

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.7.01

Регуляризация микрорельефа поверхностей деталей при обработке многоконтактным виброударным инструментом

Г.А. Прокопец, В.П. Машков, А.В. Оксак, С.С. Лактюшина

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Рассматривается многоконтактная виброударная обработка с использованием шарико-стержневого упрочнителя. Приведены основные параметры регулярного микрорельефа в соответствии с ГОСТ 24773-81. На основе анализа требований к нанесению регулярных микрорельефов и их параметров, а также с учётом технологических возможностей многоконтактной виброударной обработки обоснована возможность формирования такого микрорельефа при обработке шарико-стержневым упрочнителем. В работе представлены профилограммы, полученные с обработанной поверхности. Также указаны режимы обработки, которые обеспечивают нанесение определённых видов частично регулярного микрорельефа на поверхности деталей цилиндрической формы.

Ключевые слова: многоконтактная виброударная обработка, шарико-стержневой упрочнитель, регулярный микрорельеф, режим обработки

Для цитирования. Прокопец Г.А., Машков В.П., Оксак А.В., Лактюшина С.С. Регуляризация микрорельефа поверхностей деталей при обработке многоконтактным виброударным инструментом. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(4):54–58.

Regularization of the Micro-Relief of Surfaces of Parts during Processing with a Multi-Contact Vibration Shock Tool

Galina A. Prokopets, Vladimir P. Mashkov, Aleksey V. Oksak, Sofya S. Laktyushina

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article discusses the use of multi-contact vibration shock treatment with a ball-rod hardener. The main parameters of the regular micro-relief according to GOST 24773-81 are given. After analyzing the requirements for regular micro-relief applications and their parameters as well as the capabilities of multi-contact vibration shock treatment technology, the paper justifies the possibility of creating such a micro-relief using this treatment method. The paper also presents profilograms from the treated surface and gives examples of how to apply certain types of regular micro-relief to the surface of cylindrical parts.

Keywords: multi-contact vibration shock treatment, ball-rod hardener, regular micro-relief, processing mode

For Citation. Prokopets GA, Mashkov VP, Oksak AV, Laktyushina SS. Regularization of the Micro-Relief of Surfaces of Parts during Processing with a Multi-Contact Vibration Shock Tool. *Young Researcher of Don*. 2025;10(4):54–58.

Введение. Качество поверхности деталей машин, взаимодействующих в процессе эксплуатации, существенно определяет их эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, усталостная прочность и коррозионная стойкость [1]. К важным показателям качества поверхностей относятся параметры шероховатости и волнистости, физико-механические свойства материалов поверхностных и подповерхностных слоев, а также специфика их микроструктуры и напряженного состояния.

Одним из способов повышения эксплуатационных свойств этих поверхностей является упрочняющая обработка, осуществляемая методом поверхностного пластического деформирования (ППД) [2]. Данный метод может включать создание полностью регулярного микрорельефа (ПРМП) или частично регулярного микрорельефа (ЧРМП) [3].

Основная часть. Анализ основных целей регуляризации микрорельефа поверхности деталей машин и приборов, изложенных в ГОСТ 24 773–81 [3], позволяет условно разделить их на две главные группы. Первая группа — конструкторские цели, включающие: улучшение эксплуатационных свойств, например, «снижение потерь на трение и исключение надиров, задигов и схватывания» [3]; повышение надежности и долговечности; уменьшение материалоемкости. Вторая группа охватывает технологические цели, такие как: сокращение длительности и исключение приработки, переход на расчетные методы нормирования и технологического обеспечения микрогеометрии; исключение ручных работ (абразивное полирование, шабрение).

Регулярные микрорельефы (РМР) подразделяются на полностью регулярные микрорельефы (ПРМР) и частично регулярные микрорельефы (ЧРМР), в которых сохраняется некоторая степень стохастичности. В соответствии с ГОСТ 24 773–81 [3] для нормирования РМР предусмотрено несколько вариантов, в частности, нормирование «наибольших значений выбранных параметров; диапазонов значений; номинальных значений». При использовании последних устанавливаются допустимые отклонения, равные 10, 20 и 40 % от номинальных значений с односторонним и симметричным расположением.

ПРМР подразумевает создание на поверхности детали совершенно нового микрорельефа, что невозможно без строгого закона взаимного перемещения инструмента и детали. ЧРМР, в свою очередь, представляет собой поверхность, на которой сохраняются элементы исходного микрорельефа (исходной шероховатости). На рис. 1 представлены 3D-модели ЧРМР на плоской и цилиндрической поверхности. Регулярные неровности изображают шестигранные (рис. 1 а) или сферические (рис. 1 б) углубления заданной глубины, расположенные на обрабатываемой поверхности с определенным продольным и поперечным (круговым) шагом без углового смещения.

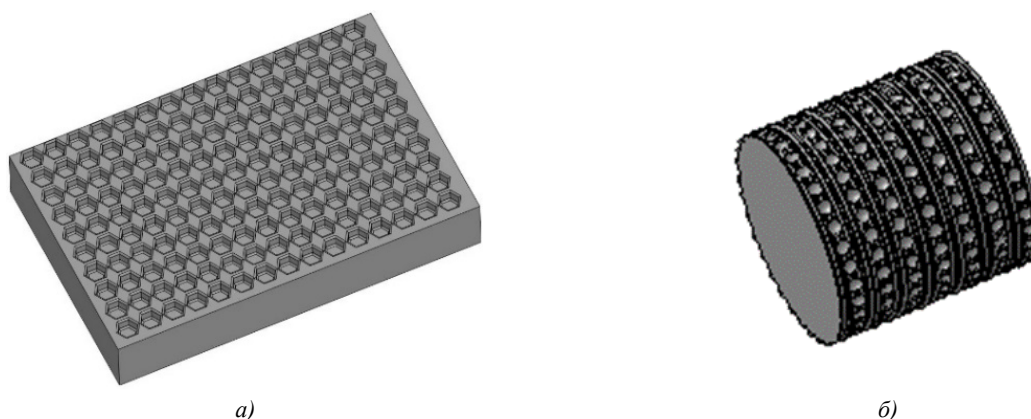


Рис. 1. 3D-модели ЧРМР: а — на плоской поверхности; б — на цилиндрической поверхности

Существует значительное количество технологических методов, с помощью которых можно нанести РМР на поверхность детали. Выбор конкретного метода зависит от множества факторов, включая:

- форму и размеры детали, а также материал детали и его физико-механические характеристики;
- параметры РМР;
- специальные условия и ограничения, касающиеся детали (например, изменение отражательной способности поверхности, ограничение по глубине наклепа и т.д.);
- цель обработки (декоративная, отделочная, упрочняющая и другие);
- наличие оборудования и оснастки в соответствующем производственном подразделении и другие аспекты.

В большинстве случаев, особенно когда необходимо совмещение нанесения РМР с упрочнением поверхности, РМР наносят методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Эти методы классифицируются на статические и динамические.

Рассмотрим возможность нанесения ЧРМР с использованием многоконтактного виброударного инструмента — шарико-стержневого упрочнителя (ШСУ) [4, 5]. ШСУ представляет собой устройство, предназначенное для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей методом ППД. Этот вид обработки относится к классу динамических методов. Основные достоинства обработки с помощью ШСУ заключаются в высокой гибкости и достаточно большой интенсивности воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность. На рис. 2 представлен внешний вид и схема шарико-стержневого упрочнителя с различной формой пучка инденторов.

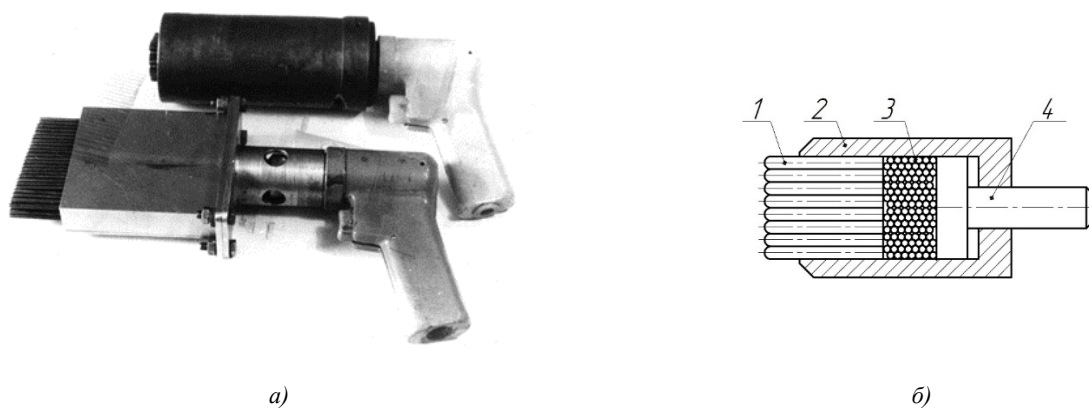


Рис. 2. Внешний вид со схемой шарико-стержневого упрочнителя:

а — внешний вид ШСУ с разной формой пучка инденторов; б — схема ШСУ, где: 1 — пучок инденторов; 2 — корпус; 3 — среда стальных закаленных шаров — волновод; 4 — боек

Инструмент обладает высокой гибкостью за счет того, что отсутствует жесткая кинематическая связь между инструментом (пучком инденторов) и источником энергии (источником ударных импульсов). Ударный импульс в ШСУ (рис. 2 б) передается через уплотненную среду стальных шаров 3, которая за счет подвижности ее элементов принимает с одной стороны форму бойка 4 (или поршня), а с другой — форму обрабатываемой поверхности (рис. 3).

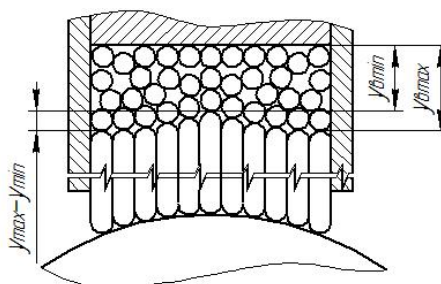


Рис. 3. Схема обработки криволинейной поверхности (y_{max}, y_{min} — разница между максимальной и минимальной координатой обрабатываемой поверхности на длине наибольшего контакта пучка инденторов в направлении наибольшей кривизны обрабатываемой поверхности; $y_{b_{max}}, y_{b_{min}}$ — разница между максимальной и минимальной толщиной волновода в направлении наибольшей кривизны обрабатываемой поверхности)

Наносить на поверхности деталей полностью (ПРМР) и частично (ЧРМР) регулярные микрорельефы с помощью ШСУ возможно только при наличии механизированного привода инструмента. В качестве такого привода может использоваться как металлорежущее оборудование (например, при обработке тел вращения возможно использование токарно-винторезного станка, а при обработке плоских поверхностей — фрезерного или строгального станка), так и специальные устройства, которые обеспечивают требуемую траекторию взаимного перемещения обрабатываемой детали и упрочнителя. В данном случае влияние человеческого фактора практически исключается, что значительно повышает точность обработки [6].

Многоконтактная виброударная обработка позволяет наносить как полные, так и частичные регулярные микрорельефы. При обработке с использованием ШСУ могут быть сформированы следующие виды ЧРМР: отсутствие пересечения элементов РМР, неполное пересечение элементов РМР, полное пересечение элементов РМР. Для данного метода обработки наиболее целесообразным является нанесение ячеистых регулярных микрорельефов с вогнутым профилем [1, 7, 8]. Благодаря значительной гибкости волновода энергия ударного импульса единичных инденторов в пучке отличается незначительно, и ее влияние на разброс высотных параметров микрорельефа можно не учитывать.

Одним из основных достоинств обработки с использованием ШСУ является возможность целенаправленного воздействия на форму впадины РМР путем выбора формы деформирующей части индентора. Хотя форма рабочей части индентора (деформирующего элемента) может быть практически любой, при обработке ШСУ чаще всего используется сферическая форма. В результате формирующийся микрорельеф будет состоять из сферических углублений (отпечатков) (рис. 4), глубина которых определяется следующими основными параметрами: энергией единичного импульса, физико-механическими свойствами материала обрабатываемой детали и количеством деформирующих воздействий, приходящихся на один отпечаток (коэффициент перекрытия).



Рис. 4. Профиллограммы поверхностей, снятых с образцов из алюминиевого сплава Д16Т (диаметр индентора — 3 мм, энергия ИУИ — 2,5 Дж) после обработки ШСУ (вертикальное увеличение профиллограммы в 4 000 раз, горизонтальное увеличение в 40 раз): *а* — исходный микропрофиль; *б* — микропрофиль поверхности после обработки ШСУ с коэффициентом перекрытия, равным единице

Исходными данными для определения режима многоконтантной виброударной обработки являются следующие параметры РМР:

- h — глубина (высота) регулярной неровности;
- F_H — относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями;
- α — угол сетки;
- Θ — угол направления неровностей;
- S_O — осевой шаг неровностей;
- S_K — круговой шаг неровностей;
- A — амплитуда непрерывной регулярной неровности.

Глубина РМР h определяется по зависимости (1), на основе которой может быть определена требуемая энергия ударного импульса единичного индентора E_u :

$$h = K_{\Pi} \cdot \left(R_{\Pi} - \left(R_{\Pi}^2 - \left(3 \cdot R_{\Pi} \cdot 1\,000 \cdot R_{\Pi} / (4 \cdot HB) \right)^{1/4} \right)^{1/2} \right), \quad (1)$$

где K_{Π} — коэффициент, учитывающий увеличение глубины отпечатка при повторных ударах в одну лунку (коэффициент перекрытия); R_{Π} — радиус рабочей части индентора; HB — твердость обрабатываемого материала (по Бринеллю); E_u — энергия ударного импульса одного индентора.

Рассмотрим вариант нанесения ЧРМР на цилиндрическую поверхность диаметром D (мм) и длиной L . Параметры: h — глубина регулярной неровности, мм; S_O — осевой шаг неровностей, мм; S_K — круговой шаг неровностей, мм; F_H — относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями, мм².

На первом этапе необходимо определить форму пучка инденторов. Для цилиндрической поверхности целесообразно принять прямоугольный пучок инденторов. Длина (количество инденторов в направлении продольной подачи упрочнителя l) и его ширина (количество инденторов в направлении круговой подачи упрочнителя n) определяются размерами обрабатываемой поверхности.

Далее определяем круговой шаг неровностей при нанесении ЧРМР, который определяет частоту вращения детали S_K :

$$n = \frac{S_K \cdot f \cdot 60}{\pi \cdot D} \cdot n_{uk}, \text{ об/мин}, \quad (2)$$

где f — частота колебаний источника ударных импульсов, Гц; n_{uk} — число рядов инденторов в пучке инденторов (в направлении круговой подачи), соответствует ширине пучка в направлении круговой подачи упрочнителя n .

Осевая подача инструмента на один оборот формирует осевой шаг неровностей S_O . Она может быть определена из зависимости:

$$n = \frac{S_O \cdot n_{uo}}{K_{\Pi}}, \quad (3)$$

где n_{uo} — число рядов инденторов в пучке инденторов (в направлении осевой подачи).

Относительная площадь F_H , занимаемая регулярными неровностями, определяется размерами обрабатываемой поверхности и требуемой степенью регулярности микрорельефа, на которую наносится ЧРМР, а также площадью единичной неровности S_I на поверхности обработки:

$$n = \frac{\pi^2 \cdot h^2 \cdot (2R - h)^2 \cdot D \cdot L}{S_I \cdot S_K \cdot S_O}. \quad (4)$$

Заключение. Таким образом, многоконтантная виброударная обработка ШСУ с расчетными режимами позволяет нанести ЧРМР с заданными параметрами на цилиндрическую поверхность детали.

Список литературы

1. ГОСТ 24773-81 *Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры, характеристики*. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/30256/?ysclid=mdcpt0wf8y639647996> (дата обращения: 10.03.2025).
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А., Самадуров В.А., Сергеев М.А. *Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей*. Авторское свидетельство СССР, № 1230808 А1. 1985. 2 с.
3. Прокопец А.А., Прокопец Т.Н. Анализ мотивационного механизма как элемента управления качеством технологического процесса путем воздействия на человеческий фактор. *Транспортное машиностроение*. 2016;(3(51)):250–256.
4. Прокопец Г.А. *Интенсификация процесса виброударной обработки на основе повышения эффективности вибрационного воздействия и учета ударно-волновых процессов*. Дис. канд. тех. наук. Ростов-на-Дону; 1995. 16 с.
5. Бабичев А.П., Бабичев И.А., Лисицкий Л.О. Конструктивные особенности и технологическое назначение многоконтактных виброволновых инструментов. В: *Труды международного научного симпозиума технологическо-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии»*. Ростов-на-Дону, 14–17 сентября 2016 года. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2016. С. 58–61.
6. Лебедев В.А. Классификация и физико-технологические аспекты динамических методов поверхностно-пластического деформирования. *Advanced Engineering Research*. 2011;11(6(57)):884–891.
7. Прокопец Г.А., Прокопец А.А. Формирование частично регулярного микрорельефа многоконтактной виброударной обработкой. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022;18(1(205)):14–17.
8. Лебедев В.А., Прокопец Г.А., Корольков Ю.В., Шишкина А.П. *Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин*. Учебное пособие. Москва: ИНФРА-М; 2024. 221 с.

Об авторах:

Галина Анатольевна Прокопец, доцент кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), i@aa-pro.ru

Владимир Павлович Машков, магистрант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vladmashkov20@yandex.ru

Алексей Валентинович Оксак, бакалавр кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), oksakalex@gmail.com

Софья Сергеевна Лактюшина, бакалавр кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), sonyalaktyushina2252@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina A. Prokopets, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), i@aa-pro.ru

Vladimir P. Mashkov, Master's Degree Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vladmashkov20@yandex.ru

Aleksey V. Oksak, Bachelor's Degree Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), oksakalex@gmail.com

Sofya S. Laktyushina, Bachelor's Degree Student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), sonyalaktyushina2252@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest

All authors have read and approved the final manuscript.