

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.787.6

DOI: 10.12737/2017

Об особенностях упрочняющей обработки в условиях виброволнового нагружения***А. П. Бабичев, Н. С. Коваль, А. В. Алексеенко**

(Донской государственный технический университет),

Д. В. Максимов

(ОАО «Роствертол»)

Рассматривается возможность использования ударно-волновых явлений при создании и внедрении на производстве эффективных, прогрессивных технологических процессов. На основе анализа технологических схем виброволновой обработки выявлены основные этапы реализации рассматриваемого метода: формирование волн деформаций, их распространение, изменение характеристик и воздействие на материал обрабатываемой поверхности детали. Проведены экспериментальные исследования волновых процессов при виброволновой обработке детали. Представлены их результаты. Показано, что на процесс упрочнения поверхностного слоя влияют волны деформаций (их суммирование, рассеивание в окружающую среду, преломление), а также некоторые конструктивные параметры волноводных устройств и инструментов. Приведены наиболее распространённые технологические схемы виброволновой обработки. Рассмотрены вопросы, связанные с их совершенствованием.

Ключевые слова: виброволновая обработка, волноводное устройство, волны деформации, упрочняющая обработка, шарико-стержневой упрочнитель.

Введение. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД), в том числе и динамическими методами (например, виброударной обработкой), применяется при обработке широкой номенклатуры деталей [1, 2]. В большинстве работ, посвящённых данному вопросу, исследуются результаты упрочнения (изменение состояния материала) поверхностного слоя, подвергаемого нагружению. То есть речь идёт только о лицевой (контактной) поверхности. Состояние противоположной стороны (тыльной) не рассматривается. Известно, что ударное или вибрационное (виброударное) воздействие на тела и среды различных характеристик сопровождается волновыми явлениями. Их роль при решении технологических задач может оказаться достаточно заметной. В частности, описано преобразование колебаний и волн для высокоэффективного воздействия на объекты обработки (детали, образцы), обеспечивающего рост производительности и качества [3]. В ряде работ отмечается проявление откольных явлений материала тыльной стороны образца при волновом нагружении [2, 3].

Роль волновых явлений при виброволновом нагружении. При воздействии волн на твёрдое тело в нём возникает характерная волновая картина деформирования структуры. При этом наблюдается переход в другое агрегатное состояние или пластическое течение. В работе [4] отмечается образование вторичных структур при воздействии (прохождении) волн. При этом повышается микротвёрдость и происходят определённые структурные изменения. Образование основной и побочных зон с изменённой структурой и их периодичность обусловлены интерференцией волн.

Анализ особенностей волновых процессов в силовой системе позволяет выделить несколько этапов.

* Работа выполнена по договору № 99 с ОАО «Роствертол».

Сначала формируется волна деформации — с определёнными формой, максимальным значением усилий (амплитудой волны), временем действия усилий (длительностью волны) и энергией. Эти характеристики зависят от геометрии соударяющихся элементов, свойств их материалов и скорости соударения.

Далее волна распространяется по волноводу — и её форма изменяется, а энергия уменьшается вследствие рассеяния в окружающую среду и внутреннего трения в волноводе. Интенсивность этих изменений зависит от конструкции и размеров волновода, деформирующих свойств его материала, свойств окружающей среды, наличия соединений в волноводе, качества контактных поверхностей и ряда других факторов.

В связи с этим параметры волны деформации, подходящей к обрабатываемой поверхности (следующий этап рассматриваемого процесса) могут отличаться от параметров начальной волны. Распространяясь по волноводу и воздействуя на инструмент, контактирующий с обрабатываемой поверхностью, волна деформации приводит к внедрению инструмента в обрабатываемую поверхность и образованию пластических отпечатков или разрушению.

Основываясь на приведённых соображениях, волновые процессы в силовых импульсных системах можно условно разделить на следующие виды: формирование волн деформации в волноводе; передача волн деформаций по волноводу к обрабатываемой поверхности; воздействие волн деформаций, отражённых от обрабатываемой поверхности, на ударный элемент инструмента.

Совершенствование процессов и инструментов виброволновой обработки предполагает повышение их производительности, улучшение эксплуатационных характеристик обрабатываемых деталей и инструмента, снижение энергозатрат на осуществление технологического процесса, а также обеспечение требуемых и экологических характеристик.

Таким образом, создание новых и совершенствование существующих волновых инструментов и процессов предполагает решение следующих задач:

- формирование в волноводе волн деформаций с рациональными параметрами и обеспечение наиболее эффективной передачи энергии бойка в волновод;
- передача волн деформаций по волноводам с минимальными потерями энергии удара;
- обеспечение эффективной передачи энергии волн деформаций в материал обрабатываемой детали или среду;
- минимизация вредного воздействия на элементы ударного механизма волн деформаций, отражённых от обрабатываемой детали или среды.

Экспериментальные исследования технологических схем виброволновой обработки.

Учитывая приведённые выше соображения, проанализируем варианты технологических схем с использованием волновых процессов и результаты их экспериментальной проверки. (Рассматривается виброволновая обработка в уплотнённой гранулируемой среде многоконтактными виброволновыми инструментами и системами с использованием стержневых волнопроводов.)

В первой из приводимых технологических схем предусматривается возможность всесторонней виброударной обработки детали, помещённой в уплотнённую среду упрочняющих тел (стальные закалённые или твердосплавные шары). Предполагается, что сообщение ударных импульсов с внешней стороны вызовет распространение деформационных волн в системе, в том числе и деформацию поверхностного слоя детали. Была поставлена задача: проверить возможность всесторонней упрочняющей обработки деталей, проявления эффекта обработки на лицевой и тыльной стороне. Для этого проводились экспериментальные исследования распространения ударного импульса и волн деформации в специальном устройстве — в среде стальных шаров, помещённых в замкнутый объём, с уплотнением (рис. 1).

На образцах, установленных на наружной и внутренней поверхностях устройства, имитирующего элемент корпусной или трубчатой детали, остаются пластические отпечатки. Их количество позволяет контролировать распространение и реализацию волн деформаций.

Итак, в рабочую камеру, заполненную стальными шарами диаметром 6 мм, помещался стальной корпус коробчатой формы. На его стенках закреплялись образцы (медные пластины с полированной поверхностью). Шариковая среда уплотнялась путём приложения к подвижной торцевой стенке рабочей камеры груза массой $M = 10, 20$ и 30 кг. Для ударного нагружения на крышку камеры с высоты 1 м сбрасывались грузы массой 1 кг, 2 кг, 5 кг и 30 кг. Фиксированное число ударов $N_{уд}$ принято равным $1, 5, 10$ и 30 .

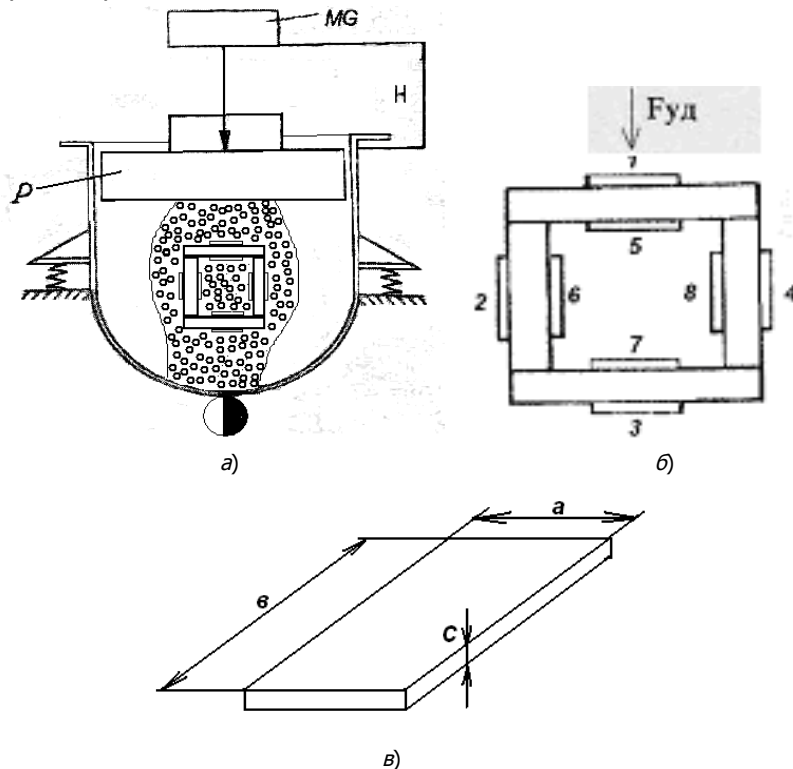


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: а — схема нагружения; б — схема расположения образцов; в — форма образца

Исследовалась зависимость количества образующихся на поверхности образцов пластических отпечатков $N_{отп}$ от числа сообщаемых ударов $N_{уд}$. Образцы располагались по линии удара и перпендикулярно ей, на наружных и внутренних поверхностях корпуса [4, 5]. В табл. 1 представлены результаты данного исследования.

Таблица 1

Влияние расположения образцов в корпусе на количество образующихся пластических отпечатков $N_{отп}$

Расположение по линии удара				Расположение поперёк линии удара			
Внешнее		Внутреннее		Внешнее		Внутреннее	
№ образца	$N_{отп}$	№ образца	$N_{отп}$	№ образца	$N_{отп}$	№ образца	$N_{отп}$
1	163	5	47	2	72	6	39
3	107	7	35	4	55	8	29

С увеличением числа наносимых ударов пропорционально растёт и количество образующихся отпечатков на всех образцах. При этом отмечается чёткое различие количественного распределения отпечатков по линии удара и перпендикулярно ей, а также на внешних образцах и внутренних.

В пределах рассмотренных групп образцов (по линии удара и перпендикулярно ей, а также внешних и внутренних) наблюдается относительно небольшое различие $N_{отп}$. Исключение — группа внешних образцов, расположенных по линии удара. Разница в количестве отпечатков на образце № 1 (расположен ближе к источнику ударного импульса) и на образце № 3 (расположен на противоположной внешней стороне) составляет 34,3 %.

Ниже приводятся соотношения $N_{отп}$ для образцов, различно ориентированных относительно источника ударных импульсов (см. рис. 1, б). Анализ количества отпечатков на образцах, расположенных на внутренних и наружных поверхностях приспособления (рис. 1, б; табл. 1), позволил обнаружить пропорции, представленные в табл. 2. Под «линией удара» понимают направление сообщения удара $F_{уд}$.

Таблица 2

Соотношения $N_{отп}$ для различно ориентированных образцов относительно источника ударных импульсов

Соотношение $\frac{N_{отп} \text{ по линии удара } \downarrow}{N_{отп} \text{ поперек линии удара } \rightarrow}$	
Внешние поверхности $\frac{N_{отп} \downarrow}{N_{отп} \rightarrow} = 2,13$	Внутренние поверхности $\frac{N_{отп} \downarrow}{N_{отп} \rightarrow} = 1,2$
Соотношение $\frac{N_{отп} \text{ внешних поверхностей (Н) } \downarrow}{N_{отп} \text{ внутренних поверхностей (ВН) } \rightarrow}$	
Внешние поверхности $\frac{N_{отп (Н)} \downarrow}{N_{отп (ВН)} \rightarrow} = 3,3$	Внутренние поверхности $\frac{N_{отп (Н)} \downarrow}{N_{отп (ВН)} \rightarrow} = 1,88$

С увеличением энергии виброволнового нагружения среды отмечается рост количества пластических отпечатков $N_{отп}$. Исследования показали, что в закрытом объёме, заполненном средой стальных шаров, волны деформаций от одного источника распространяются по всем направлениям объёма.

На основе полученных результатов предложена технологическая схема виброволновой упрочняющей обработки детали трубчатой формы поверхностным пластическим деформированием в уплотнённой среде стальных шаров (рис. 2).

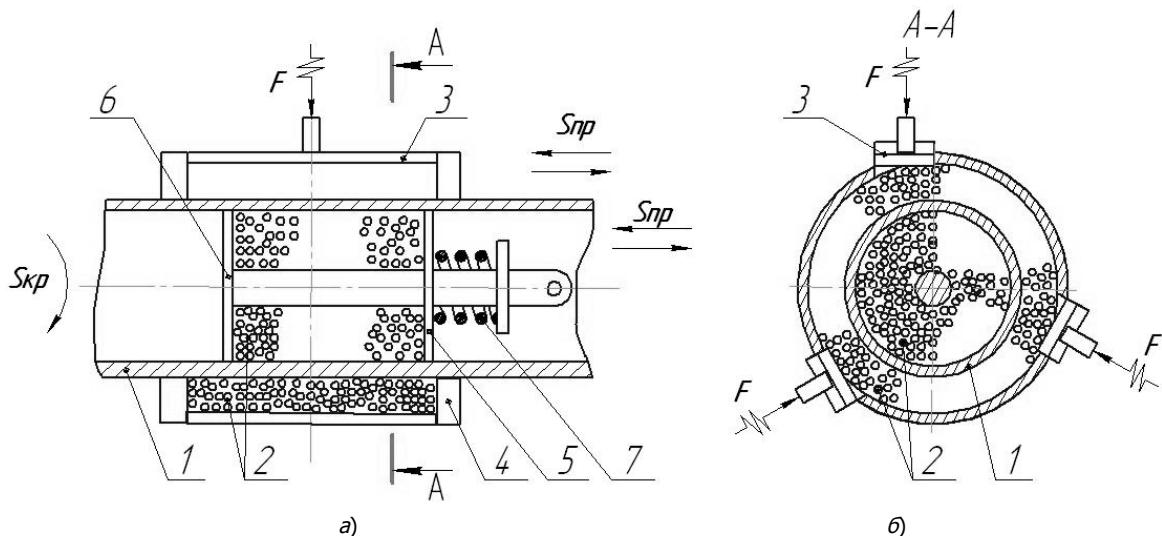


Рис. 2. Приспособление, иллюстрирующее технологическую схему виброволновой обработки детали трубчатой формы: а — вид спереди, б — вид А-А для пояснения принципа работы; 1 — обрабатываемая деталь; 2 — среда стальных шаров; 3 — поджатие среды; 4 — корпус; 5, 6 — ограничители среды; 7 — пружина

Следующая схема предусматривает возможность создания многоконтактного инструмента для виброволновой упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием фасонных поверхностей. Созданный по этой схеме инструмент получил название шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ). Его схема представлена на рис. 3.

Деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность оказывает система стержней. В конструкции инструмента предусмотрено устройство для удержания стержней и шаров от высыпания в нерабочем положении.

В ходе технологических испытаний ШСУ обрабатывались плоские и цилиндрические поверхности, галтели, сварные швы.

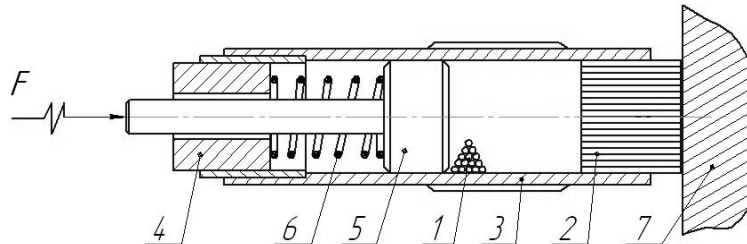


Рис. 3. Схема шарико-стержневой упрочнителя: 1 — шариковая среда; 2 — стержни (инструмент); 3 — корпус; 4 — гайка; 5 — боек (поршень); 6 — пружина; 7 — обрабатываемая деталь

Варианты схем нагружения и положения ШСУ: вручную на специализированном рабочем месте и с встраиванием в технологические системы фрезерных и токарных станков. Отмечена достаточно высокая интенсивность деформирования поверхностного слоя. Обработанная поверхность представляет систему многократно перекрывающихся друг друга пластических отпечатков, образующихся за счёт относительного перемещения (подачи) обрабатываемой детали (образцов) и инструмента.

Разработка схемы передачи волн деформаций с помощью стержневого волновода преследовала и другие цели. Необходимо было выявить, возможно ли удалить источник виброволнового нагружения из зоны обработки с последующей его изоляцией (это позволит снизить шум) или подвести компактный инструмент волновой системы в труднодоступные места обрабатываемой детали. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 4.

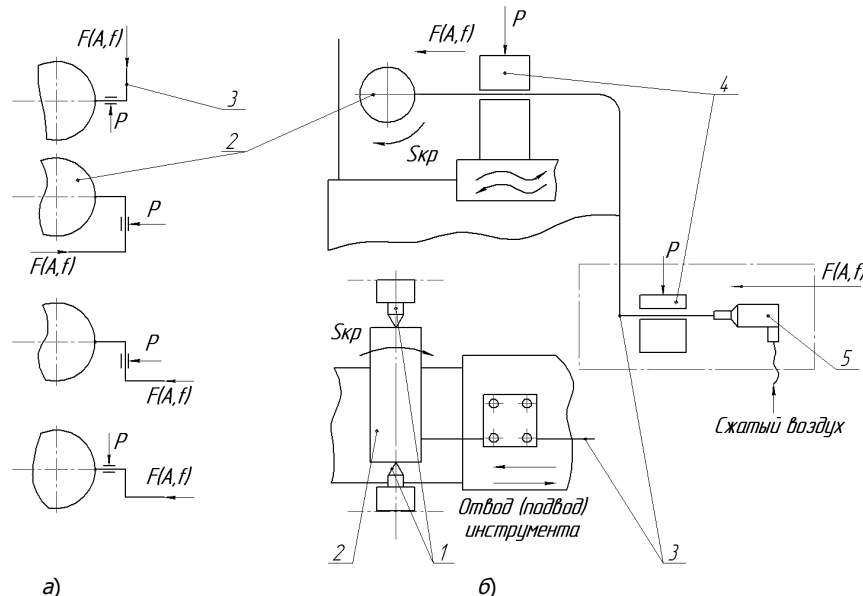


Рис. 4. Схема нагружения стержневого волновода: а — форма стержневых волноводов; б — схема нагружения; 1 — конус; 2 — образец; 3 — волновод (стержень); 4 — держатель; 5 — пневмударник, P — усилие, развиваемое держателем; F — ударно-волновое воздействие (характеризуется амплитудой A и частотой f колебаний)

Виброволновое нагружение передавалось от пневмоударника по изогнутому стержневому волноводу, в том числе в противоположном от обрабатываемой поверхности направлении (см. рис. 4). Таким образом исключалась возможность перемещения стержня (волновода) за счёт его деформации и зазоров (или недостаточного закрепления) в ударноволновой системе. Время ударного воздействия $t = 30, 60, 120$ с. Плоские образцы изготовлены из стали 30ХГСА, алюминиевого сплава АК6 и меди. Диаметр и длина стержневого волновода составляли соответственно $d_b = 8$ и 14 мм и $l = 1000$ мм. Материал стержня — сталь 30ХГСА отожжённая. Пластические отпечатки наносились в 5 точках и по результатам измерений определялся средний диаметр отпечатков d_{cp} .

Фиксировался также момент первичного касания элемента волновода с поверхностью образца по наличию и размерам исходного отпечатка. Пластические отпечатки измерялись с помощью бинокулярного микроскопа.

В ходе эксперимента отмечено образование пластических отпечатков на поверхности образца. Это следствие прохождения волн по волноводу. В табл. 3, 4 представлены результаты измерений среднего диаметра отпечатков d_{cp} .

Таблица 3

Средний диаметр отпечатка d_{cp} после виброволновой обработки пластины из сплава АК6 волноводом диаметром $d_b = 8$ мм и длиной $l = 1000$ мм

Размеры пластических отпечатков d_{cp} , мм			
Касание стержня	Удар пневмоударником $t = 30$ с	Удар пневмоударником $t = 60$ с	Удар пневмоударником $t = 120$ с
0,380	1,265	1,409	1,679

Эксперименты также проводились на стальном и медном образцах, время их обработки составляло 30 с. Диаметр образовавшегося отпечатка стального образца $d_{отп} = 0,975$ мм; медного образца — $d_{отп} = 1,040$ мм.

Сравнивалось использование стержневых волноводов разных диаметров ($d_b = 8$ и 14 мм). При нагружении дюралевого образца $d_b = 8$ мм в течение 120 с $d_{отп} = 1,68$, а при $d_b = 14$ мм $d_{отп} = 2,5$ мм — т. е. диаметр пластических отпечатков увеличился в среднем на 45 %.

Таблица 4

Средний диаметр отпечатка d_{cp} после виброволновой обработки пластины из сплава АК6 волноводом диаметром $d_b = 14$ мм и длиной $l = 1000$ мм

Размеры пластических отпечатков d_{cp} , мм, при условии:			
Касание стержня	Удар пневмоударником $t = 30$ с	Удар пневмоударником $t = 60$ с	Удар пневмоударником $t = 120$ с
0,409	1,439	2,008	2,462

Наряду с использованием сплошного (цельного) волновода проведён эксперимент с применением составного волновода. Он состоит из двух стержней (стальные прутки) $d_b = 14$ мм длиной $l = 300$ мм и $l = 600$ мм. Удар сообщался по волноводу длиной $l = 300$ мм и передавался образцу через волновод длиной $l = 600$ мм. Также удар сообщался по волноводу длиной $l = 600$ мм и передавался образцу через волновод длиной $l = 300$ мм. Рассматривались диаметры полученных отпечатков на образце. Отмечено увеличение $d_{отп}$ во втором случае. Так, при нагружении в течение $t = 120$ с $d_{отп}$ по схеме «300—600 мм» $d_{отп}$ составил 2,1 мм, а по схеме «600—300 мм» — 2,5 мм.

Произведена первичная экспериментальная проверка передачи волн деформации через «гибкую» шариковую среду (волновод) на многоконтактную (многостержневую) систему стержней (инструмента), находящуюся в контакте с обрабатываемой поверхностью. Для эксперимента использован шарико-стержневой упрочнитель с 18 и 40 стержнями в пучке. Вместо пневмоударника к бойку ШСУ подводился стержневой волновод, на другой конец которого осуществлялось нагружение пневмоударником. Результаты данного эксперимента контролировались аналогично приве-

дённым выше и подтвердили возможность передачи волн по стержневому волноводу на много-контактный инструмент (ШСУ). В частности, при виброволновом нагружении волновода в течение 120 с диаметр пластических отпечатков от ШСУ с пучком стержней 18 шт. составил 1,14 мм.

При этом на поверхности дюралевого образца отмечено меньшее количество пластических отпечатков, чем количество стержней ШСУ (18 стержней — 9 отпечатков).

При использовании ШСУ с количеством стержней $N_{ст} = 40$ диаметр отпечатков после 300 с виброволнового нагружения составил 0,5 мм.

Уменьшение $d_{отп}$ в последнем случае (по сравнению с 18-стержневым ШСУ) можно объяснить тем, что энергия виброволнового нагружения рассеивается на большее количество контактных стержней инструмента.

Регистрация и измерение отпечатков на алюминиевых образцах позволили отметить следующую особенность. Независимо от типа волновода (прямого или изогнутого) количество отпечатков на поверхности образцов составляет не более 65 % от количества стержней.

Для изучения результатов прохождения волн сквозь пакет образцов проведён поисковый эксперимент по схеме, представленной на рис. 5. Результаты измерения говорят об изменении (увеличении) микротвёрдости как на лицевой стороне, так и на противоположной (тыльной).

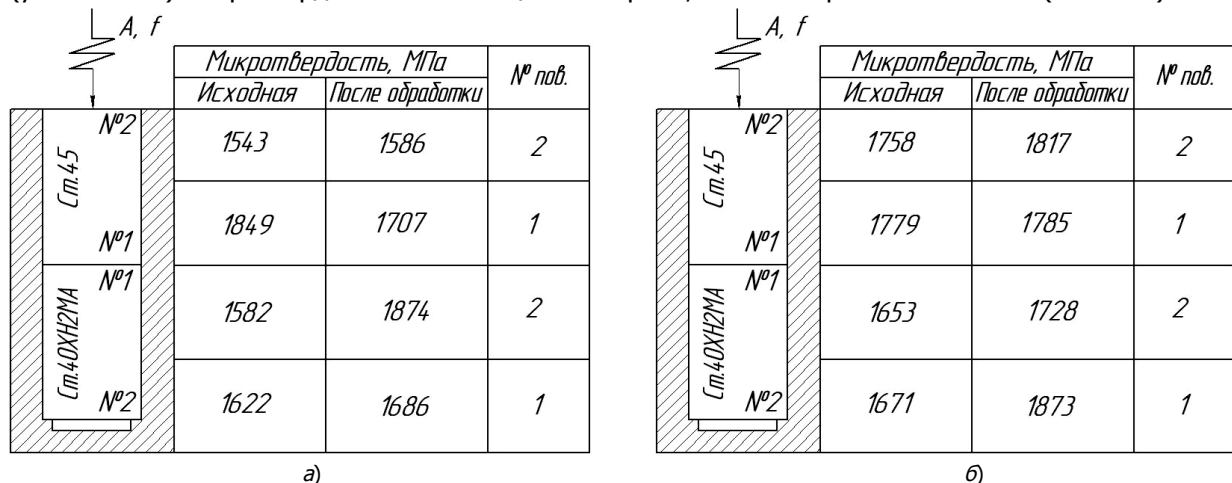


Рис. 5. Изменение микротвёрдости поверхностного слоя образцов, подвергнутых виброволновому нагружению в течение: а — 30 мин и б — 45 мин

Виброволновое нагружение осуществлялось путём обработки в среде стальных шаров в течение 30 и 45 минут при амплитуде и частоте колебаний соответственно $A = 2,5$ мм; $f = 30$ Гц. Материал образцов — сталь 45 и 40ХН2МА.

На рис. 5 представлено расположение образцов в пакете, нумерация поверхностей и результаты измерений микротвёрдости.

Выводы.

1. Получено подтверждение эффективности волнового (виброволнового) воздействия на состояние материала не только на контактной (лицевой) стороне, но и на противоположной (тыльной).
2. Показаны результаты объёмного проявления волновых процессов в замкнутой уплотнённой среде стальных шаров, которые могут быть использованы при всесторонней обработке деталей по рассматриваемой технологической схеме нагружения.
3. Волновое нагружение шариковой среды (гибкий волновод) для передачи волн деформаций на обрабатываемую поверхность через систему инденторов (стержней) может быть использовано при упрочняющей обработке поверхностей различной кривизны. Приведён пример создания соответствующего инструмента.

4. Полученные результаты являются основанием для дальнейшей обстоятельной работы в области данного исследования.

Библиографический список

1. Ахмадеев, Н. Х. Динамическое откольное разрушение в волнах разгрузки / Н. Х. Ахмадеев, Р. И. Нигматулин. — Москва : ДАН СССР, 1982. — 1134 с.
2. Баскаков, В. А. Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твёрдое тело : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В. А. Баскаков. — Чебоксары, 1991. — 37 с.
3. Алимов, О. Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О. Д. Алимов, В. К. Манжосов. — Москва : Наука, 1985. — 342 с.
4. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А. П. Бабичев [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2003. — 191 с.
5. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 1999. — 621 с.

Материал поступил в редакцию 5.06.2013.

References

1. Akhmadeyev, N. K., Nigmatulin, R. I. Dinamicheskoye otkolnoye razrusheniye v volnakh razgruzki. [Dynamic spallation distraction in unloading waves.] Moscow : DAN USSR, 1982, 1134 p. (in Russian).
2. Baskakov, V. A. Analiz rasprostraneniya i dinamicheskogo vozdeystviya udarnykh voln na deformiruyemoye telo. [Analysis of distribution and dynamic effects of shock waves on a deformable solid : Dr. Physics and Maths sci. diss., author's abstract.] Cheboksary, 1991, 37 p. (in Russian).
3. Alimov, O. D., Manzhosov, V. K. Udar. Rasprostraneniye voln deformatsiy v udarnykh sistemakh. [Impact. Deformation wave propagation in impactor systems.] Moscow : Nauka, 1985, 342 p. (in Russian).
4. Babichev, A. P., et al. Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka detaley mnogokontaktnym vibroudarnym instrumentom. [Finishing and hardening part machining with multi-contact vibro-impactor tool.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 2003, 191 p. (in Russian).
5. Babichev, A. P., Babichev, I. A. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii. [Vibration technology fundamentals.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 1999, 621 p. (in Russian).

ON STRENGTHENING TREATMENT FEATURES UNDER VIBROWAVE LOADING*

A. P. Babichev, N. S. Koval, A. V. Alexeyenko

(Don State Technical University),

D. V. Maximov

('Rostvertol' JSC)

The problems associated with the possibility of the effective use of percussion-wave phenomena to create and implement advanced technological processes in industries are considered. Based on the analysis of vibrowave treatment process diagrams, the main steps of the method implementation are identified: deformation wave shaping, wave propagation, behavior, and affecting on the processed surface of the workpiece material. The experimental research on the wave processes under vibrowave part processing is resulted. It is shown that the skin hardening is affected by the deformation waves (their summation, dispersion into the environment, refraction), as well as by some part specifications of the waveguide devices and instruments. The most common vibrowave treatment process diagrams are performed, issues on their development are considered.

Keywords: vibrowave processing, waveguide device, strain waves, strengthening processing, ball-core strengthener.

* The research is done within the frame of Contract No. 99 with 'Rostvertol' JSC.