

УДК 621.787.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

*А. А. Кочубей<sup>1</sup>, А. В. Коновалов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Публичное Акционерное Общество «ТАНТК им. Г. М. Бериева» (г. Таганрог, Российская Федерация)

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Представлены результаты экспериментальных исследований изменения параметров качества обработанной поверхности в результате магнитодинамической упрочняющей обработки. Представлены закономерности, позволяющие определить характер изменения параметров качества обрабатываемой поверхности от энергии соударения ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью. Экспериментально доказано, что представленные аналитические модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать параметры качества обработанной поверхности.

**Ключевые слова:** поверхностное-пластическое деформирование (ППД), вращающееся электромагнитное поле (ВЭМП), отделочно-упрочняющая обработка (ОУО), летательный аппарат (ЛА) ферромагнитный индентор, магнитооживленный (МО) слой.

## INVESTIGATION OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE TREATED SURFACE IN THE PROCESS OF MAGNETODYNAMIC HARDENING TREATMENT

*A. A. Kochubey<sup>1</sup>, A. V. Konovalov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Beriev aircraft company (Taganrog, Russian Federation)

<sup>2</sup>Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The results of the experimental studies of changes in the quality parameters of the treated surface as a result of magnetodynamic hardening treatment are presented. The regularities allowing determining the nature of the change in the quality parameters of the treated surface from the energy of collision of ferromagnetic indentors with the treated surface are presented. It has been experimentally proved that the presented analytical models do not allow predicting the quality parameters of the treated surface with sufficient accuracy.

**Keywords:** surface-plastic deformation (SPD), rotating electromagnetic field (REMF). finishing and hardening treatment (FHT), aircraft ferromagnetic indenter, magnetically liquefied (ML) layer.

**Введение.** На текущее время присутствует большой выбор динамических методов поверхностного пластического деформирования (ППД) свободнодвижущейся обрабатываемой средой [1, 2]. При этом ни один из них не позволяет эффективно производить отделочно-упрочняющую обработку тонкостенных нагруженных деталей большой длины, выполняющих несущую функцию, а также обработку поверхностей полых деталей с внутренней стороны.

Решение данной проблемы можно найти в использовании метода, при котором обрабатываемой среде под воздействием ВЭМП придается хаотичное движение.

**Основная часть.** В результате постановочных экспериментов выявлено, что данный метод раскрывает новые возможности динамических методов упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, с использованием его в операциях отделочно-упрочняющей обработки изделий, выполненных из немагнитных металлов, массово используемых для изготовления ЛА.

Наряду с альтернативными методами отделочно-упрочняющей обработки пластическим деформированием, метод магнитодинамической обработки дает возможность проще и с наименьшими затратами производить обработку тонкостенных деталей большой длины со сравнительно малой площадью сечения и пустотелых деталей изнутри.

Конструктивная простота данных устройств, их низкая себестоимость и высокая производительность относительно известных методов ППД, обуславливают преимущества использования устройств с вращающимся электромагнитным полем для отделочно-упрочняющей обработки деталей данной конструктивной группы.

**Исследования изменения качества поверхности в процессе магнитодинамической обработки.** Как было отмечено ранее, обработка ферромагнитными инденторами во вращающемся электромагнитном поле по своей динамической и технологической сущности ничем не отличается от широкоизвестных и получивших практическое применение методов обработки свободнодвижущимися инденторами, т.к. виброударная, пневмодинамическая, центробежно-ротационная обработки являются лишь их разновидностями по используемому источнику энергии. Присущие этим методам общие закономерности модифицирования поверхностного слоя в процессе обработки обусловили разработку обобщённых аналитических моделей для определения и прогнозирования параметров качества [3].

Для проверки адекватности полученных моделей в процессе магнитодинамической обработки проведены комплексные исследования влияния технологических параметров и свойств материала детали на параметры качества обработанной поверхности.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований изменения физико-механических параметров поверхностного слоя образцов в функции от времени магнитодинамической упрочняющей обработки.

Продолжительность обработки оценивалась в соответствии полученной на основе теоретико-вероятностных представлений зависимости [4], связывающей время обработки с кратностью сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками.

Загрузка обрабатывающей средой в виде ферромагнитных инденторов цилиндрической формы с заданным соотношением длины к диаметру ( $l/d$ ) в рабочую камеру устройства с вращающимся электромагнитным полем определялась по аналитической модели, представленной в [5], исходя из наиболее эффективных условий с точки зрения энергетического взаимодействия инденторов в магнитоожигенном слое.

Экспериментальные исследования изменения шероховатости поверхности на образцах из материала Д16Т показали (рис. 1), что при исходной величине шероховатости  $Ra=1,6$  мкм в результате обработки происходит ее снижение, а для образцов с величиной равной 0,2 мкм, шероховатость возрастает. Из этого следует, что величина шероховатости поверхности, полученная в результате магнитодинамической обработки, зависит от исходного значения исходной шероховатости поверхности. Установлено, что величина шероховатости обработанной поверхности изменяется при продолжительности обработки, не превышающей 3–4 минут, а затем устанавливается, что эквивалентно 12–14 кратному количеству сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками.

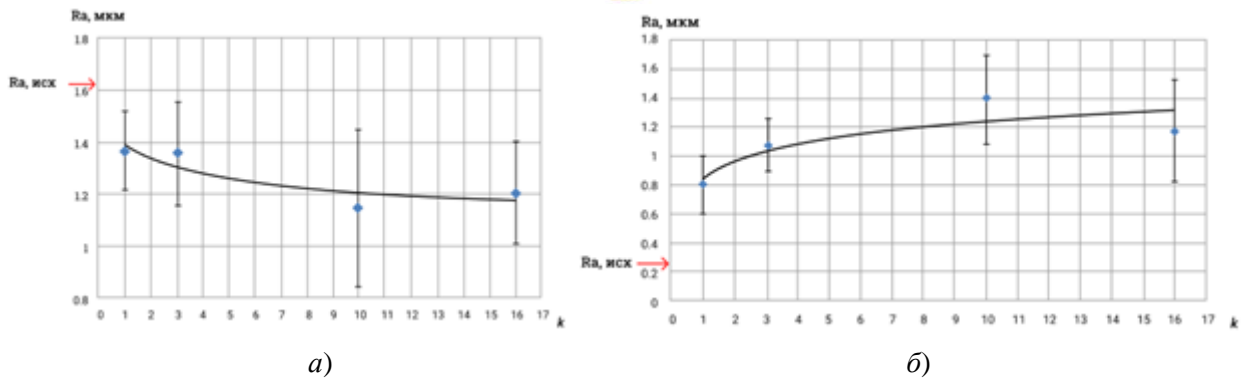


Рис. 1. Зависимости влияния кратности покрытия поверхности пластическими отпечатками на изменение величины шероховатости поверхности образцов из материала Д16Т при условиях обработки:  $V=0,1 \text{ Гл}$ ;  $i=3$ ;  $l/d=10$  и состояния шероховатости исходной поверхности:  
 а —  $R_{a \text{ исх}} = 1,61 \text{ мкм}$ ; б —  $R_{a \text{ исх}} = 0,21 \text{ мкм}$

Характер изменения величины шероховатости обработанной поверхности можно оценить с помощью предложенной зависимости [6], которая позволяет связать энергетическое состояние ферромагнитных инденторов в МО слое с величиной шероховатости исходной поверхности и обосновать вид расчётной зависимости (+ или -)

$$R_{a_k} = \left[ R_{a \text{ исх}} \pm \sqrt{\frac{2E}{\pi d HV}} \right] \left( 1 - K_{R_a} \frac{d_k}{d} \ln k \right), \quad (1)$$

где  $HV$  — твёрдость материала по Викерсу;  $R_{a \text{ исх}}$  — исходное состояние микропрофиля поверхности;  $E$  — энергия единицы объема МОВ слоя, отнесенная к единице времени;  $d_k$  — диаметр пластического отпечатка, определяемый по формуле  $d_k = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot E \cdot d}{HV}}$ , предложенной в работе [7];  $K_{R_a}$  — коэффициент корректировки изменения микропрофиля в процессе ППД.

В результате проведенных экспериментальных исследований формируемых физико-механических параметров поверхностного слоя в процессе магнитодинамической отделочно-упрочняющей обработки (рис. 2 а) выявлено, что при увеличении продолжительности обработки величина микротвердости и остаточных напряжений сжатия (рис. 2 б) в поверхностном слое возрастает до определенного предела и устанавливается на этом уровне. Установлено, что наибольший прирост микротвердости и остаточных напряжений сжатия образцов достигается при продолжительности обработки, не превышающей 3–4 минут, а затем устанавливается, что эквивалентно 12–14-кратному количеству сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками.

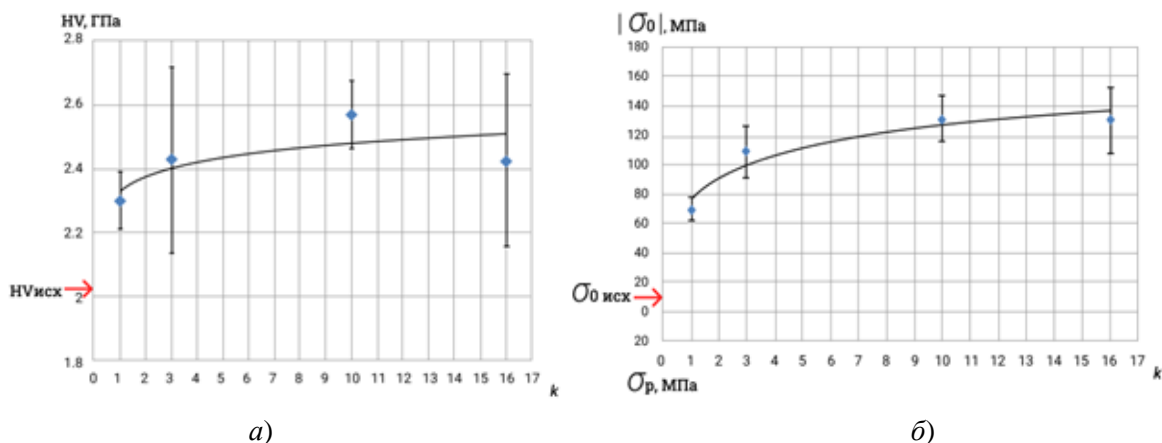


Рис. 2. Зависимость изменения микротвёрдости (а) и остаточных напряжений сжатия (б) поверхности от кратности покрытия пластическими отпечатками.

Расчётные модели прогнозирования микротвердости и остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали, сформировавшиеся в результате магнитодинамической отделочно-упрочняющей обработки, описываются следующими зависимостями [6].

$$HV_k = \left[ \sqrt{\frac{32 E}{\pi d^3}} \cdot HV \right] \left( 1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{ок} = \left[ 0.481 \left( \frac{E}{(r_{пр})^3} \right)^{0.2} \right] k_{\mu}^{0.8} \left( 1 + K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d} \ln k \right), \quad (3)$$

где  $K_{HV}$  и  $K_{\sigma_o}$  — соответственно коэффициенты корректировки изменения микротвердости и величины остаточных напряжений первого рода в процессе ППД;  $r_{пр}$  — приведённый радиус индентора (при условии равенства масс цилиндра и сферы), равный  $r_{пр} = \sqrt[3]{\frac{3}{16} d^2 l}$ , где  $d$  и  $l$  — соответственно диаметр и радиус индентора.

**Заключение.** Анализ полученных результатов позволил подтвердить основные закономерности изменения физико-механических характеристик поверхностного слоя, модифицированного в функции от времени и условий магнитодинамической обработки, которые были положены в основу модельных их описаний и представлены в научно-технической литературе, посвященной исследованию методов ППД свободными инденторами.

#### Библиографический список

1. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2006. — 183 с.
2. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2008. — 694 с.
3. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле / А. А. Кочубей, В. А. Лебедев, Ю. М. Вернигоров [и др.] — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2018. — 135 с.
4. Оценка производительности упрочняющей обработки в условиях вращающегося электромагнитного поля / В. А. Лебедев, А. А. Кочубей, М. М. Чаава [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2016. — №7(139). — С. 19–24.
5. Лебедев, В. А. Обоснование эффективной загрузки ферромагнитными инденторами рабочей зоны устройства для магнитодинамической обработки / В. А. Лебедев, А. А. Кочубей, А. Г. Хведелидзе // Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: сб. тр. всерос. науч.-практ. конф. Технические науки, 20 мая, г. Таганрог. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. — С. 161–166.
6. Лебедев, В. А. Моделирование характеристик качества поверхностного слоя, упрочненного в процессе магнитодинамической обработки / В. А. Лебедев, А. А. Кочубей, И. В. Чумак // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т.16, №3(86). — С. 71–78.
7. Кудрявцев, И. В. Исследование по упрочнению деталей машин / И. В. Кудрявцев — Москва.: Машиностроение, 1972. — 327 с.

*Об авторах:*

**Кочубей Анатолий.Анатольевич**, заместитель начальника технологического управления по САПР ПАО «ТАНК им. Г. М. Бериева». (347923, РФ, г. Таганрог, пл. Авиаторов, 1) [watchbox@mail.ru](mailto:watchbox@mail.ru)



**Коновалов Анатолий Васильевич**, доцент кафедры «Технологии производства авиационных комплексов специального назначения» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [a-v-k-57@mail.ru](mailto:a-v-k-57@mail.ru)

*About the Authors:*

**Kochubey, Anatoliy A.**, Deputy of the Technological Department for CAD, Beriev aircraft company (1, Aviatorov sq., Taganrog, 347923, RF), [watchbox@mail.ru](mailto:watchbox@mail.ru)

**Konovalov, Anatoliy V.**, Associate professor, Department of Technologies of Production of Special-purpose Aviation Complexes, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, RF), [a-v-k-57@mail.ru](mailto:a-v-k-57@mail.ru)