

УДК 621.787.6

DOI:10.34759/vst-2020-1-201-216

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРОЧНЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСТРОЙСТВАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Кочубей А.А.^{1*}, Вернигоров Ю.М.^{2**}, Дёмин Г.В.^{2***}

¹ Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева,
ТАНТК им. Г.М. Бериева, площадь Авиаторов, 1, Таганрог, 347923, Россия

² Донской государственный технический университет,
ДГТУ, пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344000, Россия

* e-mail: watchbox@mail.ru

** e-mail: jvernigorov@donstu.ru,

*** e-mail: georgijdstu@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.11.2019

Изложены результаты исследований упрочняющей обработки длинномерных тонкостенных деталей с использованием наложения магнитодинамического эффекта. Представлены закономерности движения ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле (ВЭМП), термодинамическая модель, определяющая энергетическое состояние ферромагнитных инденторов во вращающемся электромагнитном поле; обоснован характер ударно-импульсного взаимодействия ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью и их эффективная загрузка в рабочую камеру; предложены расчётные зависимости, обеспечивающие объективную оценку параметров качества обработанной поверхности и производительности процесса; разработаны методики проектирования технологических процессов упрочняющей обработки деталей во вращающемся электромагнитном поле; даны рекомендации по проектированию устройств с ВЭМП, а также их технологического оснащения, обеспечивающего эффективное использование на операциях упрочняющей обработки деталей.

Ключевые слова: магнитодинамическая обработка, упрочнение, параметры качества поверхности, поверхностное пластическое деформирование (ППД), вращающееся электромагнитное поле, ферромагнитный индентор, магнитооживленный вращающийся (МОВ) слой.

Повышение качества, надежности и долговечности изделий авиационной техники на протяжении многих десятилетий и в настоящее время является важной народнохозяйственной проблемой, над которой работают многие специалисты

в нашей стране и за рубежом [1–3]. Эта проблема стала особенно актуальной в связи созданием новых поколений самолетов и обострившейся конкуренцией на мировом рынке. В конструкции упомянутых типов изделий входят группы высо-

конагруженных деталей, надежность и долговечность которых в значительной мере определяет ресурс работы и надежность всего изделия. Такого рода детали имеют сложную форму, большие размеры, ограниченную жесткость, к параметрам качества их поверхности и поверхностного слоя предъявляются высокие требования.

Характерным примером таких деталей являются бимсы, стрингеры, пояса, стойки, лонжероны, широко используемые для изготовления деталей летательных аппаратов.

Преимущественно это полые, сложной конфигурации детали с ограниченной толщиной стенок, с изменяющимися по длине размерами поперечного сечения.

Высокие требования к качеству поверхности объясняются тяжелыми условиями эксплуатации: высокий уровень знакопеременных нагрузок, высокая скорость и контактные нагрузки, колебания температурного градиента, коррозионные и эрозийные процессы. В этой связи шероховатость поверхности ограничивается — $Ra = 0,5 \div 1,25$ мкм, оговаривается структура и направленность микрорельефа; поверхностный слой подвергается упрочняющей обработке. Разрабатываются и совершенствуются методы ударно-импульсного воздействия, новые технологические схемы упрочняющей обработки деталей рассматриваемого класса, создаются специализированное оборудование и инструменты.

Разработка эффективных технологических методов и средств отделочно-упрочняющей обработки высоконагруженных деталей является актуальной проблемой.

Несмотря на множество динамических методов поверхностного пластического деформирования свободнодвижущейся обрабатываемой средой [4–13], на сегодняшний день не существует эффективного решения проблемы упрочняющей обработки тонкостенных длинномерных деталей, в том числе обработки поверхностей полых деталей изнутри.

Для разрешения данной проблемы предлагается способ, основанный на создании конвективного движения обрабатываемой среды во ВЭМП. Результаты поисковых исследований [14] показывают, что данный способ расширяет технологические возможности способов ППД и может применяться в операциях упрочняющей обработки деталей, изготовленных из немагнитных металлов, к которым относятся бимсы, стрингеры, пояса, стойки, лонжероны (рис. 1).

Сущность метода заключается в следующем. Если ферромагнитные неравноосные инденторы поместить во вращающееся электромагнитное поле достаточной напряженности, то они приходят в сложное, хаотичное движение, создавая своеобразный МОВ-слой. При хаотичном движении инденторов во вращающемся электромагнитном поле происходит большое количество столкновений между инденторами, между инденторами и обрабатываемыми изделиями, сопровождающихся как прямыми, так и скользящими ударами. В результате ударно-импульсного соударения инденторов происходит локальная упругопластическая деформация поверхности изделий, находящихся в рабочей зоне устройства. Для практического использования МОВ-слоя ферромагнитных свобод-

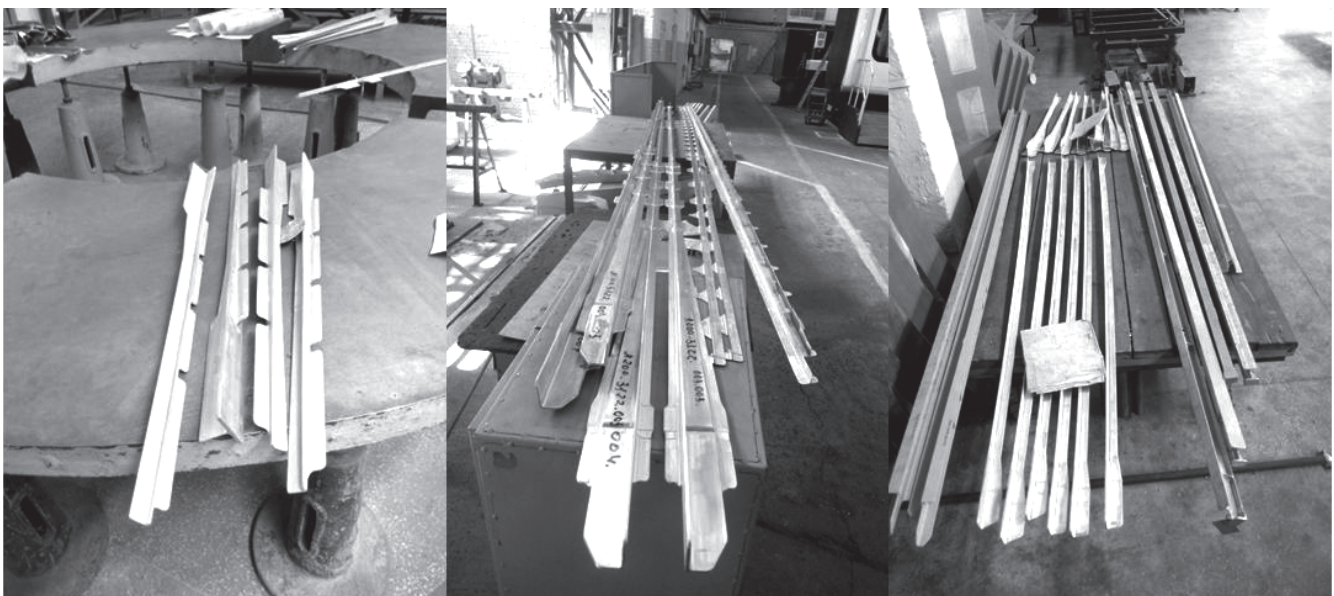


Рис. 1. Детали, подвергаемые упрочняющей обработке

подвижных инденторов последние помещают в рабочую камеру, вокруг которой располагают устройство, создающее в рабочей зоне этой камеры вращающееся электромагнитное поле.

Обладея теми же достоинствами, что и другие способы упрочняющей обработки ППД свободной подвижной обрабатываемой средой [6], способ магнитодинамической упрочняющей обработки значительно проще и позволяет с наименьшими затратами обрабатывать тонкостенные длинномерные детали с малой площадью сечения и поверхности полых деталей изнутри. Из сравнительного анализа динамических способов упрочняющей обработки ППД видно, что устройства с ВЭМП в наибольшей степени подходят для упрочняющей обработки деталей указанного типа конструкций, это обусловлено конструктивной простотой, низкой стоимостью и достаточно высокой производительностью.

Однако, несмотря на очевидные преимущества предлагаемого метода упрочнения, его практическое применение в технологии изготовления деталей сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору конструктивно-технических характеристик устройств с ВЭМП, геометрических параметров обрабатываемой среды и ее эффективной загрузки для осуществления технологии упрочнения деталей магнитодинамическим методом, а также отсутствием опытно-конструкторских разработок по проектированию технических средств его реализации. Нерешённость этих вопросов предопределяет актуальность и целесообразность данного исследования.

Целью исследования является разработка технологии упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием тонкостенных деталей большой длины в устройствах с ВЭМП, обоснование его технологических возможностей

по обеспечению качества поверхности и производительности процесса

Для достижения поставленной цели в работе решен следующий комплекс задач:

1. Установлены закономерности движения ферромагнитных инденторов во ВЭМП.
2. Разработана модель, определяющая энергетическое состояние ферромагнитных инденторов во ВЭМП.
3. Обоснованы характер ударно-импульсного взаимодействия ферромагнитных инденторов с обрабатываемой поверхностью и их эффективная нагрузка.
4. Установлены зависимости, обеспечивающие оценку параметров качества обработанной поверхности и производительности процесса
5. Разработаны методики проектирования технологических операций отделочно-упрочняющей обработки деталей во ВЭМП.
6. Разработаны рекомендации по проектированию устройств с ВЭМП, а также их технологического оснащения, обеспечивающих эффективное использование на операциях отделочно-упрочняющей обработки деталей.

Анализ закономерностей движения ферромагнитных инденторов во ВЭМП [14] показал, что силы, действию которых подвергаются тела в электромагнитном поле, сводятся к силам, приложенным к электрическим зарядам этих тел. Если ферромагнитные неравноосные инденторы, помещённые в электромагнитное поле, намагничены до насыщения, то их можно рассматривать как элементарные магнитные диполи (рис. 2).

На ферромагнитный индентор, помещённый во вращающееся с угловой скоростью ω и электромагнитной индукцией \vec{B} поле, действует пара сил, стремящаяся повернуть его в направлении внешнего переменного электромагнитного поля.

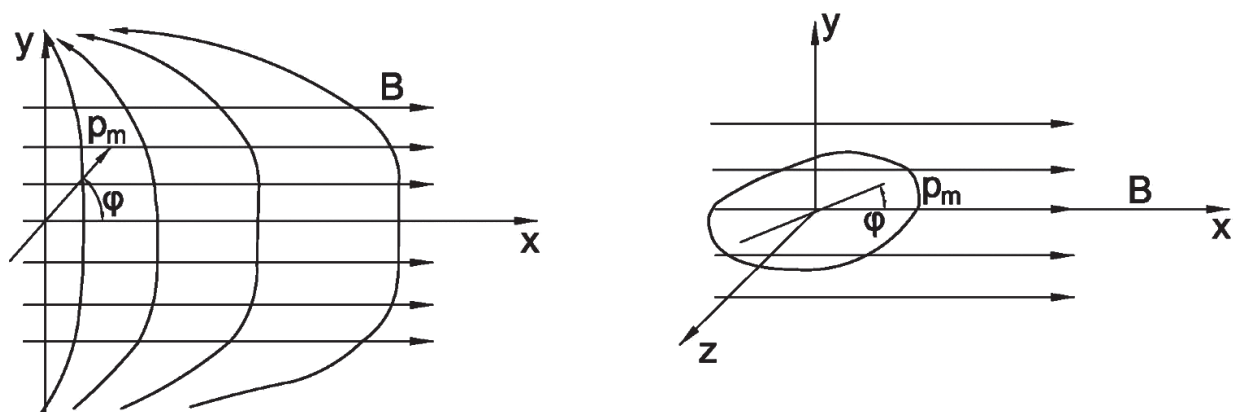


Рис. 2. Ориентация магнитного диполя в электромагнитном поле

Вращающий момент можно оценить из выражения:

$$M_{\text{вр}} = p_m B \sin \varphi, \quad (1)$$

где p_m — магнитный момент ферромагнитного индентора; φ — угол между вектором магнитного момента индентора и вектором электромагнитной индукции.

Кроме того, в неоднородном поле на магнитный индентор действует смещающая (переносная) сила

$$F_{\text{см}} = \chi V B \frac{dB}{dy}. \quad (2)$$

Здесь χ — магнитная восприимчивость материала индентора; V — объём индентора, $V = \pi d^2 l / 4$, где d и l — соответственно диаметр и длина индентора; $\frac{dB}{dy}$ — градиент поля.

С учетом установленного факта, что под действием вращающего момента ферромагнитный индентор вращается в магнитном поле с абсолютной угловой скоростью $\psi_{\text{абс}}$, которая в неподвижной системе координат равна сумме относительной и переносной скоростей, получено уравнение для её определения [15]:

$$\psi_{\text{абс}} = \omega + \frac{\pi d^2 l \bar{B}^2 (\mu - 1)}{4 I \omega \mu} \sin \varphi_0 \sin \omega t, \quad (3)$$

где μ — магнитная постоянная; I — момент инерции ферромагнитного индентора.

Следует отметить, что движение большого количества ферромагнитных неравноосных инденторов, помещённых во вращающееся электромагнитное поле, приводит к формированию магнитооживленного вращающегося слоя, являющегося результатом воздействия на каждый индентор целого комплекса сил и моментов.

Учсть все факторы, обуславливающие движение инденторов в МОВ-слое, и получить при этом приемлемые для практики аналитические зависимости — задача весьма сложная с математической точки зрения. Поэтому для оценки энергетического состояния ферромагнитных инденторов в МОВ-слое использован наиболее универсальный термодинамический подход к описанию процессов подобного типа.

В связи с этим предложено энергетическое соотношение [15], согласно которому для устойчивого процесса магнитооживления вращающегося слоя диссипируемая и проводимая энергия должны быть равны, т.е. должно соблюдаться соотношение

$$\frac{N p_m^2}{2 \pi \omega} \left[\frac{B^2}{I} + \frac{1}{m} \left(\frac{\partial B}{\partial y} \right)^2 \right] = 6 E_{\text{ср}} N \left(1 + \frac{f_{\text{п}}}{m} + \frac{f_{\text{в}}}{I} - \gamma \right), \quad (4)$$

где N — количество инденторов в рабочей зоне, охватываемой электромагнитным вращающимся полем; m — масса индентора; $E_{\text{ср}}$ — средняя энергия одной степени свободы, а усреднение проводится по распределению для соответствующей линейной или угловой скорости; $f_{\text{п}}$ и $f_{\text{в}}$ — соответственно коэффициенты трения при поступательном и вращательном движении; γ — эффективный коэффициент упругости столкновений.

Таким образом, полная энергия единичного индентора, отнесенная к единице времени, может быть записана в виде

$$E = \frac{N p_m}{2 \pi \omega} \left[\frac{p_m}{I} B^2 + \frac{p_m}{m} \left(\frac{\partial B}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Установленные ранее закономерности движения ферромагнитных инденторов в МОВ-слое [15] позволяют обосновать механизм их ударно-импульсных взаимодействий как между собой, так и с поверхностью деталей, находящихся в зоне влияния электромагнитного поля.

Условия, в которых находится ферромагнитный индентор в МОВ-слое, можно охарактеризовать как стеснённые, то есть вращение неравноосного индентора цилиндрической формы с $l/d > 1$ ограничивается двумя условными плоскостями, расстояние между которыми $h < l$ (рис. 3).

В момент соударения линия действия силы образует с нормалью к поверхности угол β . Таким образом, количество энергии, вызывающей упругопластическую деформацию поверхности, можно оценить как произведение

$$E_{\text{уд}} = E_{\text{полн}} \sin \beta. \quad (6)$$

Выразив $\sin \beta$ через отношение h/l , получим

$$E_{\text{уд}} = E_{\text{полн}} h/l, \quad (7)$$

где h — расстояние между поверхностью детали и слоем нижележащих инденторов.

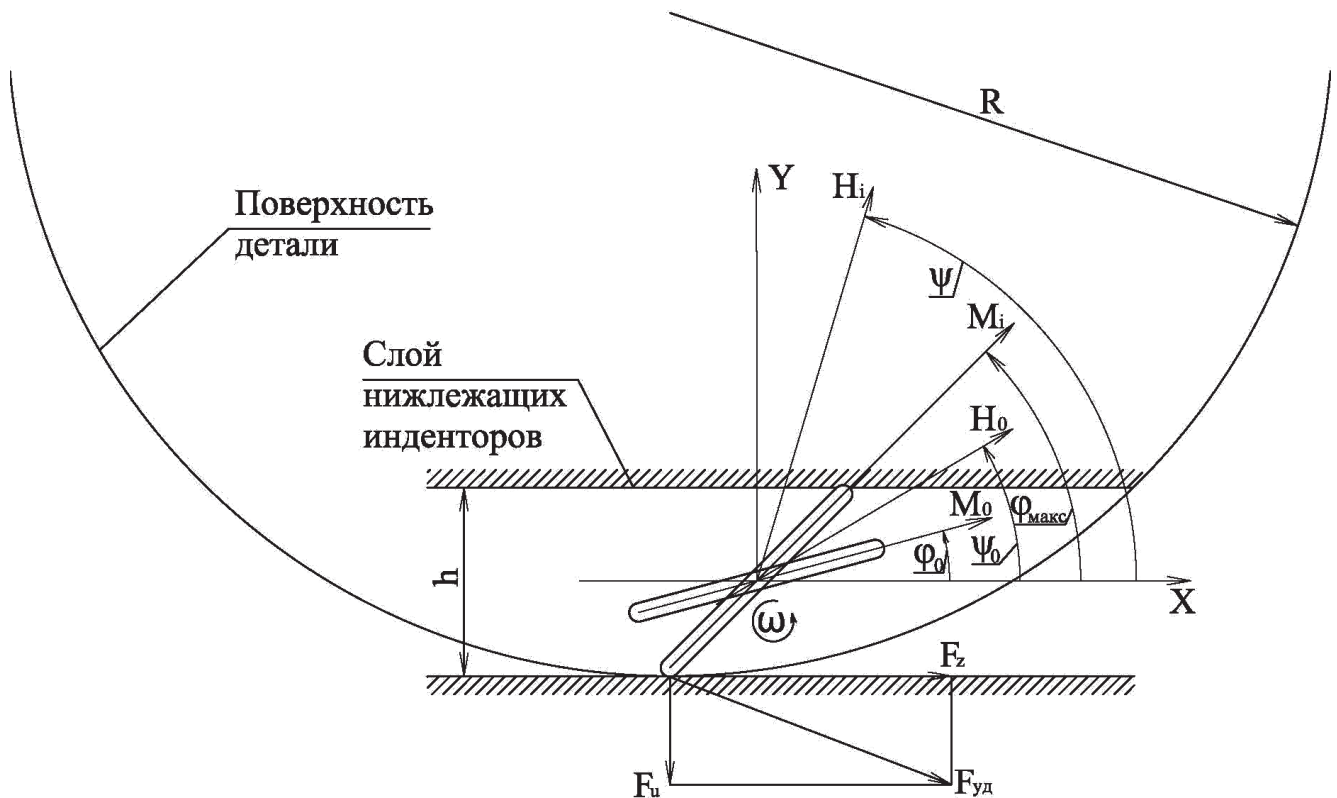


Рис. 3. Схема движения ферромагнитного индентора в МОВ-слое

Из формализованного представления движения ферромагнитных инденторов в МОВ-слое (рис. 4) следует, что по длине рабочей зоны инденторы расположены параллельными элементарными слоями, а в сечении МОВ-слой подразделяется на кольцевые слои, толщина которых соизмерима с длиной ферромагнитного индентора.

Это позволило получить зависимость для расчёта эффективного количества ферромагнитных инденторов в рабочей зоне устройства и представить ее в следующем виде [16]:

$$N = \frac{2\pi i L}{ld} \left[R - \frac{l(i+1)}{4} \right], \tag{8}$$

где L — длина рабочей зоны устройства с ВЭМП; d — диаметр индентора; R — радиус рабочей камеры; i — количество концентрированных окружностей расположения центров вращения ферромагнитных инденторов, определяется из соотношения $i = \frac{R}{l} - 0,5$.

На основании анализа результатов исследований ударно-импульсных систем [17] сделано предположение, что МОВ-слой должен состоять из трех—четырёх кольцевых слоёв, толщина кото-

рых соизмерима с длиной ферромагнитного индентора.

Учитывая, что процесс упругопластической деформации обрабатываемой поверхности носит случайный характер, его можно описать на основе теоретико-вероятностных представлений контактного взаимодействия инденторов с поверхностью [13]. Таким образом, была получена зависимость для расчета продолжительности обработки в функции от интенсивности и кратности покрытия обрабатываемой поверхности следами пластических отпечатков:

$$T_{обр} = \frac{2\pi k}{P\omega}, \tag{9}$$

где k — количество актов силового воздействия ферромагнитных инденторов МОВ-слоя; P — вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности подвергается упругопластической деформации за один период колебания МОВ-слоя в электромагнитном вращающемся поле.

Экспериментальные исследования влияния основных технологических факторов на производительность процесса и качество поверхностного слоя проводились на опытно-экспериментальной установке (рис. 5).

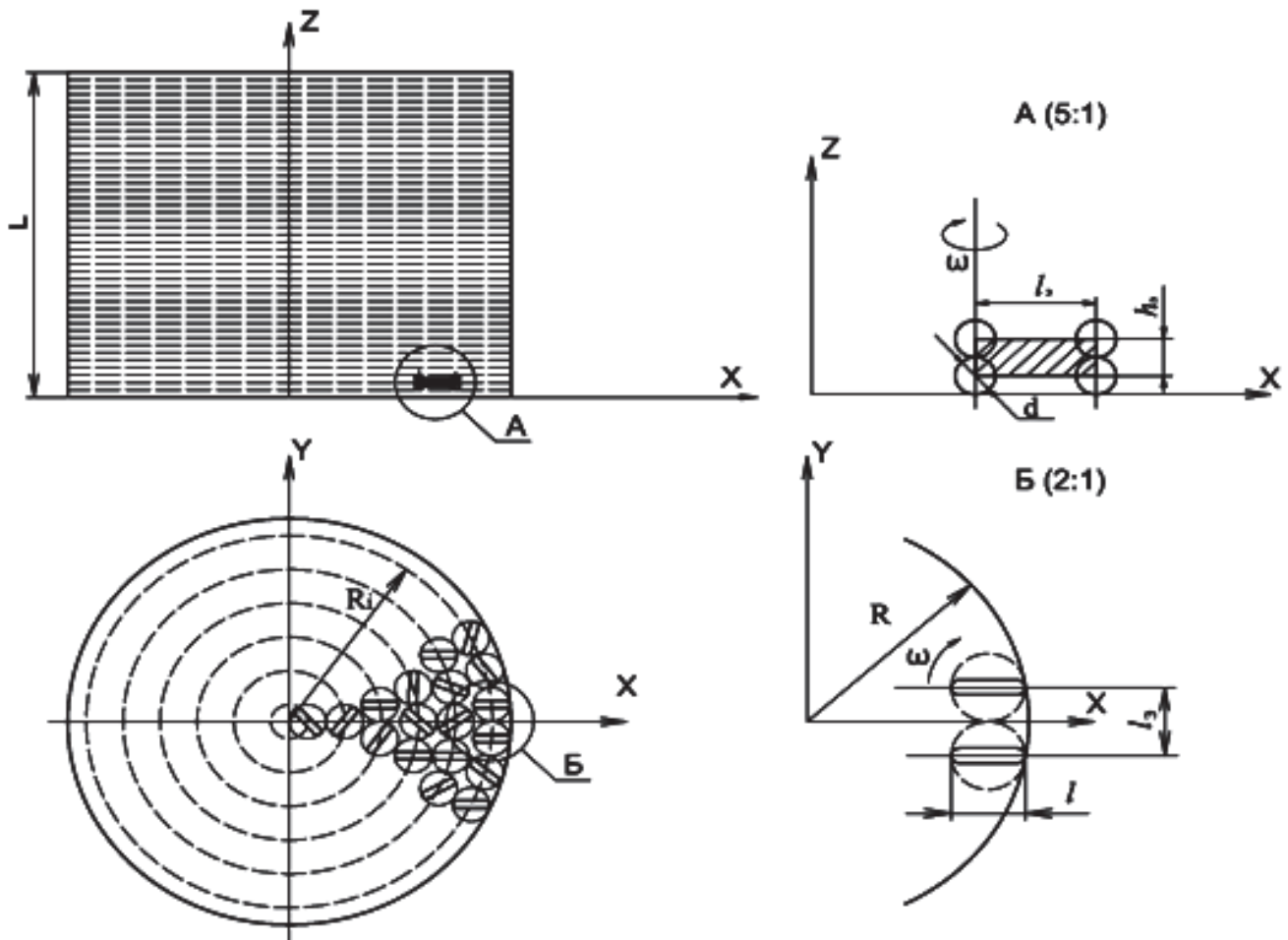


Рис. 4. Формализованная модель процесса перемешивания в МОВ-слое

В качестве материала образцов были приняты алюминиевые сплавы (рис. 6,а). Для обработки использовалась обрабатывающая среда, состоящая из стальных цилиндрических инденторов, изготовленных из стали ШХ15 и 50ХФА (рис. 6,б).

Для оценки влияния вышеуказанных факторов на производительность процесса магнитодинамической обработки была принята степень покрытия поверхности следами пластических отпечатков в установленный промежуток времени. За параметр степени покрытия поверхности следами пластических отпечатков принималось отношение площади пятен контакта $S_{к.э}$, сформированных за установленный промежуток времени, к площади локально выделенного участка обрабатываемой поверхности $S_{э.э}$ (рис. 7):

$$P_{\text{эксп}} = S_{\text{к.э}} / S_{\text{э.э}} \quad (10)$$

В результате проведенных экспериментальных исследований (рис. 8) установлено следующее:

— эффективная нагрузка инденторов, образующих МОВ-слой, в рабочую зону устройства не

превышает трех радиально расположенных кольцевых слоёв, толщина которых соизмерима с длиной индентора, что подтвердило теоретическое предположение, выдвинутое при анализе виброударных систем;

— с увеличением индукции магнитного поля повышается интенсивность процесса и, как следствие, растет производительность обработки (рис. 9);

— оптимальное соотношение геометрических размеров ферромагнитных инденторов (отношение длины к диаметру), при котором достигается наилучший эффект обработки, находится на уровне $l/d = 10$ (рис. 10).

Следующая серия экспериментальных исследований была посвящена исследованию влияния магнитодинамической обработки на качество поверхностного слоя.

Шероховатость поверхности определялась с помощью профилометра SJ-210. Морфологические особенности формируемой в процессе обработки поверхности исследовались в лаборатории

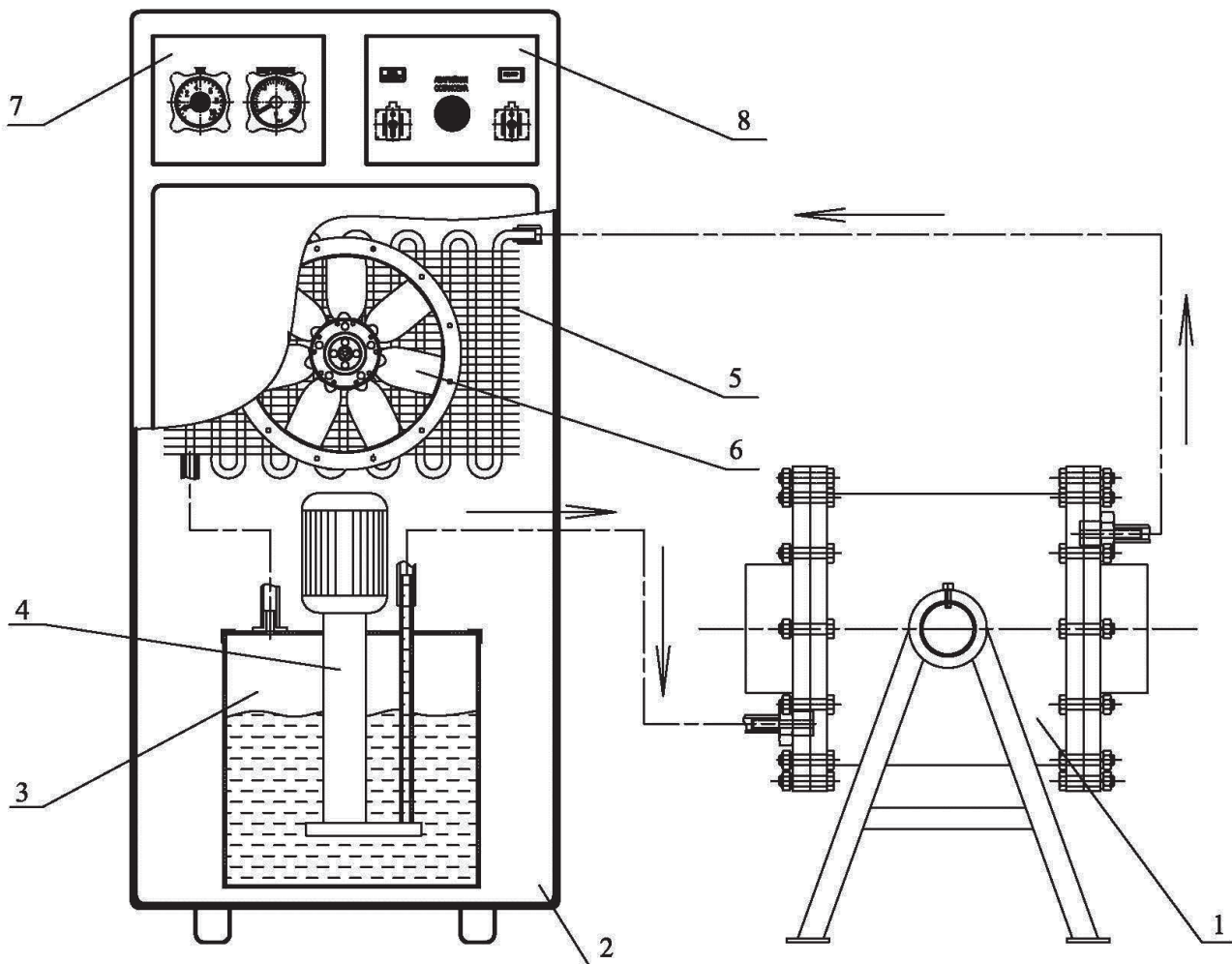


Рис. 5. Опытно-экспериментальная установка для магнетодинамической обработки: 1 — устройство с ВЭМП; 2 — шкаф управления устройством с ВЭМП; 3 — маслобак; 4 — помпа; 5 — теплообменник; 6 — кулер; 7 — панель индикации; 8 — панель управления



а)



б)

Рис. 6. Общий вид образцов, принятых для исследований (а); обрабатывающая среда (б)

«Сканирующий зондовый микроскоп Nanoeducator (NT-MDT)».

Определение остаточных напряжений основано на методе разрезки колец, предложенном

Н.Н. Давиденковым [18]. Он заключается в разрезке кольца вдоль образующей и замере изменения диаметра в результате вырезки.

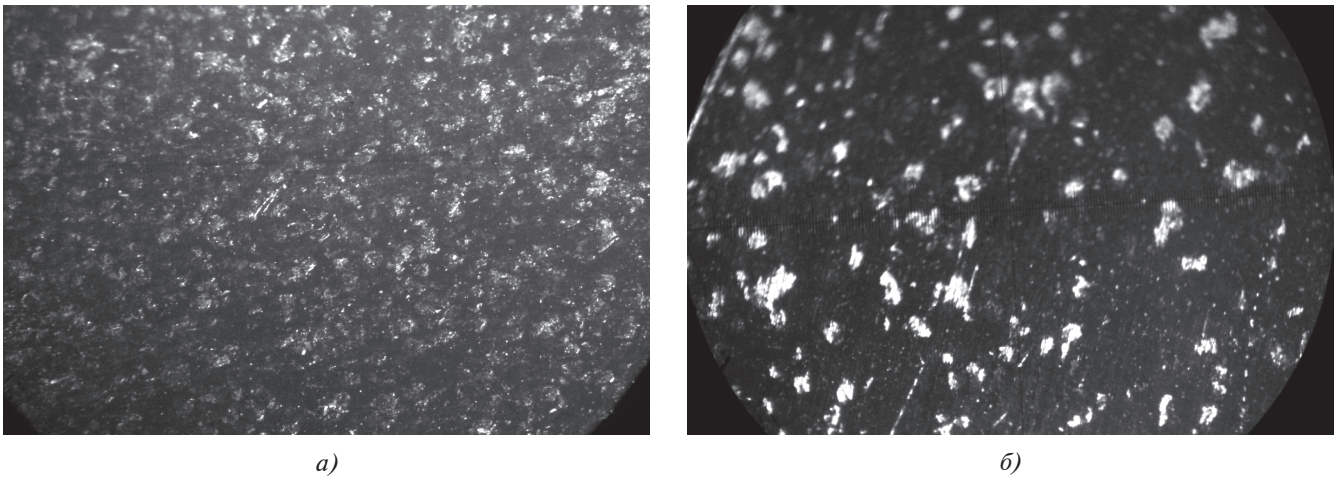


Рис. 7. Локально выделенный участок обрабатываемой поверхности, покрытый следами пластических отпечатков с увеличением: а — 487 крат; б — 250 крат

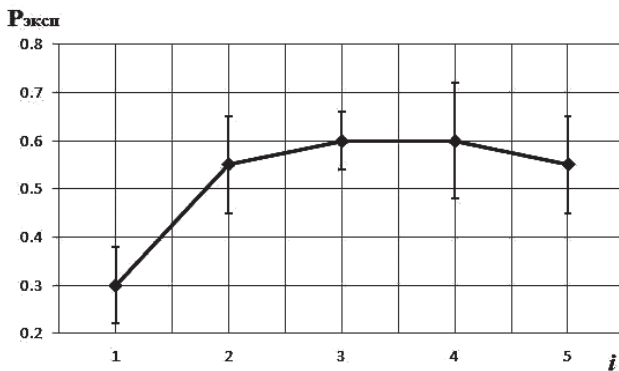


Рис. 8. Зависимость изменения степени покрытия поверхности пластическими отпечатками от количества слоев загрузки инденторов с разным соотношением l/d при $B = 0,1$ Тл, $t = 10$ с

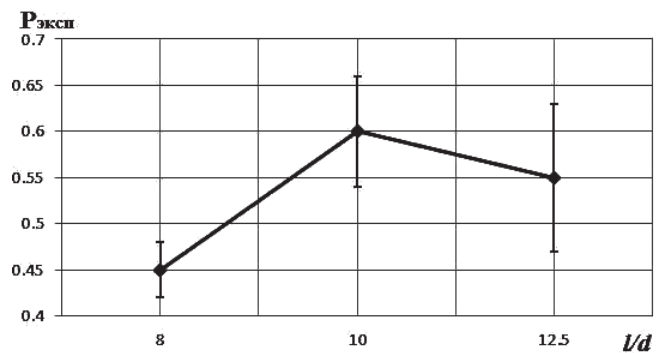


Рис. 10. Влияние геометрического соотношения l/d на изменение степени покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками

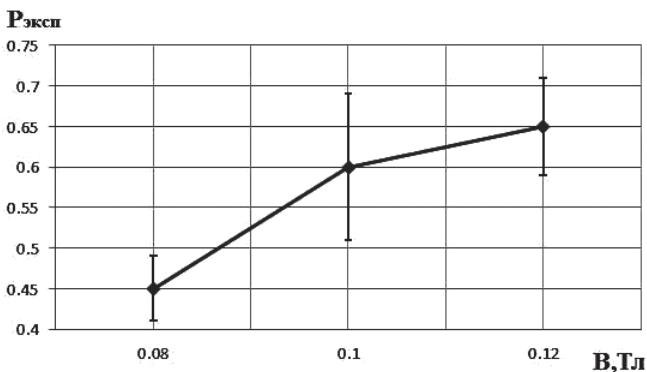


Рис. 9. Влияние магнитной индукции B на изменение степени покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками

На установке Nanotest 600 определяли твердость структурных единиц материала на наноуровне, используя «маятниковый» метод.

Морфологические исследования обработанной поверхности (рис. 11) показали, что в процессе

магнитодинамической обработки, как и при использовании других методов ППД свободными инденторами, формируется качественно новый микрорельеф, характеризующийся более сглаженными выступами и впадинами микронеровностей.

Характер изменения высоты микропрофиля обработанной поверхности зависит от высоты микропрофиля исходной поверхности (рис. 12). Для образцов с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 1,6$ мкм наблюдается её снижение, а для образцов с 0,2 и 0,44 мкм — рост. При этом независимо от исходной высота микропрофиля обработанной поверхности, для выбранных условий обработки, стабилизируется при продолжительности обработки в пределах 3–4 мин, что по кратности покрытия поверхности следами пластических отпечатков находится в пределах 12–14 раз.

Аппроксимация экспериментальных кривых изменения высоты микропрофиля показала, что они адекватно могут быть описаны зависимостью, предложенной в работах Бабичева и Копылова [19, 20]

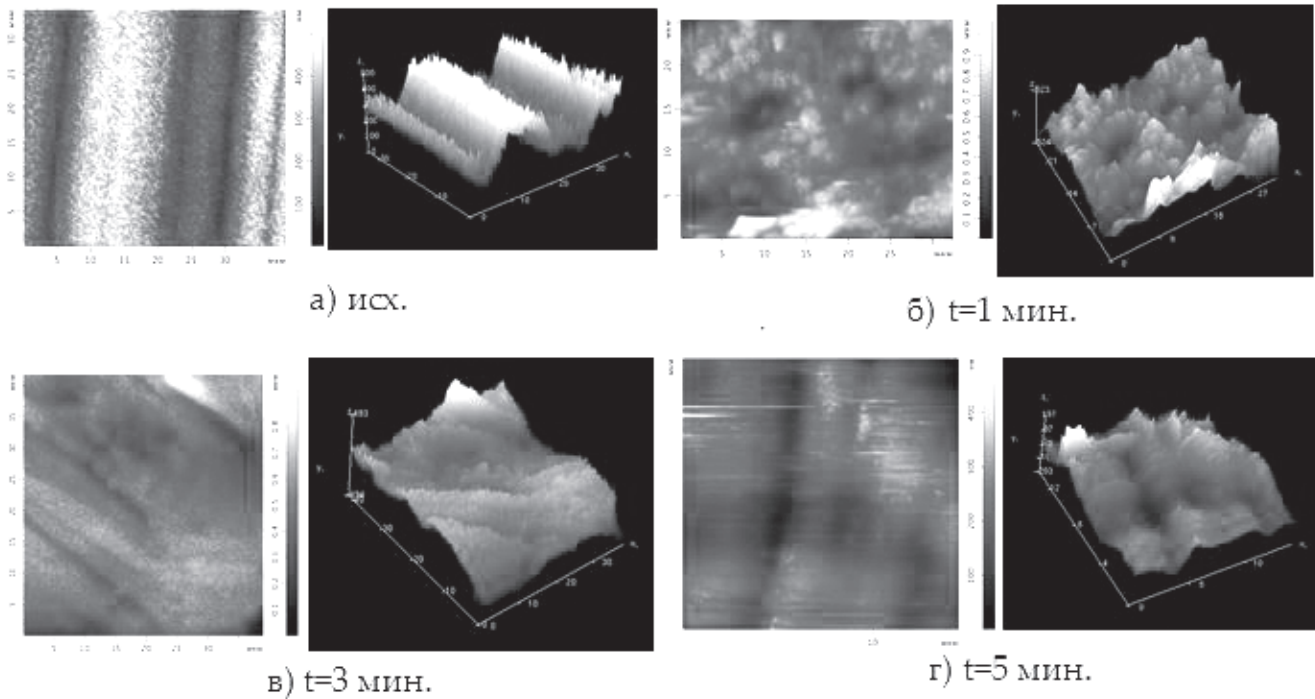


Рис. 11. Изменение морфологии поверхности образцов из Д16Т в зависимости от времени магнитодинамической обработки

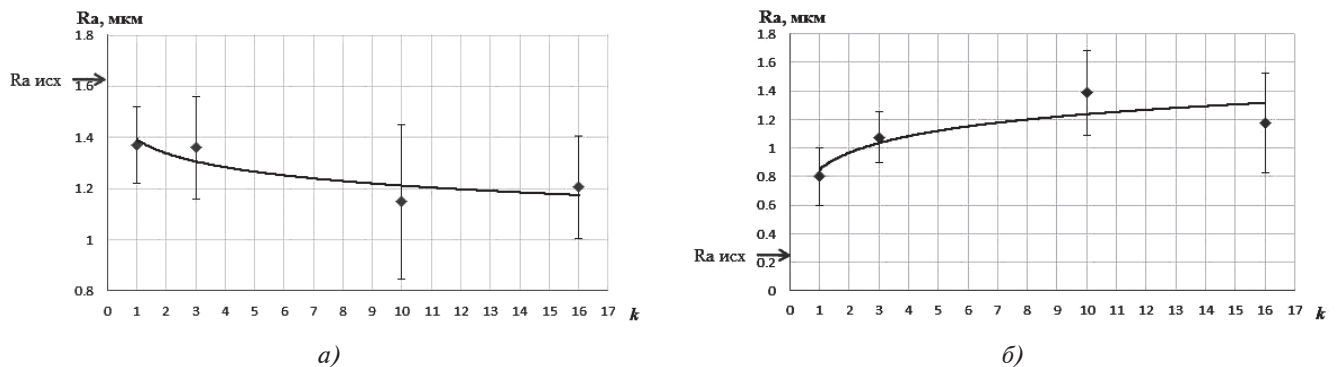


Рис. 12. Изменение высоты микропрофиля поверхности образцов из Д16Т в зависимости от кратности покрытия поверхности следами пластических отпечатков ($l/d = 10$; $i = 3$; $B = 0,1$ Тл): а — $Ra_{исх} = 1,61$ мкм; б — $Ra_{исх} = 0,21$ мкм

при соответствующем уточнении функционала изменения высоты микропрофиля упрочнённой поверхности, исходя из особенностей метода (в частности, специфика контактного взаимодействия и влияния электромагнитного поля на структурно-фазовые изменения, происходящие в поверхностном слое обрабатываемого материала).

Подтверждено предположение, что первый множитель в уточнённой по результатам экспериментальных исследований расчётной зависимости вполне адекватно оценивает высоту микропрофиля обработанной поверхности за время, обеспечивающее однократное её покрытие пластическими отпечатками.

Установлено соотношение [14], связывающее энергетическое состояние инденторов с высотой микропрофиля исходной поверхности, позволяющее оценить характер изменения высоты микропрофиля обработанной поверхности и обосновать вид расчётной зависимости (+ или -)

$$Ra_k = \left[Ra_{исх} \pm \sqrt{\frac{2E}{\pi dHV}} \right] \left(1 - K_{Ra} \frac{d_k}{d} \ln k \right). \quad (11)$$

Сравнительный анализ экспериментальных и расчётных значений высоты микропрофиля обработанной поверхности показал, что их расхождение находится в пределах экспериментальной ошибки.

В ходе экспериментальных исследований физико-механических параметров, формируемых в процессе магнитодинамической обработки поверхностного слоя (рис. 13), установлено, что с увеличением времени обработки микротвердость поверхности растет до определенного предела и стабилизируется на этом уровне. Отмечено, что максимальное упрочнение образцов, для выбранных условий обработки, достигается при в пределах 3–4 мин, что соответствует 12-, 14-кратному покрытию поверхности следами пластических отпечатков.

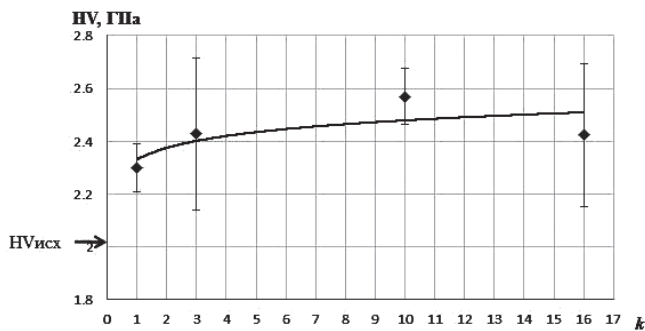


Рис. 13. Изменение микротвёрдости поверхности в зависимости от кратности сплошного покрытия следами пластических отпечатков

Дальнейшее увеличение времени обработки не приводит к росту микротвердости, что подтверждает экспериментально установленный факт: подвергаемый упрочнению материал имеет ограниченную способность к аккумулярованию энергии деформации.

Аналогичные закономерности установлены при исследовании изменения напряжённого состояния поверхностного слоя (рис. 14). Максимальные остаточные сжимающие напряжения, представленные на графике, по абсолютной величине растут до определенного предела.

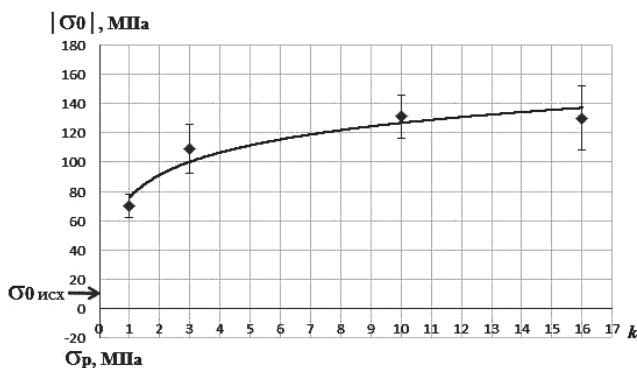


Рис. 14. Изменение максимальных остаточных сжимающих напряжений поверхности в зависимости от кратности сплошного покрытия следами пластических отпечатков

Как показал сравнительный анализ, разница между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 20%, а это говорит о том, что предложенные расчетные зависимости для оценки физико-механических параметров качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки, вполне адекватны и могут быть использованы на практике.

Аналитические модели оценки микротвердости поверхности и ее напряжённого состояния в процессе магнитодинамической обработки представлены следующими выражениями [14]:

$$HV_k = \left[\sqrt{\frac{32E}{\pi d^3}} HV \right] \left(1 + K_{HV} \frac{d_k}{d} \ln k \right); \quad (12)$$

$$\sigma_{ok} = \left[0,481 \left(\frac{E}{(r_{np})^3} \right)^{0,2} \right] k_{\mu}^{0,8} \left(1 + K_{\sigma_o} \frac{d_k}{d} \ln k \right). \quad (13)$$

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны методика расчёта технологических характеристик магнитодинамической обработки, методика расчёта параметров качества поверхностного слоя, формируемого в процессе магнитодинамической обработки, и предложен алгоритм проектирования операции магнитодинамической обработки [19] (рис. 15), а также представлены рекомендации по обоснованию конструктивных и технических характеристик устройств для магнитодинамической обработки [20].

Процесс магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей может быть реализован на установке проходного типа, принципиальная схема которой показана на рис. 16.

Разработанный магнитодинамический метод предложен в качестве альтернативного метода упрочнения длинномерных деталей. В ТАНТК им. Г.М. Бериева для упрочнения деталей по существующей технологии используется установка дробеметного упрочнения УДП-2,5 предприятия-изготовителя ОАО «Электромеханика». Ввиду отсутствия другого оборудования на ТАНТК все детали, включая мелкогабаритные, упрочняются на этом оборудовании.

Технико-экономические преимущества магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей приведены в таблице.

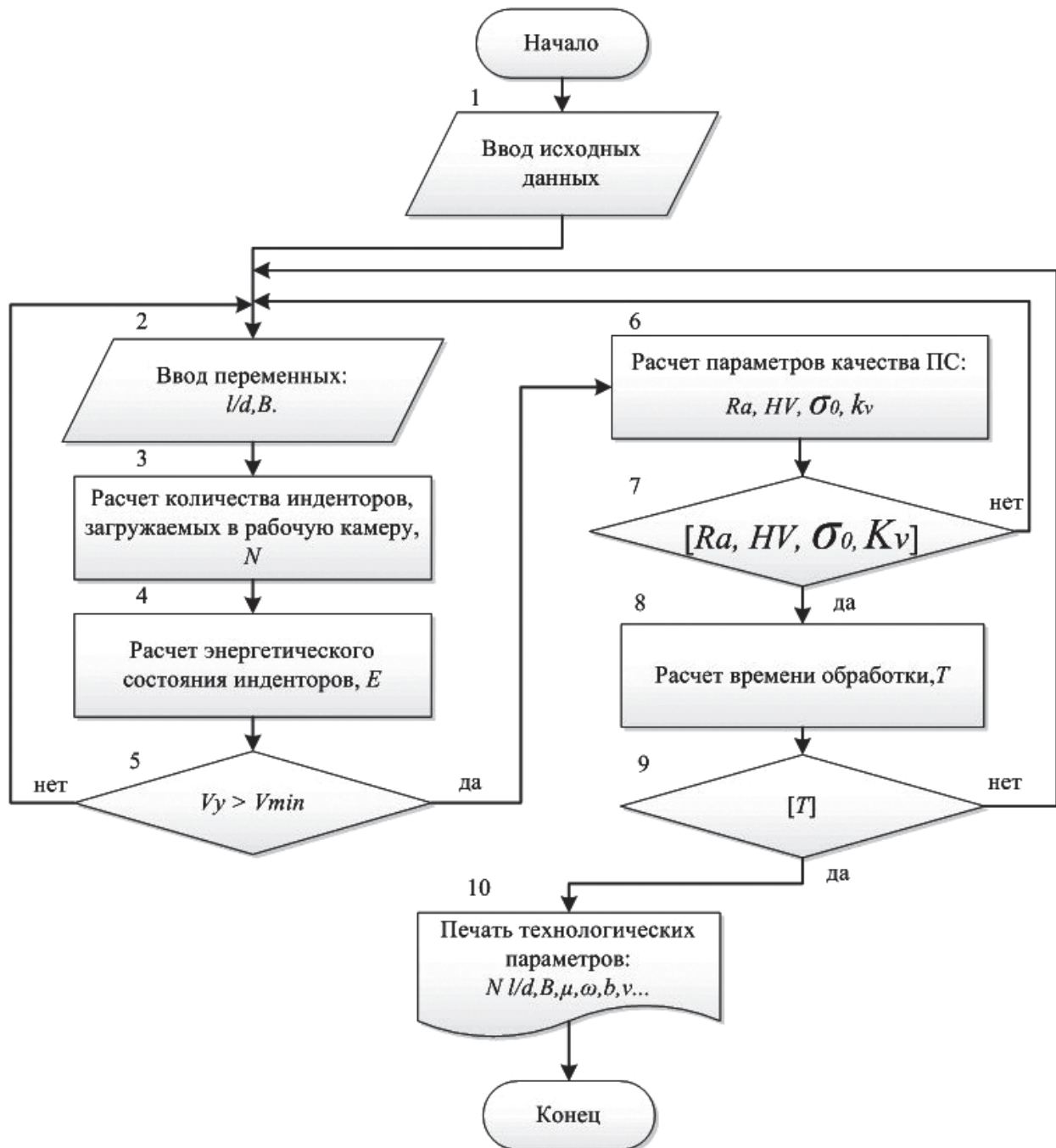


Рис. 15. Алгоритм проектирования операции магнитодинамической обработки

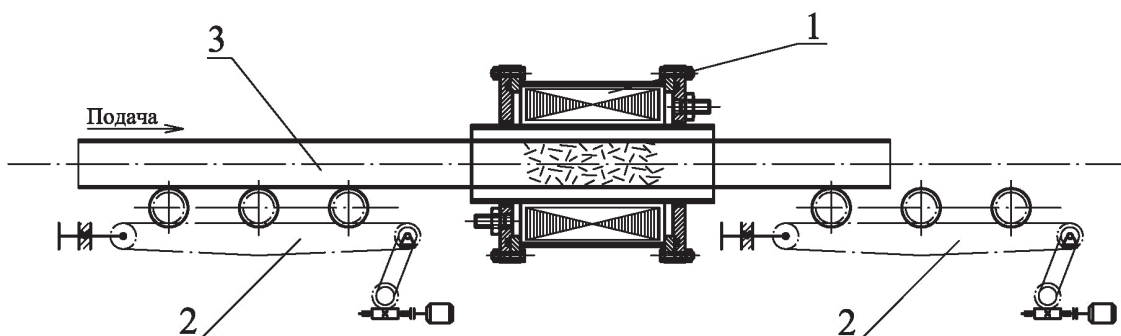


Рис. 16. Схема обработки длиномерных деталей: 1 — рабочий блок устройства с ВЭМП; 2 — приводной роликовый рольганг; 3 — деталь

**Сравнительный анализ технических характеристик установок
для упрочнения длинномерных деталей типа «пояс верхний»**

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	Установка УДП-2,5	Установка на базе устройства с ВЭМП
1	Напряжение питающей сети	В	380	380
2	Номинальная частота	Гц	50	50
3	Число фаз	—	3	3
4	Установленная мощность	кВт	185	7
5	Габаритные размеры обрабатываемого изделия:			
	длина		6500	14000
	ширина	мм	400	150
	высота		1600	150
6	Материал изделия	—	АК-4-1чТ В95пчТ1, -Т2,-Т3, 1163	Все немагнитные сплавы
7	Размер обрабатываемой среды	мм	Дробь Ø2 мм	Цилиндры $l/d = 8-12$ $d=1-3$ мм
8	Скорость перемещения изделия	м/мин	0,5-5	В зависимости от длины технологической зоны рабочей камеры
9	Производительность (по обрабатываемой среде)	кг/мин	210	0,1
10	Объем загрузки	кг	5000	1-15
11	Уровень шума, не более	дБА	80	80
12	Габаритные размеры установки:			
	длина		36000	720
	ширина	мм	6400	880
	высота		8800	1100

Как видно из таблицы, упрочнение длинномерных деталей в установке проходного типа, реализующей магнитодинамический метод обработки, по сравнению с существующей технологией упрочнения на УДП-2,5 позволит снизить материалоёмкость и энергоёмкость оборудования в восемь раз, сократить технологическое время обработки, сократить вспомогательное время на установку и, как следствие, повысить производительность процесса упрочнения на 30%, обеспечив параметры качества поверхностного слоя, регламентируемые техническими требованиями.

Выводы

1. Применение ВЭМП в качестве источника энергии неравноосных свободнодвижущихся ферромагнитных инденторов является базой для разработки и совершенствования нового метода упрочняющей обработки деталей, называемой магнитодинамической обработкой.

2. Магнитодинамическая обработка расширяет возможности упрочняющей обработки свободнодвижущимися инденторами и обеспечивает повышение эффективности упрочняющей обработки

поверхности деталей изнутри и тонкостенных деталей большой длины.

3. Технологический эффект магнитодинамической упрочняющей обработки обусловлен движением большого числа ферромагнитных свободнодвижущихся инденторов, помещенных в ВЭМП, формирующих магнитоожигенный вращающийся слой, который взаимодействует с поверхностным слоем обрабатываемых деталей и является результатом влияния на каждый ферромагнитный свободнодвижущийся индентор целого ряда сил и моментов.

4. Доказано, что для устойчивого процесса магнитоожигения вращающегося слоя подводимая и диссипируемая энергии должны быть приравнены. Таким образом, магнитоожигенный вращающийся слой перейдет из магнитоожигенного состояния в твердую фазу, когда индукция ВЭМП будет ниже 0,08 Тл.

5. На основе моделирования энергетического баланса получена зависимость для оценки энергетических характеристик ферромагнитных свободнодвижущихся инденторов в ВЭМП, позволяющая обосновать силовые условия импульсного воздействия, которые обеспечивают пластическую деформацию в зоне контакта индентора с обрабатываемой поверхностью и, как следствие, развитие упрочняющего эффекта.

6. Характер энергосилового воздействия инденторов на обрабатываемый поверхностный слой зависит от степени их стесненного состояния в МОВ-слое. Экспериментально подтверждено, что в рабочей камере устройства должно быть не более трех концентрично расположенных кольцевых слоёв ферромагнитных свободнодвижущихся инденторов при толщине слоя, соизмеримой с длиной индентора.

7. На основе теоретико-вероятностных представлений определена зависимость, позволяющая прогнозировать продолжительность магнитодинамической упрочняющей обработки и, соответственно, оценить производительность процесса.

8. Представленные для определения параметров качества упрочненной в процессе обработки магнитодинамическим методом поверхности аналитические зависимости с достаточной достоверностью определяют влияние на ее формирование энергетического состояния и размеров ферромагнитных инденторов, исходного состояния геометрических характеристик поверхности, а также механических свойств материала, подвергаемого обработке. В результате исследований показано, что представленные аналитические зависимости

с погрешностью 10—15% могут быть использованы при проектировании технологии магнитодинамической упрочняющей обработки деталей.

9. Разработан алгоритм, определяющий технологические условия обработки, даны рекомендации по конструктивному исполнению устройств с ВЭМП, на основе которых возможно формализовать проектирование операций упрочняющей обработки магнитодинамическим методом, что способствует повышению эффективности процесса технологической подготовки производства в САПР ТП.

10. Использование установок проходного типа, реализующих магнитодинамический метод ППД, по сравнению с имеющейся на ТАНТК им. Г.М. Бериева технологией упрочнения на УДП-2,5, позволяет существенно снизить энергоёмкость и материалоемкость оборудования, уменьшить технологическое время обработки, сократить вспомогательное время на установку деталей и таким образом повысить производительность процесса упрочнения, обеспечив при этом параметры качества поверхностного слоя, регламентируемые техническими требованиями.

Библиографический список

1. Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Методы мониторинга надежности технических систем // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 4. С. 72-80.
2. Бирюков В.И., Пронин О.Ю., Радченко А.В. Алгоритм прогнозирования надежности изделий авиационной и ракетно-космической техники на стадии проектирования // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 72-79.
3. Полянский В.В., Нестеров В.А. Оценка изменения надежности конструкции планера с механическими повреждениями // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 32-39.
4. Комков В.А., Кокорева О.Г., Курсаков А.В. Исследование возможностей упрочнения поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 132-136.
5. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2006. — 182 с.
6. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. — Таганрог: ТРТУ, 2006. — 126 с.
7. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2004. — 287 с.

8. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 194 с.
9. Lebedev V.A., Kirichek A.V., Sokolov V.D. Energy State of a Plastically Deformed Surface Layer // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering. 2016. Vol. 150, pp. 775–781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.106
10. Babichev A.P., Hamouda K., Meguid S.A., Gomes J.F.S. Process for treatment surface by using granular vibro-impact // 6th International conference on mechanics and materials in design (26-30 July 2015, P. Delgada, Portugal). 2015. No. 1, pp. 499-500.
11. Djema M.A., Hamouda K., Sayah T., Babichev A.P., Saidi D., Benallal M.N. Improvement of surface quality and parts functional ability by vibro-mechanical consolidation treatment and finishing // Defect and Diffusion Forum. 2012. Vols 326-328, pp. 153-157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.153
12. Kirichek A.V., Altukhov A.Yu., Solovyov D.L. Theoretical studies of laws nanostructuring and heterogeneous hardening of steel samples by wave intensive plastic deformation // Journal of nano- and electronic physics. 2015. Vol. 7. No. 4, p. 4082.
13. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Korol'kov Yu.V., Rozhnenko O.A. More effective centrifugal-rotary machining in an abrasive medium // Russian engineering research. 2009. Vol. 29. No. 5, pp. 518-521. DOI: 10.3103/S1068798X09050219
14. Кочубей А.А., Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Черунова И.В. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле: Монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во Донского государственного технического университета, 2018. – 135 с.
15. Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А., Чумак И.В. Энергетические аспекты упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля // Научно-технические проблемы машиностроения. 2016. № 6(60). С. 35-42.
16. Лебедев В.А., Кочубей А.А., Чаава М.М., Чумак И.В. Оценка производительности упрочняющей обработки свободными инденторами в условиях вращающегося электромагнитного поля // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7(139). С. 19-24.
17. Лебедев В.А., Серге Г.В., Кочубей А.А. Закономерности процесса упрочнения деталей гранулированными средами в виброударных технологических системах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 6(314). С. 78-81.
18. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в дисках // Заводская лаборатория. 1959. № 3.
19. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии: Монография. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
20. Копылов Ю.Р. Вибрационное упрочнение: Монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.

PHYSICO-TECHNOLOGICAL BASICS OF AIRCRAFT LONG PARTS HARDENING IN THE DEVICES WITH ROTATING MAGNETIC FIELD

Kochubei A.A.^{1*}, Vernigorov Yu.M.^{2**}, Demin G.V.^{2***}

¹ Beriev Aircraft Company,
1, Aviatorov sq., Taganrog, 347923, Russia

² Don State Technical University,
DSTU, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russia

* e-mail: watchbox@mail.ru

** e-mail: jvernigorov@donstu.ru,

*** e-mail: georgijdstu@yandex.ru

Abstract

The article gives an account of the studies of hardening treatment of long thin-walled parts employing imposition of magneto-dynamic effect. It presents characteristics of movement of the ferromagnetic indenters moving freely in rotating magnetic field (REMF) and thermodynamic model, which determines energy characteristics of ferromagnetic indenters moving freely in REMF. The article describes characteristics of its impulse function

on the processed surface, as well as the degree of their effective loading. It presents analytical dependencies, allowing objectively ensure prediction of the surface layer parameters of quality while its forming, and productivity of magneto-dynamic hardening treatment. A technique for technological process developing of parts treatment operation with magnetodynamic effect imposition. Recommendations on the design of devices with REMF, as well as

technological outfit means, allowing enhancing efficiency of their employing in the parts hardening treatment technology, are given.

The purpose of the study consists in developing a hardening treatment technology by surface plastic deformation of long thin-walled parts with magneto-dynamic effect imposition and practical recommendations on its application.

The following conclusions were made by the results of the conducted study:

1. The rotating electromagnetic field application as an energy source of the freely moving ferromagnetic indenters is the basis for developing and improving of a new method for parts hardening treatment, called magneto-dynamic processing.

2. Magneto-hydrodynamic treatment enhances technological capabilities of hardening treatment by freely moving indenters, and ensures efficiency increasing of finishing-strengthening treatment of the inner cavities of long thin parts.

3. Technological effect of the magneto-dynamic processing is stipulated by the motion of a large number of ferromagnetic freely moving indenters, placed into the REMF, forming in gross amount a magneto-liquefied moving layer. This layer interacts with the surface layer of the processed parts, being the result of the effect on each ferromagnetic freely moving indenter of the whole row of forces and moments.

4. It was proved that for stable magneto-liquefaction process of the rotating layer both input and dissipated energies should be set equal in such a way that the magneto-liquefied moving layer would transfer from liquefied phase to a hard one under condition when the REMF induction would be less than 0.08 Tl.

5. Based on the energy balance modelling the dependency for energy characteristics evaluation of ferromagnetic indenters freely moving in the REMF was obtained. It allows substantiate the force conditions of the shock-pulse impact, which ensure plastic deformation in contact zone of indenter with the processed surface and, as a consequence, the hardening effect development.

6. The nature of the energy-force action of indenters on the processed surface layer depends on the degree of their constricted state in the MRF layer. It was confirmed experimentally that the loading quantity of freely moving ferromagnetic indenters, which formed the MRF layer, into the processing chamber of the device should not exceed three concentrically arranged layers, commensurable with the indenter length.

7. Based on theoretical and probabilistic representations, the dependence allowing predicting duration of the magneto-dynamic hardening treatment and correspondingly evaluate the process productivity was obtained.

8. The presented analytical dependencies for determining quality parameters of the surface hardened while magneto-dynamic method processing determine with adequate fidelity the effect of energy condition and size of ferromagnetic indenters, the initial state of the surface geometry, as well as mechanical properties of the material, subjected to the treatment, on their formation. The results of the studies demonstrate that the presented analytical dependencies can be employed while developing magneto-dynamic parts hardening treatment technology with with an accuracy to 10–15%.

9. An algorithm, determining technological conditions of treatment was developed. Recommendations are given on embodiment of the devices with REFM, on which basis formalization of operations for hardening procession by magneto-dynamic method are possible. It contributes to effectiveness enhancing of the production planning process employing CAD TP

10. Application of feed-through type installations, realizing magneto-dynamic processing method compared to the existing hardening technology with UPD-2.5 allows significantly decrease both energy and materials consumption of the equipment, reduce technological processing time, decrease auxiliary time on parts setting and, thus, increase the productivity of hardening process, ensuring herewith quality parameters of the surface layer, regulated by technical requirements.

Keywords: magneto-dynamic treatment, hardening, surface quality parameters, surface plastic deformation (SPD), rotating electromagnetic field (REMF), ferromagnetic indenter, magnetically fluidized rotating (MFR) layer.

References

1. Zolotov A.A., Nurullaev E.D. The monitoring methods for technical systems reliability. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 72–80.
2. Biruykov V.I., Pronin O.Yu., Radshenko A.V. Prediction algorithm for aviation products and space-rocket technics reliability at the design stage. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 72–79.
3. Poliansky V.V., Nesterov V.A. Estimation of reliability alteration for airframe configuration with mechanical damage. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 32–39.

4. Komkov V.A., Kokoreva O.G., Kursakov A.V. Investigation of possibilities to harden thin-wall elements of flying vehicles by surface plastic deformation. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 132-136.
5. Lebedev V.A. *Tekhnologiya dinamicheskikh metodov poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* (Technology of dynamic methods of surface plastic deformation), Rostov-na-Donu, Izdatel'skii tsentr DGTU, 2006, 182 p.
6. Butenko V.I. *Lokal'naya otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostei detalei mashin* (Local finishing-strengthening processing of machine parts surfaces), Taganrog, TRTU, 2006, 126 p.
7. Kirichek A.B., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. *Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoi obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* (Technology and equipment for static-impulse processing by surface plastic deformation), Moscow, Mashinostroenie, 2004, 287 p.
8. Shevtsov S.N. *Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki granulirovannykh sred v vibratsionnykh tekhnologicheskikh mashinakh* (Computer modeling of granular media dynamics in vibration technological machinery), Rostov-na-Donu, SKNTs VSh, 2001, 194 p.
9. Lebedev V.A., Kirichek A.V., Sokolov V.D. Energy State of a Plastically Deformed Surface Layer. *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 775–781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.106
10. Babichev A.P., Hamouda K., Meguid S.A., Gomes J.F.S. Process for treatment surface by using granular vibro-impact. *6th International conference on mechanics and materials in design (26-30 July 2015, P. Delgada, Portugal)*. 2015, no. 1, pp. 499-500.
11. Djema M.A., Hamouda K., Sayah T., Babichev A.P., Saidi D., Benallal M.N. Improvement of surface quality and parts functional ability by vibro-mechanical consolidation treatment and finishing. *Defect and Diffusion Forum*, 2012, vols 326-328, pp. 153-157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.153
12. Kirichek A.V., Altukhov A.Yu., Solovyov D.L., Theoretical studies of laws nanostructuring and heterogeneous hardening of steel samples by wave intensive plastic deformation. *Journal of nano- and electronic physics*, 2015, vol. 7, no. 4, p. 4082.
13. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Korol'kov Yu.V., Rozhnenko O.A. More effective centrifugal-rotary machining in an abrasive medium. *Russian engineering research*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 518-521. DOI: 10.3103/S1068798X09050219
14. Kochubey A.A., Lebedev V.A., Vernigorov Yu.M., Davidova I.V. *Uprochnenie dlinnomernykh detaley vo vrashayushemsya elektromagnitnom pole* (Hardening of long parts in a rotating electromagnetic field), Rostov-on-Don, DGTU, 2018, 135 p.
15. Lebedev V.A., Vernigorov Yu.M., Kochubey A.A., Chumak I.V. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2016. no. 6(60), pp. 35-42.
16. Lebedev V.A., Kochubey A.A., Chaava M.M., Chumak I.V. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2016, no. 7(139), pp. 19-24.
17. Lebedev V.A., Serga G.V., Kochubey A.A. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2015, no. 6(314) pp. 78-81.
18. Davidenkov N.N. *Zavodskaya laboratoriya*, 1959, no. 3.
19. Babichev A.P., Babichev I.A. *Osnovy vibratsionnoy tekhnologii* (Basics of vibration technology), Rostov-on-Don, DGTU, 2008, 694 p.
20. Kopylov Yu.R. *Vibratsionnoe uprochnenie* (Vibrational hardening), Voronezh, VIVD, 1999, 386 p.