

УДК 621.9.06

Проектирование технологических процессов обработки деталей шарико-стержневым упрочнителем¹

Р. З. Ягудина, М. Б. Флек

(Донской государственный технический университет)

Рассматривается проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ). Описаны сущность метода и конструкция инструмента. Предложены области эффективного применения шарико-стержневого упрочнителя. Важно отметить, что такая обработка может быть использована при местном упрочнении отдельных участков деталей. Приведены результаты теоретических исследований взаимодействия единичного стержня с поверхностью детали при ударе бойка. Для различных режимов обработки и характеристик обрабатываемых материалов предложены зависимости, с помощью которых рассчитываются высотные параметры шероховатости обработанной поверхности, глубина наклёпанного слоя и степень пластической деформации. Предложенные теоретические зависимости прошли экспериментальную проверку. На этих данных может быть основана методика расчёта основных технологических параметров процесса обработки деталей шарико-стержневым упрочнителем.

Ключевые слова: обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД), шарико-стержневой упрочнитель, местное упрочнение, качество поверхностного слоя, повышение эксплуатационных свойств, разработка технологических рекомендаций.

Введение. В современном машиностроении наблюдается устойчивая тенденция одновременного повышения мощности и точности машин. Это вызывает необходимость повышения прочности и усталостной долговечности деталей, особенно работающих в условиях циклических нагрузок. Не менее важной задачей является снижение массы изделий благодаря применению конструктивно-технологических способов повышения эксплуатационных свойств деталей.

Важно отметить, что обработке поверхностным наклёпом могут подвергаться либо все поверхности деталей, в том числе и концентраторы напряжений, либо только участки концентраторов. Эффективность упрочнения в обоих случаях примерно одинакова и практически определяется режимами обработки зон концентрации напряжений. Однако местное упрочнение значительно производительнее и дешевле, чем повсеместное. Средствами местного упрочнения можно обрабатывать различные поверхности детали. Компактность устройств местного упрочнения позволяет использовать их для ремонта изделий без расстыковки конструкции и демонтажа деталей. Наиболее эффективным может оказаться местное упрочнение деталей, общая поверхность которых значительно больше зон действия концентраторов напряжений.

Необходимо отметить, что обработка, основанная на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя, по сравнению с другими финишными методами обработки поверхности имеет ряд преимуществ:

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое;
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частицами абразивных зёрен;
- отсутствуют термические дефекты;
- обеспечивается стабильное качество поверхности;
- создаётся благоприятная форма микронеровностей с большой долей опорной площади;
- возможно образовывать специфические микрорельефы с заданной площадью и топографией углублений для удержания смазочного материала;

¹ Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

- создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;
- плавно и стабильно повышается микротвёрдость поверхности.

В 1986 году был создан шарико-стержневой упрочнитель — многоконтактный виброударный инструмент для обработки поверхностей деталей методом поверхностно-пластического деформирования [1]. Авторы — разработчики данного прибора попытались объединить технологические возможности вибрационной обработки (гибкость обрабатывающей среды) и достоинства простой чеканки (высокая интенсивность воздействия).

Конструкция инструмента состоит из двух узлов: источника ударных импульсов и самого упрочнителя. В качестве источника ударных импульсов могут быть использованы стандартные пневмо- и электромагнитные молотки, а также специальные виброударные устройства. В существующих конструкциях в качестве источников ударных импульсов используют клепальные пневмомолотки различных типов исполнения.

Упрочнитель состоит из корпуса, упаковки стальных стержней со сферически заточенными торцами, отдела, заполненного закалёнными стальными шарами, и массивного бойка (рис. 1).

В конструкции многоконтактного виброударного инструмента шарико-стержневого упрочнителя используется явление передачи ударного импульса. Он проходит от массивного ударника, обычно приводимого в движение пневмомолотком, через замкнутый объём с закалёнными стальными шариками к упаковке стальных стержней со сферическими наконечниками, которые и воздействуют на обрабатываемую поверхность.

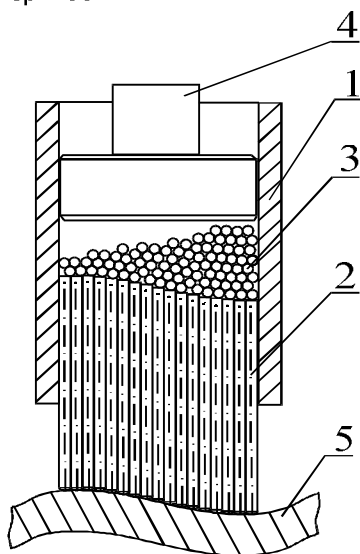


Рис. 1. Схема многоконтактного виброударного инструмента ШСУ: 1 — корпус; 2 — стержни; 3 — замкнутый объём с закалёнными стальными шарами; 4 — ударник; 5 — деталь

Благодаря свойству псевдотекучести объёма шариков расположение сферических вершин стержней может изменяться, принимая форму сферы, цилиндра и даже поверхности с отрицательной кривизной.

Поэтому ШСУ может использоваться для упрочнения плоских и лекальных поверхностей, создания сжимающих остаточных напряжений, сглаживания каверн и нанесения регулярного микрорельефа на пары трения.

Для создания регулярной топографии отпечатков требуется точное соблюдение таких параметров, как энергия и количество ударов, нанесённых в одну точку. Кроме того, пучок инденторов должен двигаться по жёстко заданной траектории с определённой скоростью. В этой связи становится актуальным использование ШСУ совместно с механизмами подачи металлорежущего оборудования.

Необходимость обеспечения полного соблюдения технологического процесса способствовала дальнейшим исследованиям работы ШСУ. В частности, рассматривалось изменение свойств поверхностного слоя обработанной детали.

Несмотря на широкое распространение обработки ШСУ в промышленности, проектирование технологических процессов затруднено из-за недостаточной проработки ряда теоретических и практических вопросов.

Постановка задачи. Авторы формулировали цель и задачи работы, исходя из результатов исследования процесса виброударной обработки шарико-стержневым упрочнителем [2, 3]. Учитывался также опыт изучения других процессов местного упрочнения деталей методами ППД. Новые данные могут способствовать ускорению внедрения эффективных технологических процессов виброударной обработки ШСУ в различных отраслях промышленности.

Цель исследования — разработка методики расчёта технологических параметров виброударной отделочной обработки ШСУ.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 1) теоретические и экспериментальные исследования формирования профиля шероховатости обработанной поверхности;
- 2) исследования формирования качества поверхностного слоя деталей при виброударной отделочной обработке;
- 3) разработка методики расчёта основных технологических параметров процесса.

Формирование геометрических и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Основные технологические параметры виброударной отделочной обработки ШСУ — это производительность процесса и качество обработанной поверхности. При их исследовании одним из важнейших вопросов является теоретическое моделирование процесса единичного взаимодействия индентора с поверхностью детали.

В работах И. В. Кудрявцева и других исследователей в области обработки деталей ППД [4, 5] представлены зависимости для определения размеров единичного отпечатка при динамическом внедрении сферического индентора:

— диаметр пластического отпечатка

$$d = \left(\frac{D \cdot E_u}{0,1H_D} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (1)$$

— глубина пластического отпечатка

$$h = \frac{d^2}{4D}, \quad (2)$$

где E_u — энергия удара индентора, H_D — динамическая твёрдость материала детали, под которой понимается отношение энергии удара сферического индентора к объёму вытесненного им при ударе материала. Величину динамической твёрдости материала определяют в зависимости от твёрдости по Бринеллю. Обычно принимают $H_D = 1,7 HB$.

При обработке ШСУ можно принять, что

$$E_u = \frac{E_y}{M} \cdot \eta, \quad (3)$$

где η — коэффициент полезного действия устройства, зависящий от потерь энергии.

С учётом (3) можно записать

$$d = \left(\frac{DE_y \eta}{0,1MH_D} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (4)$$

Подставляя в (2), получим

$$h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{0,1MH_D \cdot D}} \quad (5)$$

Из зависимостей (4) и (5) следует, что с увеличением диаметра заточки индентора диаметр отпечатка растёт, а глубина отпечатка уменьшается. Это следует учесть при технологических расчётах.

Если условно выделить в поверхностном слое детали сечение, нормальное к обрабатываемой поверхности, то за небольшой промежуток времени через него пройдёт некоторое количество инденторов, оставляющих пластические отпечатки. При этом кривая, огибающая профиль отпечатков, в данном сечении будет представлять собой элементарный рабочий профиль обрабатывающего инструмента. При увеличении времени обработки элементарные рабочие профили будут случайным образом накладываться друг на друга, а на поверхности детали будет копироваться огибающая, представляющая собой эффективный рабочий профиль инструмента. Он будет зависеть от максимальной глубины внедрения $h_{\max}$, от исходной шероховатости детали и от параметров распределения текущих значений глубины внедрения h_i . Вычисление параметров эффективного рабочего профиля инструмента позволит определить параметры профиля шероховатости поверхности обработанной детали.

Вид эффективного рабочего профиля инструмента зависит от глубины и формы отпечатков, оставляемых стержнями на поверхности детали, и подачи устройства S . Для плоских и близких к ним поверхностей детали такой профиль будет иметь вид, представленный на рис. 2.

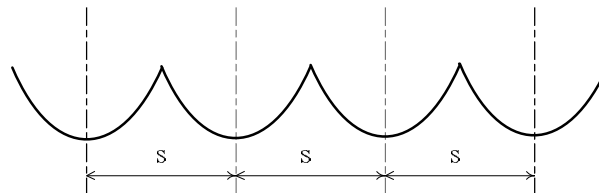


Рис. 2. Вид профиля шероховатости поверхности плоской детали после обработки ШСУ

Величина подачи S может варьироваться в определённых пределах, однако для получения равномерной обработки и исключения появления необработанных участков поверхности следует принимать величину подачи

$$S \approx 0,5d, \quad (6)$$

т. е. половине диаметра отпечатка сферического индентора.

Представленный на рис. 2 профиль шероховатости аналогичен профилю, формирующемуся при токарной обработке с подачей S резцом с радиусом при вершине R .

Для описания высотных параметров такого профиля воспользуемся известной формулой П. Л. Чебышёва:

$$R_z = \frac{S^2}{8R}. \quad (7)$$

Учитывая (1) и (6), примем

$$S = 0,5 \sqrt{\frac{DE_y \eta}{0,1MH_D}}. \quad (8)$$

Тогда для R_z после соответствующих преобразований получим следующую зависимость:

$$R_z = 0,08 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{RMHB}}. \quad (9)$$

Согласно полученной зависимости величина R_z при обработке ШСУ пропорциональна энергии удара и обратно пропорциональна радиусу скругления индентора, числу стержней в насадке и

твёрдости обрабатываемого материала. Полученная зависимость соответствует физическому смыслу явлений, происходящих при обработке ШСУ, и может быть рекомендована к проверке в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Согласно [4, 5] под степенью пластической деформации ε условно принимается отношение диаметра остающейся от вдавливания лунки d к диаметру вдавливаемой сферы D :

$$\varepsilon = \frac{d}{D}. \quad (10)$$

Учитывая (4), можно записать для обработки ШСУ:

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{DE_y \eta}{0,1NH_D} \right)^{\frac{1}{4}}}{D}, \quad (11)$$

где N — энергия соударения, Дж.

Если при внедрении индентора в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток), то вокруг неё всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину h_s .

Параметр контакта h_s имеет существенное практическое значение, поскольку прямо или косвенно характеризует подвергнутую упрочнению деталь, а именно: механическое состояние (упрочнение, запас пластичности, остаточную напряжённость) её поверхностного слоя или локальной пластической области при единичном контакте.

В работе [6] получена простая и удобная для практических расчётов зависимость:

$$h_s = 2,5K \sqrt{D_{np} h}, \quad (12)$$

где D_{np} — приведённый радиус индентора.

Для случая обработки деталей ШСУ: $a = b$, $k = 1$. Тогда зависимость для определения h_s принимает вид:

$$h_s = 2,5\sqrt{Dh}. \quad (13)$$

В этом случае с учётом (5) можно записать:

$$h_s = 0,634 \sqrt[4]{\frac{DE_y \eta}{0,1MH_D}}, \quad (14)$$

после преобразований

$$h_s = 0,964 \sqrt[4]{\frac{DE_y \eta}{M \cdot HB}}. \quad (15)$$

Соответственно, из (11) после преобразований получим

$$\varepsilon = 1,64 \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{MHBD^3}}. \quad (16)$$

Для проверки адекватности предложенной теоретической модели проведены комплексные исследования влияния технологических параметров и свойств материала детали на шероховатость обработанной поверхности. Результаты теоретических расчётов и экспериментальных исследований приведены на рис. 3 и 4.

Проведены экспериментальные исследования влияния обработки ШСУ на микротвёрдость поверхностного слоя образцов. Установлено, что для циклически идеального материала В95 изменения микротвёрдости незначительны, а для циклически упрочняющегося материала Д16Т происходит её повышение на 10–15 %. При этом степень упрочнения соответствует данным тео-

ретиических расчётов по зависимости (16), а глубина упрочнённого слоя несколько меньше, чем рассчитанная по зависимости (15).

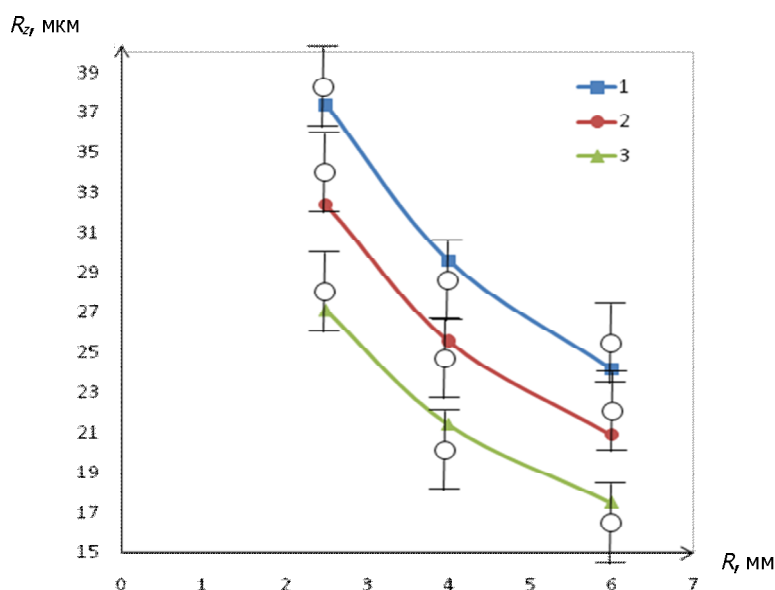


Рис. 3. Влияние радиуса заточки сферы на шероховатость обработанной поверхности различных материалов ($N = 19$, натяг — 1,5 мм): 1 — D16; 2 — B95; 3 — сталь 45

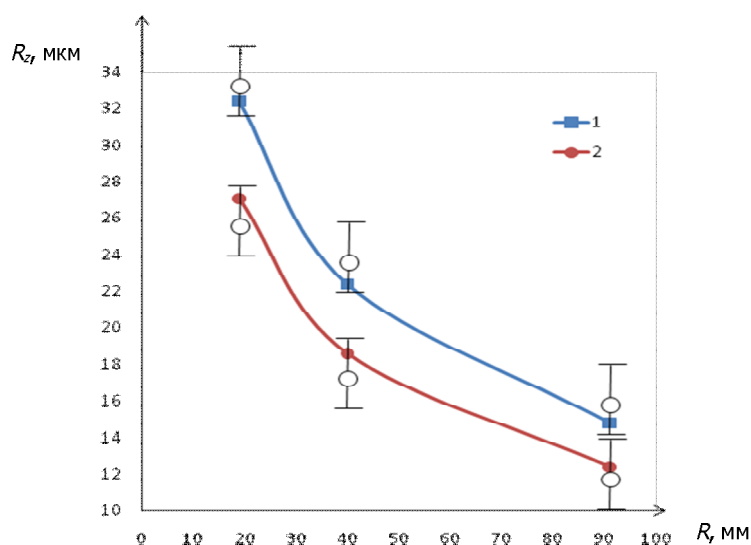


Рис. 4. Влияние числа стержней в насадке на шероховатость обработанной поверхности различных материалов ($R = 2,5$ мм, натяг — 1,5 мм): 1 — B95, 2 — сталь 45

Разработка технологических рекомендаций. Проектирование технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки деталей ШСУ начинается с выбора модели пневмомолотка. Для мягких и средних по твёрдости материалов рекомендуется выбирать модель КПМ-14М, для твёрдых (закалённых сталей) — модель КПМ-24М.

Затем следует выбрать число стержней в насадке устройства. Для местного упрочнения небольших участков рекомендуется выбирать насадки с малым числом стержней (15—50), для упрочнения участков большой площади — с большим числом стержней (50—100 шт.).

Число слоёв шариков определяется в зависимости от высоты перепадов либо радиуса кривизны обрабатываемых поверхностей.

Диаметр стержня рекомендуется выбирать в пределах 3–4 мм. Диаметр заточки стержня и натяг определяются механическими свойствами материала обрабатываемой детали. Для более твёрдых материалов выбираются большие значения натяга обработки и меньшие радиусы заточки сферы.

Затем производится расчёт R_z обработанной поверхности по зависимости (9). Для циклически упрочняющихся материалов рассчитывается степень наклёпа и глубина упрочнённого слоя по зависимостям (15), (16). По результатам расчёта производится корректировка выбранных технологических параметров процесса обработки. Затем вновь рассчитываются параметры поверхностного слоя обработанных деталей — и так до тех пор, пока все заданные параметры не будут находиться в допустимых пределах. Назначается время обработки 10–15 секунд на площадь пучка стержней. С учётом рекомендованного значения величины подачи $S \leq 0,5d$ выбирается число проходов устройства по поверхности детали. При этом желательно производить обработку в один проход.

При наличии нескольких вариантов технологических параметров, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей, выбирается тот, у которого время обработки минимально.

Выводы.

1. Разработана методика расчёта и выбора технологических параметров виброударной отделочной обработки ШСУ.
2. Разработана теоретическая модель процесса формирования профиля поверхности при обработке ШСУ, учитывающая конструктивно-технологические параметры обработки и свойства материала детали.
3. Определены основные закономерности изменения микротвёрдости поверхностного слоя.
4. Получены зависимости для прогнозирования параметров шероховатости обработанной поверхности и характеристик упрочнения поверхностного слоя детали.

Библиографический список

1. А. с. 1539051 СССР, МКИ³ В 24 В39/04. Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей / А. П. Баби́чев [и др.] (СССР). — № 4434509/31-27; заявл. 21.03.88; опубл. 30.01.90, Бюл. № 4. — 3 с.
2. Аксёнов, В. Н. Совершенствование процесса отделочно-упрочняющей обработки многоконтактным виброударным инструментом с учётом ударно-волновых явлений : дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Аксёнов. — Ростов-на-Дону, 2000. — 193 с.
3. Холоденко, Н. Г. Виброударная отделочная обработка гребных винтов в условиях судоремонтного производства : дис. ... канд. техн. наук / Н. Г. Холоденко. — Ростов-на-Дону, 2001. — 160 с.
4. Кудрявцев, И. В. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклёпом / И. В. Кудрявцев. — Москва : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. — 144 с.
5. Кудрявцев, И. В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклёпа ударным способом / И. В. Кудрявцев // Повышение долговечности деталей машин методами поверхностного наклёпа : тр. ЦНИИТМАШ. — 1965. — Вып. 108. — С. 6–34.
6. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. — Москва : Металлургия, 1965. — 172 с.

Материал поступил в редакцию 30.01.2013.

References

1. Babichev, A. P., et al. A. s. 1539051 SSSR, MKI3 V 24 V39/04. Ustrojstvo dlya poverxnostnoj otdelochno-uprochnyayushhej obrabotki detalej. [Author's certificate 1539051 SSSR, MKI3 V 24 V39/04. Device for finishing strengthening part cutting. (USSR)] no. 4434509/31-27, bulletin no. 4, 3 p. (in Russian).
2. Aksenov, V. N. Sovershenstvovanie processa otdelochno-uprochnyayushhej obrabotki mnog-okontakny`m vibroudarny`m instrumentom s uchetom udarno-volnovy`x yavlenij : dis. ... kand. texn. nauk. [Improvement of finishing strengthening treatment with multicontact shock-vibrating tool with account for wave-percussive effects : Cand.of tech.sci.diss.] Rostov-on-Don, 2000, 193 p. (in Russian).
3. Kholodenko, N. G. Vibroudarnaya otdelochnaya obrabotka grebny`x vintov v usloviyax sudoremontnogo proizvodstva : dis. ... kand. texn. nauk. [Shock-vibrating finishing machining of propeller screws under shiprepairing manufacturing conditions : Cand.of tech.sci.diss.] Rostov-on-Don, 2001, 160 p. (in Russian).
4. Kudryavtsev, I. V. Povy`shenie prochnosti i dolgovechnosti krupny`x detalej mashin poverxnostny`m naklepom. [Increasing reliability and durability of large machine components through surface cold working.] Moscow : NIIINFORMTYaZhMASH, 1970, 144 p. (in Russian).
5. Kudryavtsev, I. V. Osnovy` vy`bora rezhima uprochnyayushhego poverxnostnogo naklepa udarny`m sposobom. [Mode selection principles for hardening surface cold working by impact.] Povy`shenie dolgovechnosti detalej mashin metodami poverxnostnogo naklepa : tr. CzNIITMASH. [Increasing durability of machine components through surface cold working technique : Proc. CzNIITMASH.], 1965, iss. 108, pp. 6—34 (in Russian).
6. Drozd, M. S. Opredelenie mexanicheskix svojstv metalla bez razrusheniya. [Nondestructive metal mechanical test.] Moscow : Metallurgiya, 1965, 172 p. (in Russian).

DESIGN OF PART MACHINING WITH BALL-AND-ROD REINFORCER¹

R. Z. Yagudina, M. B. Flek

(Don State Technical University)

The design of the shock-vibrating finish machining with a ball-and-rod reinforcer (BRR) is considered. The essence of the method and the tool design are described. The effective application domains for the ball-and-rod reinforcer are offered. It is important to note that such processing can be used under the local hardening of the individual part segments. The theoretical research of the interaction of a single rod and a workpiece surface under the striker impact is resulted. Dependences to calculate the altitude parameters of the machined surface roughness, the work-hardened layer depth, and the inelastic deformation ratio are offered for various machining conditions and process material specifications. The suggested theoretical dependences have passed the experimental check. The calculation technique for the main process variables of the workpart procedure with the ball-and-rod reinforcer can be based on this data.

Keywords: surface plastic deformation processing, ball-and-rod reinforcer, local hardening, surface coating quality, increase of operational properties, development of technological recommendations.

¹ The research is done within the frame of the independent R&D.