

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793.044(045)(476)

Довгалев А.М.*Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ДЕТАЛИ ГЛАДКИМ ШАРОМ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОМ НАКАТЫВАНИИ**

Аннотация. В работе представлена математическая модель упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким шаром при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Модель учитывает комплексное магнитно-силовое воздействие на исходную шероховатость поверхности и позволяет установить зависимость глубины внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса совмещенного упрочнения. Выполнено моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной обработке ферромагнитной детали, получена аналитическая зависимость для определения глубины упрочненного поверхностного слоя.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, деформирующий шар, импульсно-ударное деформирование, ударная сила, давление в контакте, площадь контакта, магнитное поле, шероховатость поверхности, глубина внедрения шара.

Dovgalev A.M.*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus***SIMULATION OF SURFACE DEFORMATION PRODUCED BY SMOOTH
BALL UNDER COMBINED MAGNETODYNAMIC TREATMENT**

Abstract. The paper presents a mathematical model of elastic-plastic deformation of surface micro-roughness of a non-rigid ferromagnetic component produced by a smooth ball under combined treatment with a rotating magnetic field and pulsed impact deformation. The model takes into account the combined action of the magnetic field and impacts on the initial surface roughness, which makes it possible to determine dependence of penetration depth of a smooth deforming ball in the surface on physical and mechanical properties of the component material and combined treatment parameters. The process of surface roughness generation during the combined treatment of ferromagnetic components has been modeled, and an analytical dependence for determining the depth of the hardened surface layer has been obtained.

Keywords: finishing and strengthening treatment, deforming ball, pulsed impact deformation, impact force, contact pressure, contact area, magnetic field, surface roughness, penetration depth of the ball.

Введение. При изготовлении машин и оборудования для горнодобывающей отрасли большое внимание уделяется вопросам повышения их долговечности [1, 2].

Решение указанной задачи обеспечивают повышением качественных характеристик входящих в их состав ответственных деталей, как правило, на основе применения технологий поверхностного упрочнения. Для отделочно-упрочняющей обработки дета-

лей широкое применение находят статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования [3].

В настоящее время перспективными являются разработка и применение методов отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих комплексное энергетическое воздействие на поверхность упрочняемых деталей с целью повышения их качественных характеристик и эксплуатационных свойств.

Комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей (далее – деталей) обеспечивает разработанный метод совмещенного магнитно-динамического накатывания, в соответствии с которым на поверхностный слой одновременно воздействуют вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,05-1,20 Тл и многократным импульсно-ударным деформированием, осуществляемым колеблющимися деформирующими шарами инструмента [4-7]. Метод совмещенного магнитно-динамического накатывания обеспечивает: интенсивное снижение исходной шероховатости поверхности по параметру R_a с 6,3-0,40 мкм до 0,60-0,05 мкм; получение на детали модифицированного слоя глубиной 10-25 мкм и наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5-3,0 мкм; повышение износостойкости поверхности деталей в 3,0-4,9 раза [8, 9].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время (в связи с технической новизной предложенного метода совмещенного магнитно-динамического накатывания) отсутствуют математические зависимости взаимосвязи режимов процесса совмещенного упрочнения и конструктивных параметров комбинированного инструмента с характеристиками качества упрочняемого поверхностного слоя детали. Это не позволяет получить научно-обоснованные рекомендации по назначению режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания и осуществлять прогнозирование параметров качества упрочняемых деталей на стадии проектирования операции отделочно-упрочняющей обработки.

В связи с этим актуальной является разработка математической модели упруго-пластического деформирования поверхности гладким шаром, а также моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной обработке деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Математическое моделирование деформирования поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким шаром.

Рассмотрим упругопластическую модель внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность нежесткой ферромагнитной детали, имеющей исходную шероховатость $Rz_{исх}$.

Величину среднего давления q в контакте при внедрении гладкого деформирующего шара в пластическое полупространство при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием определяем по зависимости [10-12]:

$$q = \frac{N_n}{A_r}, \quad (1)$$

где N_n – максимальное значение нормальной ударной силы деформирования;

A_r – фактическая площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали.

Фактическая площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали равна [13]:

$$A_r = A_k \frac{t_{pk}}{100\%}, \quad (2)$$

где A_k – контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали;
 t_{pk} – относительная контактная длина профиля исходной шероховатости поверхности детали.

Контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали равна [14]:

$$A_k = 2\pi R_{ш} \cdot h_{вн},$$

где $R_{ш}$ – радиус деформирующего шара;

$h_{вн}$ – глубина внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали.

В связи с наличием подачи инструмента при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием имеет место асимметричное воздействие сферической гладкой поверхности деформирующего шара на исходную шероховатость поверхности детали. В результате контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с деталью уменьшается в два раза и составляет:

$$A_k = \pi R_{ш} \cdot h_{вн}. \quad (3)$$

Максимальное значение нормальной ударной силы деформирования равно [15]:

$$N_n = \frac{2m}{T_n}(U_n - V_n), \quad (4)$$

где m – масса деформирующего шара;

V_n и U_n – нормальная скорость деформирующего шара до и после удара (до и после взаимодействия с упрочняемой поверхностью детали);

T_n – время нормального удара деформирующего шара [16]:

$$T_n = 2,943 \left(\frac{5m}{4K} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot V_n^{-\frac{1}{5}}. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности K вычисляем по зависимости [16]:

$$K = \frac{2E}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{R_{ш} \cdot R_{д}}{R_{ш} \pm R_{д}}}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости (для стали $E = (2,0 \dots 2,1) \cdot 10^5$ МПа);

μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,25-0,35$);

$R_{д}$ – радиус поверхности упрочняемой детали.

Знак «+» принимают при обработке наружных, а «-» – при обработке внутренних поверхностей вращения.

Масса деформирующего шара равна [17]:

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi R_{ш}^3, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала деформирующего шара.

После подстановки в уравнение (1) выражений (2-4), (7) имеем:

$$q = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}}. \quad (8)$$

Проведенные многочисленные экспериментальные исследования внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали при совмещенной обработке

вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием показали, что требуемая величина среднего давления в контакте (вследствие магнитного воздействия на материал упрочняемой детали) уменьшается на величину коэффициента k_m (коэффициент k_m определяют экспериментально для материала упрочняемой детали).

Тогда выражение (8) запишем в следующем виде:

$$q = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}} k_m. \quad (9)$$

Для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей с целью минимизации величины их остаточных деформаций под действием ударной силы деформирования величину среднего давления в контакте принимаем в пределах $(0,26 \div 0,63)$ НВ [13].

После преобразований выражение (9) принимает вид:

$$(0,26 \div 0,63) \text{НВ} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}} k_m. \quad (10)$$

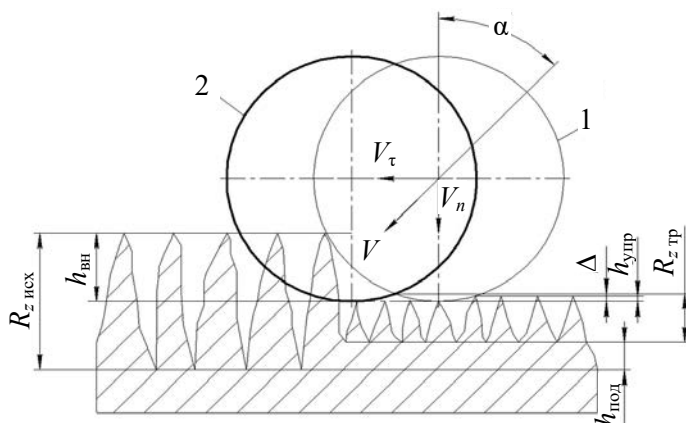
Решая уравнение (10) относительно $h_{вн}$, имеем:

$$h_{вн} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{(0,26 \div 0,63) \text{НВ} \cdot T_n \cdot t_{pk}} k_m. \quad (11)$$

Таким образом, полученная аналитическая зависимость (11) позволяет определить глубину внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность детали при упругопластическом деформировании ее исходных микронеровностей в процессе совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенном магнитно-динамическом накатывании.

Для расчета получаемой высоты шероховатости поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием рассмотрим схему взаимодействия гладкого деформирующего шара с исходной шероховатостью (микронеровностями) упрочняемой поверхности (рисунок 1).



1 – положение образующей первого деформирующего шара в конце удара; 2 – положение образующей очередного деформирующего шара в конце удара

Рисунок 1. – Схема взаимодействия гладкого деформирующего шара с исходной шероховатостью поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), требуемое значение шероховатости поверхности равно [18]:

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), требуемое значение шероховатости поверхности равно [18]:

$$R_{z \text{ тр}} = R_{z \text{ исх}} - h_{вн} - h_{под} + h_{упр} + \Delta, \quad (12)$$

где $R_{z \text{ тр}}$, $R_{z \text{ исх}}$ – соответственно требуемая (получаемая) и исходная шероховатость поверхности упрочняемой детали, мкм;

$h_{вн}$ – глубина пластического внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали, мкм;

$h_{\text{под}}$ – величина подъема впадин исходных микронеровностей под действием ударной силы деформирования, мкм;

$h_{\text{упр}}$ – упругое восстановление шероховатости поверхности, сформированной деформирующим шаром после снятия нагрузки;

Δ – увеличение шероховатости поверхности вследствие наличия подачи деформирующих шаров инструмента, мкм.

Учитывая, что величина $h_{\text{упр}}$ на порядок меньше остальных значений составляющих, входящих в уравнение (12), ею можно пренебречь.

Многочисленные экспериментальные исследования профилограмм поверхности деталей до и после совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием показали, что $h_{\text{под}} \approx \frac{1}{3}h_{\text{вн}}$.

В соответствии с упомянутым допущением и значением величины $h_{\text{под}}$ уравнение (12) примет вид:

$$\begin{aligned} R_{z \text{ тр}} &= R_{z \text{ исх}} - h_{\text{вн}} - \frac{1}{3}h_{\text{вн}} + \Delta; \\ R_{z \text{ тр}} &= R_{z \text{ исх}} - \frac{4}{3}h_{\text{вн}} + \Delta. \end{aligned} \quad (13)$$

Увеличение шероховатости поверхности Δ вследствие наличия подачи деформирующих шаров определяем по известной зависимости [19]:

$$\Delta = \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}}, \quad (14)$$

где S – подача инструмента.

Решая уравнение (13) относительно $h_{\text{вн}}$, имеем:

$$h_{\text{вн}} = \frac{3}{4}(R_{z \text{ исх}} - R_{z \text{ тр}} + \Delta). \quad (15)$$

Приравнивая уравнения (11) и (15), полученные ранее, имеем:

$$\frac{3}{4} \left(R_{z \text{ исх}} - R_{z \text{ тр}} + \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}} \right) = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{\text{ш}}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{(0,26 \div 0,63) \text{НВ} \cdot T_n \cdot t_{pk}} \cdot k_m. \quad (16)$$

Уравнение (16) является уравнением взаимосвязи параметров качества обработки (шероховатости получаемой поверхности детали) с режимами процесса совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (нормальной скоростью взаимодействия деформирующего шара с упрочняемой поверхностью V_n , подачей инструмента S , величиной индукции, действующего на деталь магнитного поля, учитываемой коэффициентом k_m), характеристиками деформирующего шара ($R_{\text{ш}}$, ρ), твердостью НВ материала упрочняемой детали и временем нормального удара шара T_n .

Для выполнения инженерных расчетов в практической деятельности важно получить простую аналитическую зависимость, позволяющую прогнозировать величину шероховатости поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Подставим в уравнение (13) значение $h_{\text{вн}}$ [18] и Δ :

$$h_{\text{BH}} = \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{mV_n^2}{K} \right)^{\frac{2}{5}}.$$

Тогда имеем:

$$R_{z_{\text{тр}}} = R_{z_{\text{исх}}} - \frac{4}{3} \left(\frac{5mV_n^2}{4K} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}}, \quad (17)$$

где m – масса деформирующего шара;

K – коэффициент пропорциональности (зависимость (6)) [16].

Определение глубины упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Глубина упрочнения поверхностного слоя детали при ее поверхностном пластическом деформировании определяется зависимостью [20]:

$$h_y = kd, \quad (18)$$

где h_y – глубина упрочнения поверхностного слоя детали;

k – коэффициент пропорциональности ($k = 1,25-1,5$);

d – диаметр отпечатка деформирующего шара при пластическом деформировании поверхности детали.

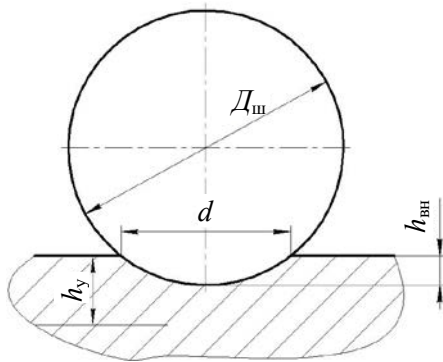


Рисунок 2. – Схема внедрения деформирующего шара в поверхность детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Известна зависимость взаимосвязи параметров отпечатка деформирующего шара на поверхности детали (рисунок 2) [21]:

$$h_{\text{BH}} \approx \frac{r^2}{D_{\text{ш}}} = \frac{d^2}{4D_{\text{ш}}}, \quad (19)$$

где r – радиус отпечатка деформирующего шара.

Определим значение d из зависимости (19):

$$d = 2 \cdot \sqrt{h_{\text{BH}} \cdot D_{\text{ш}}}. \quad (20)$$

После преобразования уравнение (18) имеет вид:

$$h_y = 2k \cdot \sqrt{h_{\text{BH}} \cdot D_{\text{ш}}}. \quad (21)$$

С учетом значения h_{BH} (11), а также увеличением глубины упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и импульсно-ударным деформированием, обусловленной магнитным воздействием на поверхность детали, выражение (21) принимает вид:

$$h_y = 8k \cdot k_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\rho \cdot R_{\text{ш}}^3 (U_n - V_n) \cdot 100\%}{(0,26 \div 0,63) \text{HB} \cdot T_n \cdot t_{pk}}} k_m, \quad (22)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий комплексное энергетическое воздействие на упрочняемую поверхность детали вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (k_1 определяется экспериментально для материала упрочняемой детали и условий обработки).

Заключение. Разработана математическая модель упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким де-

формирующим шаром при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Математическая модель учитывает комплексное магнитно-силовое воздействие на исходную шероховатость поверхности детали и позволяет установить зависимость глубины внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность от физико-механических свойств детали, основных параметров инструмента и режимов процесса совмещенного упрочнения.

Разработана математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Получено уравнение взаимосвязи шероховатости поверхности обрабатываемой ферромагнитной детали с физико-механическими свойствами деформируемого материала, основными параметрами инструмента и режимами процесса упрочнения, позволяющее прогнозировать шероховатость поверхности детали на стадии проектирования операции отделочно-упрочняющей обработки.

Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить глубину упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Список использованных источников

1. Технология производства и ремонт горных машин // Р.П. Дидык [и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 1996. – 440 с.
2. Технология машиностроения и ремонта горных машин / Г.Н. Солод [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
3. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под. ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 394 с.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюл. № 31. – 7 с.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюл. № 25. – 7 с.
6. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия в ферромагнитной детали; пат. 22193 Респ. Беларусь, МПК В24В39/02 / В.К. Шелег, А.М. Довгалев, А.А. Жолобов, Д.М. Свирепа, С.А. Сухоцкий, М.В. Мовчан; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а20140015; заявл. 03.01.14; опубл. 30.10.18 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 4. – 8 с.
7. Довгалев, А.М. Динамическая модель процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания / А.М. Довгалев, Н.А. Леванович, И.А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 37-48.
8. Довгалев, А.М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А.М. Довгалев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18-35.
9. Шелег, В.К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В.К. Шелег, А.М. Довгалев // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330-334.

10. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
11. Котенева, Н.В. Упругопластический динамический контакт твердых тел / Н.В. Котенева. – Барнаул: АлтГТУ, 2011. – 127 с.
12. Сидякин, Ю.И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06 / Ю.И. Сидякин; Науч.-произв. объединение по технол. машиностроения. – М., 2002. – 34 с.
13. Гурув, Р.В. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин с учетом их функционального назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Р.В. Гурув. – Брянск, 2012. – 303 л.
14. Цикунов, А.Е. Сборник формул по математике / А.Е. Цикунов. – СПб., 2002. – 160 с.
15. Свирепа, Д.М. Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д.М. Свирепа; ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2013. – 26 с.
16. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
17. Гусев, В.А. Математика: справ. материалы: кн. для учащихся / В.А. Гусев, А.Г. Мордкович. – М.: Просвещение, 1988. – 416 с.
18. Сухоцкий, С.А. Технологическое обеспечение качества плоских поверхностей деталей машин магнитно-динамическим накатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.А. Сухоцкий; Белорусско-Российский университет. – Могилев, 2017. – 24 с.
19. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фильдштейн, М.А. Корониевич. – 2-е изд. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
20. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа: сборник статей / Под ред. д-ра техн. наук проф. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1965. – 212 с.
21. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.

Информация об авторе

Довгалева Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и профориентации, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bru@bru.by.

Information about the author

Dovgalev Aleksandr Mikhailovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of pre-university education and professional orientation Faculty, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: bru@bru.by.

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.