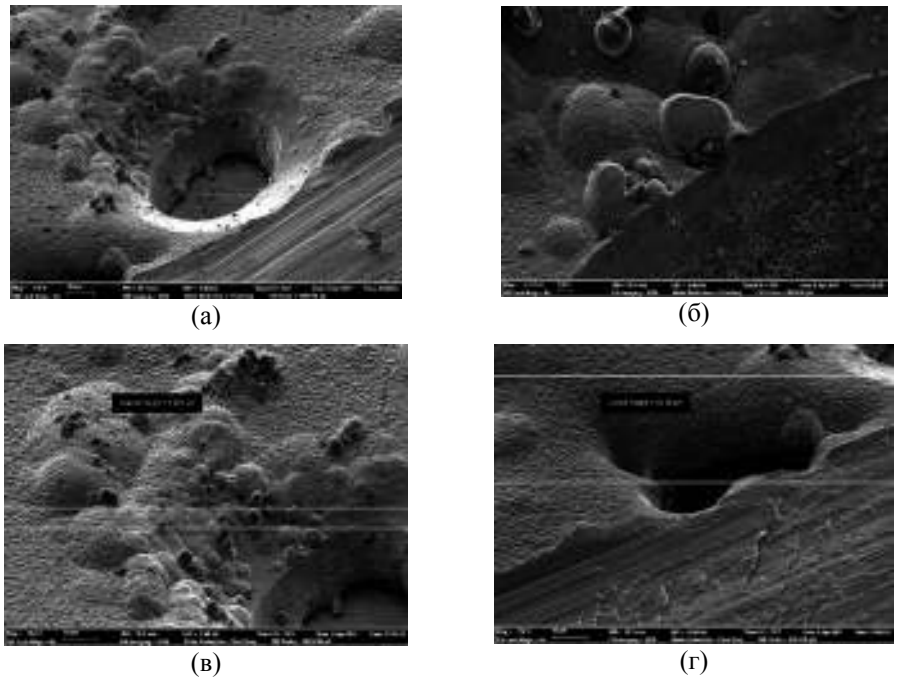


**Рис. 3. Исследование композиционных материалов на основе Ni/Ni-$TiO_2$ в сканирующем электронном микроскопе: (а) нарушение покрытия, (б) частицы $TiO_2$, (в) измерение диаметра частицы, (г) измерение толщины покрытия**

После проведения трибокоррозионных исследований материалов Ni/Ni-$TiO_2$ определено, что для покрытия Ni заметно увеличение глубины и ширины трещин в зависимости от увеличения нагрузки при неизменном времени воздействия. При этом профиль трещин для покрытия Ni-$TiO_2$ с увеличением нагрузки не меняется. В связи с этим можно выделить положительное влияние частиц $TiO_2$ в покрытии, которые увеличивают защитные функций покрытия от механического истирания, при этом величина нагрузки для Ni-$TiO_2$ перестаёт играть столь существенную роль.

**Выводы**

Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием, позволяющая осуществить рациональный выбор технологических параметров обработки этих изделий по приведённым критериям для обеспечения бездефектной обработки. Адекватность полученной модели проверялась экспериментальными исследованиями композиционных материалов на основе Ni/Ni-$TiO_2$, полученных методом электрохимического осаждения.

**Список использованной литературы**


1. Гаркунов Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин : монография / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник — М. : МСХА, 2003. — 343 с.
2. Ueda T. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber / T. Ueda , A. Hosokawa, A. Yamamoto // Journal of Engineering for Industry. — 1986. — Т. 108, №. 4. — P. 247–251.
3. Усов А. В. Математическое моделирование процессов контроля покрытий элементов конструкций на базе сингулярных интегральных уравнений / А.В. Усов, А.А. Батырев — К. : Проблемы машиностроения, 2010. — Т. 13, № 1. — С. 65–75.
4. Оборский Г. А. Моделирование систем: монография / Г.А. Оборский, А.Ф. Дащенко, А.В. Усов, Д.В. Дмитришин — Одесса : Астропринт, 2013. — 664 с.
5. Балохонов Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах : монография / Р. Р. Балохонов — Новосибирск : СО РАН, 2006. — 520 с.
6. Якимов А. В. Теплофизика механической обработки / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов — Одесса : Лыбидь, 1991. — 240 с.
7. Carslaw H. S. Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids (Classic Reprint) / H.S. Carslaw — London : Fb&c Limited, 2017. — 284 p.
8. Carslaw H. S. Conduction of heat in solids / H. S. Carslaw , J. C. Jaeger — Oxford : Clarendon Press, 1986. — 510 p.
9. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения / [сост. Г. Паркус, пер. с нем. под ред. Г.С. Шапиро]. — М.: Физматлит, 1963. — 252 с.
10. Попов Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов разрезов тонких включений и подкреплений / Г.Я. Попов — М. : Наука, 1982. — 344 с.
11. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, рядов и произведений : монография / [сост. И. С. Градштейн, И.М. Рыжик, пер. с англ. / науч. ред.: Алан Джеффри, Даниэль Цвиллингер]. — 7-е изд. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. — 1232 с.
12. Сторожев В. П. Причины и закономерности постепенных отказов основных триботехнических объектов энергетической системы судна и повышение их ресурса / В. П. Сторожев — Одесса : Сторожев ВП, 2001. — 341 с.
13. Sun Y. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–$Al_2O_3$ composite coatings / Y. Sun, I. Flis-Kabulska, J. Flis // Materials Chemistry and Physics. — 2014. — Т. 145. №. 3. — P. 476-483.
14. Aruna S. T. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties / S.T. Aruna, V.K. W. Grips, K.S. Rajam // Journal of Alloys and Compounds. — 2009. — Т. 468, №. 1-2. — P. 546-552.
15. Chen L. Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni–$Al_2O_3$ composite coatings / L. Chen, L. Wang, Z. Zeng, T. Xu // Surface and Coatings Technology. — 2006. — Т. 201, №. 3-4. — P. 599-605.
16. Kim K. T. Synthesis and improved explosion behaviors of aluminum powders coated with nano-sized nickel film / K. T. Kim, D. W. Kim, S. H. Kim, C. K. Kim, Y. J. Choi // Applied Surface Science. — 2017. — Т. 415. — P. 104-108.
17. Kalpakjian S. Manufacturing engineering and technology / S. Kalpakjian, S.R. Schmid — Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2014. — 913 p.
18. Левченко А. А. Влияние технологической наследственности при производстве запасных частей на наводораживание деталей и их износостойкость / А. А. Левченко, В.Д. Евдокимов // Проблеми техніки. — 2006. — №2. — С. 23-28.
19. Kunitsyn M.V. Tribocorrosion research of NI-$Al_2O_3$/$TIO_2$ composite materials obtained by the method of electrochemical deposition / M.V. Kunitsyn, A.V. Usov // Сучасні технології в машинобудуванні. — 2017. — Т.12. — С. 61-70.