

УДК 621.793.044(045)(476)

Довгалев А.М.*Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ**

Аннотация. *Представлена методика выбора параметров комбинированного инструмента и рациональных режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, учитывающая взаимосвязь кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле с качественными характеристиками обработки. Разработанная методика является основой для автоматизации проектирования технологий (операций) совмещенной отделочно-упрочняющей обработки и позволяет существенно сократить время на их разработку.*

Ключевые слова: *совмещенное упрочнение, накатывание, деформирующие шары, магнитная система, зубчатый магнитопровод, постоянный магнит, ферромагнитная деталь, поверхностный слой, шероховатость поверхности.*

Dovgalev A.M.*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus***DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE COMBINED
MAGNETIC-DYNAMIC ROLLING PROCESS**

Abstract. *The paper presents a methodology for selecting the combined tool parameters and rational modes of combined magnetodynamic rolling of surfaces of non-rigid ferromagnetic components taking into account the relationship between the kinematic characteristics of the movement of deforming balls in a magnetic field and the quality characteristics of treatment. The developed methodology is intended to be used as a basis for computer-aided design of technologies (operations) of combined finishing and strengthening treatment and helps significantly reduce the time spent on their development.*

Keywords: *combined treatment, rolling, deforming balls, magnetic system, toothed magnetic core, permanent magnet, ferromagnetic component, surface layer, surface roughness.*

Введение. Исследование методов упрочняющей обработки при изготовлении деталей машин позволяет многократно увеличить ресурс оборудования, применяемого в горнодобывающей отрасли [1, 2].

В машиностроении достаточно широкое применение находят статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования, обеспечивающие высокие качественные характеристики и эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей [3].

В последние годы созданы методы упрочнения, обеспечивающие комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой обрабатываемой ферромагнитной детали. К их числу относится метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН), при котором на поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [4, 5].

Метод СМДН обеспечивает получение на ферромагнитных деталях машин антифрикционного наноструктурированного поверхностного слоя, характеризующегося высокими эксплуатационными свойствами [6, 7].

Однако в настоящее время не существует общей методики проектирования технологий (операций) СМДН, позволяющей выбирать рациональные параметры инструмента и режимы процесса совмещенного упрочнения для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя ферромагнитных деталей без проведения большого объема дополнительных экспериментальных исследований. Это не позволяет осуществлять автоматизацию проектирования технологий СМДН и сдерживает внедрение разработанного метода совмещенной отделочно-упрочняющей обработки на предприятиях машиностроения.

Методика определения основных рациональных параметров комбинированного инструмента и режимов процесса СМДН.

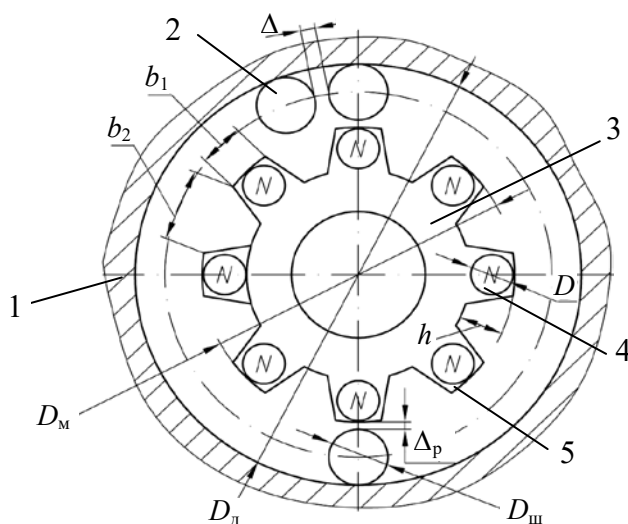
Для устранения указанного недостатка разработана методика определения основных параметров инструмента и режимов процесса СМДН, предусматривающая последовательное выполнение следующих этапов.

1. Выбор основных параметров комбинированного инструмента осуществляется в соответствии с расчетной схемой, на которой упрощенно изображено поперечное сечение ферромагнитной детали и комбинированного инструмента (рисунок 1).

Диаметр деформирующих шаров. При выборе диаметра деформирующих шаров следует учитывать диаметральные размеры внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой заготовки, позволяющие разместить в их пределах деформирующие ферромагнитные шары и магнитную систему инструмента. Так при СМДН поверхности отверстий диаметром 40-80 мм приемлемыми являются диаметры деформирующих шаров от 6 до 10 мм. При обработке отверстий диаметром 80-200 мм и более целесообразно использовать шары диаметром 10-30 мм. При упрочнении заготовок из пластичных материалов (твердостью до 30 HRC) следует выбирать деформирующие шары большего диаметра, а при обработке поверхностей термоупрочненных заготовок (более твердых) –

шары наименьшего диаметра из указанных диапазонов. Это обусловлено тем, что при уменьшении диаметра деформирующего шара обеспечивается увеличение удельного давления в зоне контакта с поверхностью ферромагнитной детали, что повышает интенсивность процесса поверхностного пластического деформирования.

Радиальный зазор между ферромагнитным деформирующим шаром, магнитной системой инструмента и обрабатываемой поверхностью детали. Рациональная величина зазора Δ_p между деформирующим шаром и магнитной системой при работе инструмента (когда ферромагнитные деформирующие шары взаимодействуют с упрочняемой поверхностью детали) составляет от 2 до 6 мм и зависит от характеристик магнитной системы. При зазоре



- 1 – ферромагнитная деталь; 2 – ферромагнитные деформирующие шары комбинированного инструмента; 3 – зубчатый магнитопровод; 4 – цилиндрический постоянный магнит; 5 – зуб магнитопровода

Рисунок 1. – Расчетная схема для выбора основных рациональных параметров комбинированного инструмента при СМДН внутренней поверхности нежестких ферромагнитных тел вращения

более 6 мм имеет место рассеивание магнитного поля и уменьшение силового взаимодействия деформирующего шара с магнитной системой, что приводит к снижению интенсивности процесса поверхностного пластического деформирования. При радиальном зазоре менее 2 мм снижается динамическое воздействие деформирующих шаров на упрочняемую поверхность, и увеличивается их ударное воздействие на элементы магнитной системы инструмента. В результате снижается эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки, и уменьшается долговечность инструмента.

Количество деформирующих шаров. Длина окружности L , на которой расположены центры деформирующих шаров комбинированного инструмента при их взаимодействии с упрочняемой цилиндрической поверхностью ферромагнитной детали, равна:

$$L = \pi \cdot (D_d - D_{ш}), \quad (1)$$

где D_d – диаметр обрабатываемого отверстия;

$D_{ш}$ – диаметр шара.

Максимальное количество деформирующих шаров Z , устанавливаемых в инструменте при отсутствии зазора между ними:

$$Z = \frac{\pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}}. \quad (2)$$

Необходимая величина суммарного зазора Δ_{Σ} между деформирующими шарами инструмента:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta \cdot Z = \Delta \cdot \frac{\pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}}, \quad (3)$$

где Δ – зазор между деформирующими шарами (2-5 мм).

Длина окружности расположения геометрических центров L' деформирующих шаров инструмента с учетом наличия зазора между ними:

$$L' = L - \Delta_{\Sigma} = \pi(D_d - D_{ш}) - \frac{\Delta \cdot \pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}} = \pi(D_d - D_{ш}) \left(1 - \frac{\Delta}{D_{ш}}\right). \quad (4)$$

Определяем необходимое количество деформирующих шаров инструмента Z' при обеспечении зазора между ними:

$$Z' = \frac{L'}{D_{ш}} = \frac{\pi(D_d - D_{ш}) \left(1 - \frac{\Delta}{D_{ш}}\right)}{D_{ш}}. \quad (5)$$

Диаметр зубчатого магнитопровода. Диаметр зубчатого магнитопровода D_m в соответствии с расчетной схемой (рисунок 1) равен:

$$D_m = D_d - 2D_{ш} - 2\Delta_p = D_d - 2(D_{ш} + \Delta_p), \quad (6)$$

где Δ_p – радиальный зазор между деформирующим шаром и магнитопроводом при работе инструмента.

Число зубьев магнитопровода и их параметры. Ширину b_1 и высоту h зубьев магнитопровода следует принимать равными диаметру D цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов. Расстояние b_2 между зубьями магнитопровода принимают больше или равным диаметру деформирующих шаров $D_{ш}$. Тогда запишем:

$$b_1 = D; \quad h = D; \quad b_2 \geq D_{\text{ш}}.$$

Наибольшее число зубьев магнитопровода Z'' определяем из выражения:

$$Z'' = \frac{L_{\text{м}}}{b_1 + b_2}, \quad (7)$$

где $L_{\text{м}}$ – длина окружности наружной поверхности зубчатого магнитопровода.

После подстановки значений, входящих в уравнение (7), имеем:

$$Z'' = \frac{\pi [D_{\text{д}} - 2(D_{\text{ш}} + \Delta_{\text{р}})]}{D + D_{\text{ш}}}. \quad (8)$$

Полученное расчетное значение Z'' следует округлять до целого числа.

Количество, диаметр и высота цилиндрических постоянных магнитов. Количество цилиндрических постоянных магнитов n' целесообразно принимать равным числу зубьев Z'' магнитопровода.

Диаметр D цилиндрических постоянных магнитов принимают равным ширине b_1 зуба магнитопровода.

Высоту $h_{\text{м}}$ применяемых цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов (в соответствии с рекомендациями [8]) следует принимать не более диаметра D цилиндрического постоянного магнита:

$$h_{\text{м}} \leq D.$$

2. Определение режимов процесса СМДН.

Определение подачи комбинированного инструмента. Для обеспечения высокого качества отделочно-упрочняющей обработки поверхности детали поверхностным пластическим деформированием рекомендуется обеспечивать перекрытие на ней следов от деформирующих шаров в пределах от 1,5 до 8 раз [9].

Тогда максимальное $S_{Z_{\text{max}}}$ и минимальное $S_{Z_{\text{min}}}$ значения подачи инструмента составят:

$$S_{Z_{\text{max}}} \leq b/1,5, \quad (9)$$

$$S_{Z_{\text{min}}} \leq b/8, \quad (10)$$

где b – ширина следа от деформирующего шара.

Согласно зависимости взаимосвязи параметров отпечатка деформирующего шара на поверхности детали, глубина внедрения $h_{\text{вн}}$ шара равна [10]:

$$h_{\text{вн}} \approx \frac{d^2}{4D_{\text{ш}}}, \quad (11)$$

где d – диаметр отпечатка деформирующего шара.

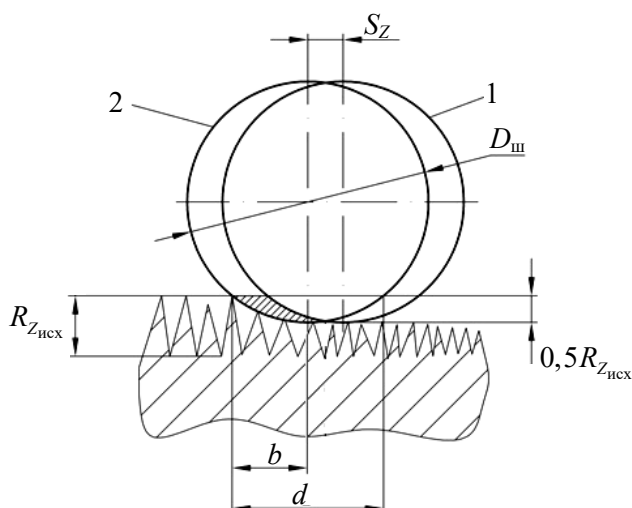
При отделочно-упрочняющей обработке с некоторым допущением считаем, что

$$h_{\text{вн}} \approx 0,5R_{Z_{\text{исх}}},$$

где $R_{Z_{\text{исх}}}$ – исходная шероховатость поверхности детали по параметру R_z .

Тогда решая уравнение (11) относительно d , имеем:

$$d = 2\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{Z_{\text{исх}}}}, \quad (12)$$



1 – первоначальное положение образующей деформирующего шара; 2 – последующее положение образующей деформирующего шара
 Рисунок 2. – Схема взаимодействия гладкого деформирующего шара с поверхностью ферромагнитной детали при СМДН

Согласно рисунку 2, с некоторым допущением (без учета упругого восстановления деформированных микронеровностей), ширину следа от деформирующего шара на поверхности детали принимаем равной:

$$b = d/2. \quad (13)$$

Подставляя значения (12) и (13) в уравнения (9) и (10), получим соответственно максимальное и минимальное значение подачи деформирующих шаров инструмента:

$$S_{z_{\max}} \leq \frac{\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{z_{\text{исх}}}}}{1,5}, \quad (14)$$

$$S_{z_{\min}} \leq \frac{\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{z_{\text{исх}}}}}{8}. \quad (15)$$

Меньшее значение подачи комбинированного инструмента из

указанного диапазона принимается для упрочнения ферромагнитных деталей, требующих более высокого качества поверхностного слоя и низкой шероховатости поверхности.

Определение требуемой скорости нормального удара V_n деформирующего шара по упрочняемой поверхности детали. Необходимую скорость нормального удара V_n деформирующего шара по упрочняемой поверхности нежесткой ферромагнитной детали, при которой обеспечивается заданная чертежом шероховатость поверхности, определяем на основе решения соответствующего уравнения [11], устанавливающего взаимосвязь параметров качества обработки с режимами процесса СМДН.

Определение требуемой частоты (скорости) вращения комбинированного инструмента. Требуемую частоту вращения комбинированного инструмента, при которой обеспечивается необходимая скорость нормального удара V_n деформирующего шара по упрочняемой поверхности нежесткой детали, определяем на основе решения соответствующего дифференциального уравнения [12], устанавливающего взаимосвязь режимов процесса СМДН с кинематическими характеристиками деформирующих шаров.

Заключение. Разработана методика определения основных рациональных параметров комбинированного инструмента (диаметра и количества деформирующих шаров, диаметра и числа зубьев магнитопровода, размеров и количества цилиндрических постоянных магнитов) и режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания (величины подачи, скорости нормального удара деформирующих шаров, частоты вращения инструмента), имеющая важное научное и практическое значение. Методика является основой для разработки программного продукта, обеспечивающего существенное сокращение времени на технологическую подготовку производства на основе автоматизации проектирования технологий (операций) совмещенной отделочно-упрочняющей обработки.

Список использованных источников

1. Технология производства и ремонт горных машин: учебник / Р.П. Дидык [и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 1996. – 440 с.
2. Дидык, Р.П. Проблемы и перспективы горного машиностроения / Р.П. Дидык // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 16-17.
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. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Гуров, 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. Гуров. – Брянск, 2012. – 303 л.
10. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
11. Довгалев, А.М. Моделирование процесса деформирования поверхности детали гладким шаром при совмещенном магнитно-динамическом накатывании // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 5-13.
12. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалев. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

Информация об авторе

Довгалев Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и профориентации, Беларусско-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 22.02.2021 г.