

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.7.01

## Основные пути модернизации конструкции шарико-стержневого упрочнителя для обработки труднодоступных поверхностей деталей

Г.А. Прокопец, С.А. Страхов, Д.Ш. Енгальчев, Р.А. Бельшев

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

### Аннотация

Рассмотрены проблемы проектирования технологического процесса обработки деталей машиностроения, особенно в отношении труднодоступных поверхностей. Отмечено, что методы поверхностного пластического деформирования (ППД), в частности, многоконтактная виброударная обработка с использованием шарико-стержневого упрочнителя (ШСУ), потребовали более глубокого изучения для повышения их эффективности. Проанализированы существующие методы, выделены недостатки и возможности для улучшения конструкции упрочнителя. В частности, предложены варианты модернизации отдельных узлов устройства, что позволило адаптировать конструкцию ШСУ к конкретным условиям обработки. Результаты данного исследования имеют практическое значение для машиностроительных технологий, способствует повышению универсальности и адаптивности ШСУ.

**Ключевые слова:** поверхностное пластическое деформирование, обработка, шарико-стержневой упрочнитель, модернизация

**Для цитирования:** Прокопец Г.А., Страхов С.А., Енгальчев Д.Ш., Бельшев Р.А. Основные пути модернизации конструкции шарико-стержневого упрочнителя для обработки труднодоступных поверхностей деталей. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):9–13.

## Main Options to Modernise the Design of a Ball-Rod Hardener for Machining Hard-to-Reach Surfaces of the Parts

Galina A. Prokopets, Sergey A. Strakhov, Damir S. Engalychev, Roman A. Belyshev

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

### Abstract

The article studies the problems of engineering design process of machining the parts in mechanical engineering, particularly those having hard-to-reach surfaces. It has been acknowledged that surface plastic deformation (SPD) methods, including multi-contact vibroimpact machining using a ball-rod hardener (BRH), require a more in-depth study to improve their efficiency. Existing methods have been analysed, the shortcomings and opportunities for improving the design of a hardener have been identified. In particular, options for modernisation of definite units of an assembly allowing the BRH design to be adapted to specific machining conditions have been proposed. The results of this study have practical value for mechanical engineering technologies and contribute to improving the versatility and adaptability of BRHs.

**Key words:** surface plastic deformation, machining, ball-rod hardener, modernisation

**For Citation:** Prokopets GA, Strakhov SA, Engalychev DS, Belyshev RA. Main Options to Modernise the Design of a Ball-Rod Hardener for Machining Hard-to-Reach Surfaces of the Parts. *Young Researcher of Don*. 2025;10(5):9–13.

**Введение.** Изделия машиностроения отличаются большим разнообразием конструкций и условий эксплуатации, что обуславливает основные требования к качеству деталей, включая их поверхности. При этом одни и те же показатели качества поверхности можно, как правило, обеспечить различными технологическими методами, если таковой не указан конструктором в технической документации. Поэтому проектирование технологического

процесса изготовления деталей с труднодоступными для обработки поверхностями является творческим процессом, требующим не только серьезной профессиональной подготовки технолога, но зачастую и дополнительных экспериментальных исследований, разработки новых схем обработки и конструкций инструментов или их модернизации.

Одним из перспективных методов обеспечения качества поверхностей деталей является обработка, основанная на применении поверхностного пластического деформирования (ППД). Методы обработки, основанные на ППД, отличаются сложным механизмом формирования эксплуатационных свойств, их взаимозависимостью и в настоящее время недостаточной изученностью, в том числе в теоретическом плане. Это тормозит внедрение ряда методов ППД в производство. В связи с этим целью работы является расширение технологических возможностей одного из методов обработки ППД — многоконтактной виброударной обработки шарико-стержневым упрочнителем, что позволит расширить сферу её применения. Для достижения данной цели требуется последовательное решение ряда задач. В частности, одной из задач, нуждающихся в решении на данном этапе, является конструкторско-технологическое обеспечение упрочняюще-стабилизирующей обработки труднодоступных поверхностей деталей.

**Основная часть.** Выбор метода обработки ППД зависит от множества параметров изготавливаемых изделий, а также ограничений, обусловленных в первую очередь эксплуатационными свойствами изделия, преобразованными конструктором в геометрическую форму, размеры и показатели качества как деталей, так и изделия в целом. На первом этапе необходимо провести анализ существующих методов ППД и выявить группу методов с потенциалом для модернизации в соответствии с особенностями поставленной задачи.

В зависимости от градиента изменения энергии воздействия на обрабатываемую поверхность методы поверхностного пластического деформирования делятся на статические (или квазистатические) и ударные (динамические) [1, 2]. В динамических методах энергия воздействия рабочей части инструмента на поверхность обрабатываемой детали изменяется циклически от минимального (иногда нагрузка снимается полностью) до максимального значения с достаточно большой скоростью.

Методы ППД могут быть классифицированы на основе различных признаков. Например, по виду связи энергонесущей обрабатывающей среды с источником энергии можно выделить следующие группы связей: жесткая, квазижесткая, гибкая, квазигибкая. По количеству одновременно воздействующих на поверхность деформирующих элементов методы ППД можно разделить на группу одноконтактных и группу многоконтактных методов и т.д.

В зависимости от вида изделия применяются различные методики выбора технологических приемов для обеспечения преобразованных в конструкторскую форму эксплуатационных свойств изделия. Необходимо учитывать целый ряд различных ограничений, обусловленных условиями реализации таких операций в конкретных производственных условиях.

Рассмотрим особенности проектирования операции при обработке труднодоступных поверхностей детали шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ) [3, 4]. Обработка шарико-стержневым упрочнителем относится к динамическим методам обработки ППД. На поверхность обработки производится воздействие рабочей части инденторов с энергией, которая обеспечивает требуемую локальную пластическую деформацию поверхностного слоя.

Принципиальная (классическая) схема шарико-стержневого упрочнителя представлена на рис. 1. На данной схеме указаны все основные (обязательные) узлы упрочнителя.

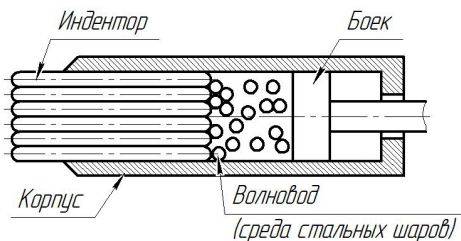


Рис. 1. Принципиальная (классическая) схема и состав ШСУ [3]

ШСУ состоит из шести основных частей (источника ударных импульсов (ИУИ), корпуса, бойка, волновода, пучка инденторов и фиксирующего устройства), каждая из которых может иметь несколько модификаций в зависимости от назначения обработки, технологических ограничений и конструктивных особенностей обрабатываемых изделий [3]. К технологическим ограничениям можно отнести:

- затруднённый доступ к зоне обработки;
- ограничение максимально допустимой энергии, подводимой в зону деформации;
- ограничение зоны обработки;
- параметры шероховатости поверхности после обработки и др.

ШСУ обладает широкими технологическими возможностями, что делает его применение весьма разнообразным [3, 4, 5]. Это включает упрочняющую обработку, отделочную обработку, их совмещение, нанесение специальных микрорельефов (например, частично или полностью регулярных [6]), стабилизацию напряжений в локальной области и другие варианты. Также возможно частичное или полное восстановление ресурса изделия при ремонте конструкций на месте эксплуатации. Возможность ручного использования ШСУ позволяет применять его при ремонте в условиях эксплуатации (например, крупных сварных конструкций).

Физико-механические свойства материала изделий, подвергаемых обработке ШСУ, а также её назначение определяют ряд параметров устройства, как конструктивных (форма корпуса, форма рабочей части инденторов, форма рабочей части бойка и др.), так и технологических (режим обработки, вид привода и т.д.). В рамках данной работы сосредоточимся на конструктивных параметрах ШСУ.

Анализируя классическую схему ШСУ, можно заключить, что данное устройство представляет собой комбинацию специального приспособления и инструмента, в качестве которого используется пучок стальных термообработанных стержней. Эта комбинация обеспечивает практически универсальное устройство для обработки ППД поверхностей деталей сложной формы. Таким образом, дальнейшая модернизация конструкции ШСУ может идти преимущественно по пути повышения степени его специализации, хотя также возможны некоторые конструктивные решения, которые не снизят универсальность ШСУ.

К таким конструктивным решениям, не уменьшающим степень универсальности, можно предложить следующее:

1. Замена материала волновода на более гибкий. Основное назначение волновода по классической схеме — передача ударного импульса от бойка к инденторам благодаря свойству псевдотекучести среды стальных каленых полированных шаров. Данную среду можно заменить гидропластами [7], которые широко используются в станочных приспособлениях для механической обработки деталей. Это повысит равномерность передачи ударного импульса и снизит энергетические потери при его передаче от бойка к инденторам. При этом износ волновода и той части корпуса, которая с ним контактирует, будет практически исключён. Однако это решение требует дополнительных экспериментальных исследований, так как использование этих материалов в качестве волновода наложит ограничения на частоту ударных импульсов. Необходимо также определить соотношение коэффициентов потерь при использовании классического и модернизированного волноводов и обозначить область оптимального применения каждого из них. Возможно, потребуется дополнительная герметизация волновода: например, гидропласт марки МАТА-1-4 не продавливается в зазоры до 0,3 мм при давлениях до  $3 \times 10^7$  Па [7].

2. Объединение волновода и бойка, например, путём передачи энергии источника ударных импульсов непосредственно к среде стальных шаров через гибкую мембрану.

Существуют и иные пути модернизации ШСУ, не снижающие его универсальность. Тем не менее, гораздо больше возможностей для модернизации конструкции ШСУ существуют в том, что касается снижения универсальности устройства при повышении его эффективности в условиях определённых ограничений. При этом конструктивные изменения могут вноситься как в отдельные его составляющие, так и в систему в целом. К ограничительным условиям можно отнести:

- затруднённый доступ к местам обработки (например, обработка внутренних поверхностей труб, угловых соединений);
- ограничение зоны обработки (например, наличие в прилегающей зоне хрупких покрытий);
- ограничение энергии единичного ударного импульса (например, в зависимости от параметров шероховатости);
- необходимость обеспечения определённой траектории взаимного перемещения ШСУ и обрабатываемой поверхности (например, при нанесении регулярных микрорельефов [6]);
- необходимость неравномерной (соблюдающей определённый закон) передачи ударного импульса в зону обработки (например, при «залечивании» внутренних и поверхностных несплошностей в материале детали);
- ограничения по производительности или технологической себестоимости и др.

Приведем некоторые варианты изменения конструктивных решений элементов ШСУ.

1. Боек. На рис. 2 представлена схема со сферически вогнутой рабочей поверхностью бойка, которая позволяет более эффективно «залечивать» несплошности (поры, микротрещины или другие аналогичные дефекты) в подповерхностном слое детали, а также стабилизировать микронапряжения, возникшие в результате предварительной обработки поверхности в определенной зоне, подвергающейся наибольшему эксплуатационным нагрузкам (зоне риска). В этом случае поток энергии направлен на конкретную область или в зону, в которой обнаружена несплошность либо где такая несплошность существует с высокой вероятностью. Возможно также выполнение рабочей части бойка в виде усеченного конуса. На данный момент задача разработки в этой области остается весьма актуальной, особенно на этапе становления аддитивных технологий.

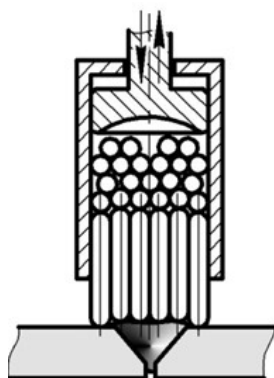


Рис. 2. Схема ШСУ со сферически вогнутой поверхностью бойка

2. Пучок инденторов. Эта часть ШСУ представляет собой совокупность закаленных стержней с определенным сечением направляющей части и заданной формой рабочей (деформирующей) части. В классической схеме применяются три формы пучков инденторов: круглые, шестигранные и прямоугольные. Форма пучка определяется формой и размерами обрабатываемых поверхностей и, в свою очередь, определяет форму и размеры корпуса. При обработке внутренних поверхностей деталей (отверстий, пазов, поднутрений и др.) длина стержней может быть значительно уменьшена, вплоть до выполнения их в виде сферы, что, с одной стороны, снижает гибкость устройства, а с другой — увеличивает равномерность передачи импульса на все инденторы. На рис. 3 представлена модификация инструмента для обработки внутренних поверхностей труб.

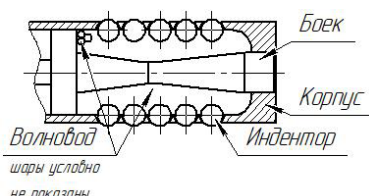


Рис. 3. Модификация ШСУ для обработки внутренних поверхностей

В данном случае длина инденторов минимальна, они выполнены в виде сферы. Возможна обработка вращающимся инструментом с малой угловой скоростью по круговой траектории или с комбинированными подачами, обеспечивающим движение инструмента вдоль обрабатываемой поверхности. В связи с этим целесообразно применение механизированного привода для инструмента или специальной технологической оснастки. Для более равномерной передачи энергии ударного импульса к инденторию боек (толкатель) может быть выполнен в виде двойного конуса (рис. 3).

3. Корпус устройства. Форма корпуса может быть адаптирована к конфигурации обрабатываемой поверхности. Это особенно целесообразно для упрочняющей обработки наиболее нагруженных участков деталей. Высокая гибкость волновода и возможность варьировать длину инденторов в широких пределах позволяют использовать корпусные конструкции различных форм: от цилиндрических при обработке внутренних поверхностей труб (рис. 3) до треугольных, например, при обработке плоских поверхностей типа ласточкиного хвоста.

**Заключение.** Модернизация шарико-стержневого упрочнителя на данном этапе в рамках поставленной задачи может осуществляться в основном путем увеличения специализации — адаптации конструкции упрочнителя к условиям обработки. Кроме предложенных, возможны и другие пути модернизации конструкции ШСУ в зависимости от исходных данных, включая цели обработки, конструктивные параметры деталей и обрабатываемых поверхностей, а также необходимость механизации процесса обработки и т.д.

#### Список литературы

1. Лебедев В.А. Классификация и физико-технологические аспекты динамических методов поверхностно-пластического деформирования. *Advanced Engineering Research*. 2011;11(6(57)):884–891.
2. ГОСТ 18296-72. *Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения*. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c6c/4294834822.pdf?ysclid=mdcvijna7e723202648> (дата обращения: 10.03.2025).
3. Баби́чев А.П., Баби́чев И.А., Самаду́ров В.А., Серге́ев М.А. *Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей*. Авторское свидетельство СССР, № 1230808. 1985. 2 с.

4. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Новокрещенов С.А., Морозов С.А. Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений. *Advanced Engineering Research*. 2020;20(2):143–149.

5. Шевцов С.Н., Аксенов В.Н., Холоденко Н.Г. *Методика расчета конструктивных элементов многоконтактного виброударного инструмента ШСУ*. Вопросы вибрационной техники. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2000. С. 39–46.

6. Прокопец Г.А., Прокопец А.А. Формирование частично регулярного микрорельефа многоконтактной виброударной обработкой. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022;18(1(205)):14–17.

7. Глазков И.Д. Обоснование материалов для приспособления, использующегося для при закреплении тонкостенных деталей типа вал. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;(1(67)):51–54.

**Об авторах:**

**Галина Анатольевна Прокопец**, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [i@aa-pro.ru](mailto:i@aa-pro.ru)

**Сергей Андреевич Страхов**, магистрант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [strakhovserg@yandex.ru](mailto:strakhovserg@yandex.ru)

**Дамир Шамилевич Енгальчев**, бакалавр кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [engalycevdamir0@gmail.com](mailto:engalycevdamir0@gmail.com)

**Роман Андреевич Бельшев**, бакалавр кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [belyshevro@mail.ru](mailto:belyshevro@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 Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [i@aa-pro.ru](mailto:i@aa-pro.ru)

**Sergey A. Strakhov**, Master's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [strakhovserg@yandex.ru](mailto:strakhovserg@yandex.ru)

**Damir S. Engalychev**, Bachelor's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [engalycevdamir0@gmail.com](mailto:engalycevdamir0@gmail.com)

**Roman A. Belyshev**, Bachelor's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [belyshevro@mail.ru](mailto:belyshevro@mail.ru)

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

**All authors have read and approved the final manuscript.**