

УДК 621.7.01

Е. П. Мельникова¹, д-р техн. наук, проф., **Г. А. Прокопец²**, канд. техн. наук,
М. М. Чаава², канд. техн. наук.

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия

²Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тел./Факс: +7 (949) 40-88-909; E-mail: melnikova_adi@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В статье рассматривается влияние на качество изделий одного из перспективных методов обработки поверхностным пластическим деформированием – виброударной обработки. Приводятся результаты исследования влияния амплитуды колебаний рабочей камеры и размера элементов обрабатываемой среды на изменение микротвердости среднеуглеродистых сталей после закалки, дается анализ этих результатов, приведен пример регрессионной зависимости.

Ключевые слова: качество, поверхностное пластическое деформирование, виброударная обработка, эксплуатационные свойства деталей, упрочнение, режим обработки.

E. P. Melnikova, G. A. Prokopets, M. M. Chaava

FEATURES OF THE EFFECT OF VIBRATION-PERCUSSION TREATMENT ON THE SURFACE QUALITY OF ENGINEERING PRODUCTS

The article examines the impact on the quality of products of one of the promising methods of surface plastic deformation treatment – vibration shock treatment. The results of a study of the effect of the amplitude of vibrations of the working chamber and the size of the elements of the processing medium on the change in microhardness of medium-carbon steels after quenching are presented, an analysis of these results is given, and an example of a regression relationship is given.

Keywords: quality, surface plastic deformation, vibro-impact processing, performance properties of parts, hardening, processing mode.

1. Введение

Уровень качества изделий машиностроения является самым точным и обобщающим показателем научно-технического прогресса. Целью повышения качества изделий машиностроения является как улучшение эксплуатационных свойств изделия, так и повышение его надежности, что приводит к увеличению срока его эксплуатации [1, 2].

Повышение надежности деталей машин и их узлов является одной из важнейших задач. Для ее решения имеет целый арсенал современных способов, как конструктивного, так и технологического характера. Среди перспективных технологических методов, обеспечивающих повышение надежности и долговечности изделий, особое место занимает упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД). Упрочнение методами ППД успешно применяется для формирования заданных конструктором эксплуатационных свойств поверхностей в различных отраслях машиностроения, в том числе автомобилестроении, авиастроении и др.

ППД применяется для упрочнения поверхностей деталей, как с малыми габаритными размерами, так и весьма крупных размеров, изготавливаемых из различных материалов в различных структурных состояниях. Во многих случаях удается в 1,5...3 раза повысить запас прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, и соответственно в несколько раз увеличить срок их службы. Например, согласно

исследованиям Папшева Д. Д. упрочнение роликов и бандажей шаровых мельниц увеличило ресурс их работы в 2,5...8,5 раз, упрочнение дорожек качения внутренних колец увеличило долговечность роликовых и шариковых подшипников в 1,6...2,2 раза, а стойкость упрочненного режущего инструмента из вольфрамовой стали возросла в 1,7...3,5 раза [3].

При этом могут использоваться разные схемы обработки, может осуществляться как обработка всей поверхности деталей, так и адресная обработка отдельных их поверхностей и др. [4, 5, 6].

Высокая эффективность и технологичность методов ППД отводит им роль значительного резерва повышения качества изделий машиностроения [3–6]. Практика применения методов ППД подтверждает целесообразность их использования для широкой номенклатуры деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, изнашивания, действия корродирующих веществ и др. Кроме того, технологические операции, основанные на использовании ППД, характеризуются малоотходностью, а зачастую и безотходностью.

Большими достоинствами обработки ППД являются разнообразие схем обработки и, зачастую, высокая гибкость процесса. С другой стороны данные достоинства влекут за собой сложность теоретического описания протекающих процессов и необходимость значительного объема экспериментальных исследований для адаптации результатов теоретических заключений к конкретным условиям обработки. Актуальность исследований обусловлена еще и целесообразностью расширения области применения ППД в машиностроении, которая остается все еще недостаточной, а также необходимостью оптимизации процессов.

2. Основное содержание и результаты работы

Методы обработки ППД относятся к группе финишных методов. Финишные методы обработки должны окончательно сформировать требуемый уровень эксплуатационных свойств поверхностей деталей, поэтому к их результатам предъявляются повышенные требования. Исследования влияния ППД на эксплуатационные свойства посвящено значительное число работ. Ряд аспектов влияния ППД на эксплуатационные свойства рассмотрены в работах [1, 2, 7]. В частности, в работе [7] подробно рассмотрены вопросы оценки влияния ППД на усталостную износостойкость поверхностных слоев, а также на усталостную долговечность деталей на основе энергетического подхода, проведен глубокий анализ процесса, разработаны соответствующие модели.

Методы ППД отличаются большим разнообразием. Укрупненно их делят на статические и динамические. Вторые весьма сложны в описании и еще недостаточно изучены, в том числе с точки зрения перспектив внедрения в производство, которые представляются достаточно широкими.

Одним из перспективных динамических методов ППД, обладающих широкими технологическими возможностями и отвечающих повышенным требованиям к финишным методам обработки, является виброударная обработка (ВиУО) [8]. ВиУО в базовом варианте представляет собой стохастический динамический процесс пластического деформирования поверхностного слоя материала детали за счет нанесения по нему ударов частицами обрабатывающей среды. В качестве обрабатывающей среды обычно используются металлические тела. Наиболее распространенным видом обрабатывающей среды является совокупность несвязанных между собой стальных полированных закаленных шаров или роликов из Стали ШХ15.

При этом обработка может осуществляться с непрерывной или периодической подачей технологической жидкости (СОТС) или всухую [4]. Если обработка производится с применением СОТС, то фактически она является неотъемлемой частью обрабатывающей среды. Обрабатывающая среда вместе с обрабатываемыми деталями помещается в рабочую камеру, вибрирующую в соответствии с определенным законом.

Изучение изменения характеристик материала поверхностного слоя деталей под действием поверхностной пластической деформации в процессе ВиУО является прямым отражением процессов, протекающих в структуре материала и необходимо для выработки корректного подхода к выбору технологических параметров обработки. Например, если основной целью обработки является повышение сопротивления усталости, то это достигается в основном за счет формирования в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Хотя и формирование стохастического микрорельефа, характеризующегося отсутствием микроконцентраторов напряжений, также имеет немалое значение.

При этом на результат обработки оказывает большое влияние различных факторов, как внешних, так и внутренних, а также состояние окружающей среды. Кроме того, обрабатываемые детали изготавливаются из различных материалов, подвергаются (или не подвергаются) термической обработке, имеют различную форму и размеры и т.д. В связи с этим назначение параметров обработки только на основе данных об объекте обработки, полученном из конструкторской документации, и на обобщенных теоретических зависимостях приводит к значительным ошибкам. Что приводит к необходимости установления корректной связи между технологией обработки, структурой и свойствами материала, требуемыми параметрами качества деталей, параметрами заготовки и т.д., а это кроме подробного теоретического анализа процесса обработки требует экспериментальной проверки.

В большинстве случаев ВиУО используется для упрочняющей обработки, хоть может применяться для других целей, например формирования регулярных микрорельефов на поверхностях деталей, управления отражательной способностью поверхности и др. Под упрочнением понимают повышение свойств, характеризующих сопротивление деформации (HV , σ_B , $\sigma_{0,2}$), и снижение способности к пластической деформации в результате предварительной пластической деформации, протекающей при температурах $(0,15...0,2) \times T_{пл}$. ($T_{пл}$ – температура плавления) [9]. Таким образом, результат упрочнения может оцениваться по изменению любого из этих параметров. Однако, так как при ППД изменения в структуре происходят в тонком поверхностном слое, то в рамках поставленной задачи, целесообразно оценить результат обработки по изменению величины микротвердости поверхности и поверхностного слоя. Методики такого контроля стандартизованы.

Был проведен комплекс металлографических исследований с целью выявления влияния двух важнейших составляющих ВиУО на изменение микротвердости среднеуглеродистых сталей после закалки и низкого отпуска, а именно:

- амплитуды колебаний рабочей камеры – А;
- размера элементов обрабатывающей среды (инструмента), в данном случае – стальных закаленных полированных шаров из стали ШХ15 – D.

Такие исследования позволяют выявить связь между технологическими режимами виброударной обработки и структурными изменениями в материале детали, соответственно, качеством и эксплуатационными свойствами упрочненного слоя материала, что позволяет оценить корректность проектирования технологической операции ВиУО, а также позволяет произвести оптимизацию ее параметров (например,

амплитуды колебаний рабочей камеры) по критерию трудоемкости T , мин. Предварительный анализ литературных источников показал, что как правило, зависимость $T(A)$ носит экстремальный характер.

Экспериментальные исследования проводились на призматических образцах, закрепленных парами в струбцинах, в состоянии свободной загрузки. Микротвердость поверхности контролировалась в исходном состоянии и в процессе обработки. По результатам контроля процесса были построены графические зависимости $H_{\mu}(A)$ для трех видов обрабатываемых сред и получена регрессионная модель, описывающая изменение микротвердости от амплитуды при обработке в стальных шарах диаметром 3 мм.

При разработке методики эксперимента принимался ряд допущений, в том числе следующие:

- физико-механические свойства материала образцов по всему их объему и на поверхности одинаковые;
- шероховатость обрабатываемой поверхности носит стохастический характер и ее среднее значение одинаковое по всей плоскости обработки;
- масса загрузки однородная, скорость циркуляции массы загрузки постоянная.

Результаты некоторых исследований представлены на рисунке 1. По результатам измерений были построены графические зависимости, иллюстрирующие изменение величины микротвердости поверхности при ВиУО в зависимости от изменения амплитуды колебаний рабочей камеры. На рисунке 1 представлены три зависимости: при обработке в обрабатываемых средах стальных шаров трех размеров (шары диаметром $\varnothing 14$ мм, $\varnothing 8$ мм, $\varnothing 3$ мм).

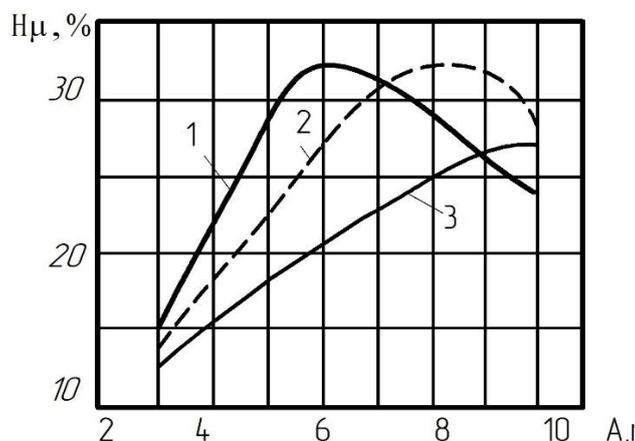


Рисунок 1. Результаты операции ВиУО: а – внешний вид обработанной поверхности; б – изменение прироста микротвердости в зависимости от амплитуды колебаний рабочей камеры при обработке в обрабатываемой среде стальных шаров диаметром: 1 – $\varnothing 14$ мм, 2 – $\varnothing 8$ мм, 3 – $\varnothing 3$ мм

Построенные графические зависимости показывают идентичность характера изменения величины микротвердости в зависимости от изменения амплитуды колебаний рабочей камеры. Форма графика подтверждает наличие глобального оптимума (максимума), расположение которого зависит от как от размера отдельной частицы обрабатываемой среды, который в значительной степени определяет ее

энергетические характеристики в момент соударения с обрабатываемой поверхностью и площадь их контакта, так и от амплитуды колебаний рабочей камеры.

Из графика можно определить величину амплитуды и размеры частиц (шаров) обрабатываемой среды, позволяющие получить максимальную величину упрочнения. Анализ зависимостей показывает, что оба параметра пригодны для использования в качестве параметра управления для формирования заданного результата обработки (требуемой степени упрочнения поверхности).

Как известно, степень упрочнения в каждый момент времени зависит от величины энергии соударения частицы рабочей среды с обрабатываемой поверхностью и кратности ее приложения. Однако, степень упрочнения зависит и от характеристик физико-механических свойств материала поверхностного слоя. Так как в исходном состоянии образцы были термообработаны (закалка + низкий отпуск), то структура материала была достаточно стабильна, но при этом материал имел достаточно высокую твердость. Именно с этим связано достаточно небольшое увеличение микротвердости: 14...21%. В результате виброударной обработки увеличивается плотность дислокаций, изменяется внутризеренная структура, возникают малоугловые границы, происходит измельчение зерен структуры материала поверхностного слоя деталей. В процессе ВиУО под действием пластической деформации увеличивается диффузионная подвижность атомов углерода, приводящая к частичному распаду мартенсита с выделением карбидной фазы. Структура становится более гомогенной, затрудняется визуализация границ между структурными составляющими. Таким образом, суммарный эффект обработки зависит от относительного вклада каждого из этих процессов и определяется следующими факторами: повышением уровня внутренней энергии материала за счет увеличения плотности дислокаций; повышением уровня поверхностной свободной энергии, связанным с появлением малоугловых границ, формированием субзеренной структуры, которые являются препятствиями для скольжения дислокаций; выделением дисперсных частиц второй фазы (карбидов), которые формируют препятствия на пути движения дислокаций. Кроме того, в результате ВиУО происходит стабилизация структуры, которая в свою очередь, обеспечивает стабильность эксплуатационных характеристик деталей в процессе их эксплуатации, что особенно важно для ответственных деталей, в том числе деталей авиастроения.

Из графика (рисунок 1б) также видно, что существует некоторая критическая величина поглощаемой материалом энергии, после которой возникает перенаклеп (разупрочнение), то есть процесс становится нецелесообразным при постановке любых задач обработки. Таким образом на основе таких исследований можно определить область определения значений режима обработки и характеристик обрабатываемой среды в условиях поставленной цели обработки.

Все экспериментальные зависимости, представленные на графике (рисунок 1б) могут быть описаны регрессионными моделями, представляющими собой полиномы третьего порядка. Например, для описания зависимости микротвердости поверхности (в единицах микротвердости $H\mu$) от амплитуды колебаний рабочей камеры A при ВиУО шарами диаметром 3 мм можно использовать регрессионную зависимость (1), дающую достоверность аппроксимации 0,997:

$$H\mu = -0.0224xA^3 + 05482xA^2 + 6.1481xA + 969.64 \quad (1)$$

По зависимости (1) можно определить необходимую амплитуду колебаний рабочей камеры для получения заданной степени упрочнения.

3. Заключение

Для дальнейшего развития и более широкого практического применения ВиУО с целью повышения качества изделий машиностроения и повышения стабильности технологической операции ВиУО требуется еще значительный объем теоретических и экспериментальных исследований. Большая сложность протекающих при ВиУО процессов и наличие комплекса взаимосвязанных механизмов формирования эксплуатационных свойств делают практически невозможным чисто теоретическое описание процесса упрочнения при ВиО. Поэтому очень большое значение имеют экспериментальные исследования. Приведенные результаты исследований показывают возможность адекватного описания процесса путем введения соответствующих коэффициентов в теоретические зависимости или разработки регрессионных моделей. Проведение экспериментальных исследований дает возможность разработки основ для решения вопросов оптимизации технологической операции упрочнения ВиАО.

Анализ возможности автоматизации процесса ВиАО показал необходимость обеспечения обратной связи для управления процессом, для поддержания стабильности режима обработки (который, как правило, определяется на основе результатов предварительно проведенных исследований) с целью обеспечения заданной степени упрочнения.

Все вышесказанное позволит обеспечить расширение области применения обработки ППД, в том числе ВиАО.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лебедев В. А., Прокопец Г. А., Корольков Ю. В., Шишкина А. П. Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин. Учебное пособие. Москва. Изд. Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2024
2. Мельникова Е. П., Прокопец Г. А., Прокопец А. А. Обеспечение качества изделий на основе обоснования метода финишной обработки и ее надежности. Ж: Упрочняющие технологии и покрытия. Изд. "Инновационное Машиностроение". Т. 16, № 9. 2020 С. 427-432.
3. Папшев Д. Д. Роль ППД в научно-техническом прогрессе машиностроения. В сб. Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов. Всесоюзная научно-техническая конференция. Брянск, 21-23 октября 1986 г. тезисы докладов. Брянск, 1986. С.4-5.
4. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии: Монография / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Изд-во: ДГТУ, 2008 г.
5. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: [справочник]: в 2 т. – Т. 1 / общ. ред. Суслов А. Г. / Суслов А. Г., Блюменштейн В. Ю., Гуров Р. В. [и др.]. – М.: Машиностроение, 2014. – 477 с.
6. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: [справочник]: в 2 т. – Т.2 / общ. ред. Суслов А. Г. / Суслов А. Г., Бабичев А. П., Киричек А. В. [и др.]. – М.: Машиностроение, 2014. – 444 с.
7. Соколов В.Д., Лебедев В.В., Давыдова И.В., Ломовцев А.А. Оценка влияния

ППД на повышение эксплуатационных свойств деталей с позиций энергетического подхода. В сб. трудов по материалам международного научного симпозиума технологов-машиностроителей. (г. Ростов-на-Дону, 30 сентября – 3 октября 2015 г.). Ростов н/Д, 2015. С. 122-130.

8. Лебедев В. А., Прокопец Г. А., Мотренко П. Д., Чучукалов А. П. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. Глава в справочнике «Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования» под ред. Зайдеса С. А. Изд.: Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, 2021 С. 216-234

9. Гуляев А. П. Материаловедение. М.: Металлургия, 1986.

Поступила в редколлегию 15.05.2025 г.