



УДК 621.778:537–8

Поступила 30.03.2015

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЗАГОТОВОК РЕССОР

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ULTRASONIC OSCILLATORY SYSTEM, FOR HARDENING OF SPRING PLATE BILLETS

В. А. ТОМИЛО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

V. A. TOMILO, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Разработаны различные схемы ультразвуковой колебательной системы: с «силоначувствительной» опорой, «силочувствительной» опорой, насыщенными деформирующими стальными шариками. Результаты ультразвуковой обработки показали, что упрочнение поверхности образцов имеет место при амплитудах колебаний излучателя, превышающих определенный уровень, причем степень упрочнения возрастает с увеличением амплитуды колебаний излучателя. Более высокая степень упрочнения проявляется при обработке поверхности стальными шариками.

Various schemes of ultrasonic oscillatory system are developed: with a «force nonsensitive» support, with a «force sensitive» support, with the deforming steel balls in bulk. Results of the ultrasonic treatment showed that hardening of a surface of the samples took place when the vibration amplitude of a radiator exceeds a certain level. The level of hardening increases with increase in amplitude of fluctuations of a radiator. Higher level of hardening is registered when the surface is treated by steel balls.

Ключевые слова. *Ультразвуковая колебательная система, опора, амплитуда, излучатель, упрочнение поверхности.*

Keywords. *Ultrasonic oscillatory system, support, amplitude, radiator, hardening of a surface.*

В Физико-техническом институте НАН Беларуси и Белорусском национальном техническом университете заложены научные и технологические основы промышленного применения ультразвука для усовершенствования процессов обработки металлов давлением: прокатки, волочения, а также пробивки, вырубки и формоизменения листовых материалов. В данной работе приведены материалы, посвященные исследованию влияния ультразвукового воздействия на прочностные свойства стальных изделий, в частности, заготовок рессор; разработке основных требований к ультразвуковым колебательным системам; разработке схем упрочняющей ультразвуковой обработки.

Поскольку при поверхностном ультразвуковом упрочнении деформирующий инструмент-концентратор находится в контакте с обрабатываемым изделием, причем упрочнение происходит в результате ударного взаимодействия, то возникает необходимость исследовать динамику взаимодействия преобразователя с изделием-отражателем, которые прижаты друг к другу с некоторой статической силой [1]. В этом случае возрастает эффективность обработки материала, но наличие ударного взаимодействия между волноводом и отражателем (деталью) вносит существенную нелинейность в характер движения ультразвуковой колебательной системы. В работе [2] показано, что при взаимодействии двух ультразвуковых преобразователей можно рассматривать каждый преобразователь в отдельности как взаимодействующий с упругим ограничителем, а в [3] приведены результаты экспериментальных исследований основных динамических характеристик преобразователя, взаимодействующего с упругим ограничителем. В [4] рассматривается теоретически и экспериментально способ возбуждения ультразвукового преобразователя, работающего на нелинейную нагрузку, который реализуется введением контура обратной связи с запаздыванием.

Были проведены экспериментальные исследования основных динамических характеристик магнитострикционного преобразователя, прижатого к волноводу-отражателю полуволновой длины, а также

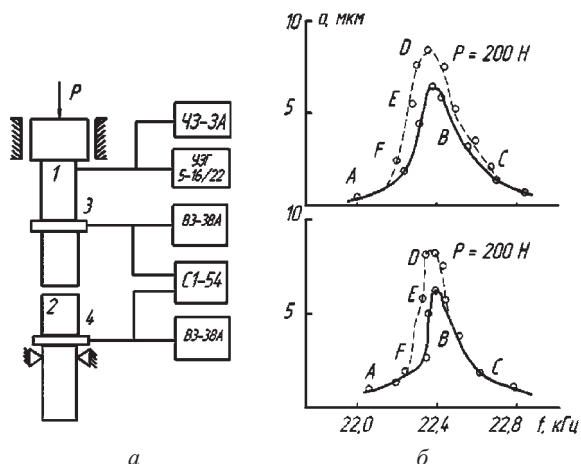


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и амплитудно-частотная характеристика (б): верхняя – магнитострикционного преобразователя, нижняя – волновода-отражателя

принцип действия которых основан на обратном магнитострикционном эффекте. Датчики крепили в пучности напряжений волноводов, которые представляют собой катушки, содержащие по 500 витков провода. Такая катушка формирует сигнал порядка 100 мВ при амплитуде колебаний около 10 мкм. С каждого датчика сигнал подавали на милливольтметр ВЗ-38А и двухканальный осциллограф С1-64. Тарировку датчиков амплитуды проводили с помощью микроскопа МИ-1. Показания осциллографа позволяли судить об относительном движении контактирующих торцов волноводов. Через колебательную систему пропускали постоянный ток. По размыканию цепи постоянного тока можно достаточно точно определять моменты отсоединения контактирующих сечений колебательной системы.

Частоту колебаний ультразвуковой колебательной системы измеряли частотомером ЧЗ-3А. Магнитострикционный преобразователь поджимали к волноводу-отражателю постоянной силой с помощью набора грузов, которые устанавливали на специальную площадку, закрепленную в узле смещения магнитострикционного преобразователя.

Введем некоторые определения. Режимы работы, при которых магнитострикционный преобразователь не взаимодействует с отражателем, будем называть режимами холостого хода в отличие от рабочих режимов, при которых происходит взаимодействие магнитострикционного преобразователя с полуволновым отражателем. Следует различать рабочие режимы двух типов: ударные и безударные. Под ударными будем понимать такие, при которых происходит разрыв контактирующих сечений волноводов. Рабочие режимы, при которых контактирующие сечения движутся совместно или в противофазе в пределах контактной деформации, будем называть безударными.

На рис. 1, б приведена амплитудно-частотная характеристика рабочего режима колебательной системы при силе прижатия $P = 200$ Н. Проявлением нелинейных свойств системы является наличие областей двузначности амплитудно-частотной характеристики. Выход на ту или иную ветвь характеристики определяется направлением изменения частоты, как показано стрелками на рисунке, при изменении частоты в сторону увеличения на участке AB наблюдаются ударные колебания контактирующих торцов, но с увеличением силы поджатия до 500 Н на этом участке возникают безударные колебания. Возникновение ударного режима колебаний при $P = 200$ Н можно объяснить малой контактной деформацией по сравнению с амплитудой продольных колебаний. Выход на ветвь CD осуществляется при уменьшении частоты из-за резонансной области. В точке D происходит срыв колебаний скачком в точку E . На участке EF наблюдаются интенсивные радиальные колебания, наличие которых можно объяснить несовпадением участка EF с участком AB при срыве ударных колебаний. Двузначность амплитудно-частотной характеристики справа от резонанса и срыв колебаний в точке D объясняются в рамках теории виброударных систем в работе [3]. При сравнении теории с проведенными экспериментами следует иметь в виду, что вследствие малой контактной жесткости реальной системы резонансные частоты ударного и безотрывного режимов близки. Поэтому их амплитудно-частотные характеристики накладываются (рис. 1, б).

В результате проведенных экспериментов было установлено, что резонансная частота ударных режимов колебательной системы увеличивается с ростом силы поджатия. Для рассматриваемой колеба-

исследования возможностей возбуждения такой колебательной системы введением контура обратной связи с запаздыванием. В [5] подробно изложена методика проведения экспериментов, а также приведены результаты исследований и показано, что нелинейность колебательной системы существенно влияет на ее работу.

Эксперименты проводили на установке, схема которой показана на рис. 1, а. Экспериментальная установка включает в себя магнитострикционный преобразователь с волноводом 1; волновод-отражатель полуволновой длины, закрепленный в узле смещений 2; датчики амплитуды колебаний торцов магнитострикционного преобразователя и отражателя соответственно 3, 4. Волноводы изготовлены из стали 45. Питание магнитостриктора осуществлялось от генератора УЗГ5-1,6/22, который допускал регулирование частоты возбуждения и амплитуды колебаний вибратора в широких пределах. Для регистрации амплитуды колебаний использовали датчики,

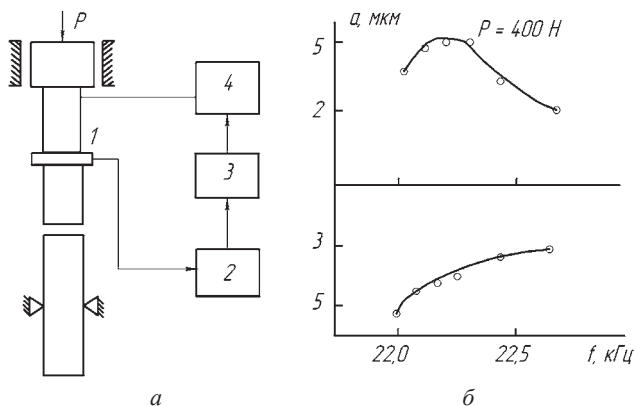


Рис. 2. Схема автоколебательного способа возбуждения магнестрикционного преобразователя (а), верхняя кривая – амплитудно-частотная характеристика магнестрикционного преобразователя при автоколебательном способе возбуждения; нижняя – зависимость частоты автоколебаний от времени запаздывания (б)

затем проходил через звено запаздывания 3 и подавался на усилитель 4. Изменяя уровень насыщения усилителя и время запаздывания, можно регулировать амплитуду и частоту колебаний. Результаты эксперимента, полученные при $P = 400$ Н, представлены на рис. 2, б, иллюстрирующем характер изменения амплитуды ударного взаимодействия торца магнестрикционного преобразователя с отражателем и частоты автоколебаний f при плавном изменении величины $\tau = 4t_0 f$, где t_0 – время запаздывания. Следует отметить, что если заранее установить необходимую величину времени запаздывания, которая зависит от силы поджатия, то при включении система самовозбуждается и выходит на резонансный ударный режим, соответствующий заданной силе поджатия без какой-либо дополнительной подстройки.

Таким образом, применение автоколебательной схемы возбуждения с запаздыванием в контуре обратной связи позволяет создавать производительные, адаптивные ультразвуковые системы целевого технологического назначения.

Рассмотрим механизм разгрузки ультразвуковой колебательной системы в зависимости от действия величины статической силы поджатия [3]. Как уже отмечалось, для решения ряда технологических задач обработки металлов давлением к колебательной системе требуется прикладывать большие статические усилия. При этом необходимо сохранить виброударный режим взаимодействия инструмента с изделием, например, при поверхностном пластическом упрочнении ультразвуковым инструментом. Как показано в [1, 6], при осевом нагружении ультразвуковых колебательных систем существует предельная сила поджатия, при которой еще возможны ударные колебания.

Основой устройства является «силонечувствительная» опора. Она состоит из втулки, имеющей длину, равную половине длины ультразвуковой волны, одним концом жестко соединенной с концентратором колебаний в пучности смещений. Другой конец втулки свободен. На втулке имеется фланец, размещенный в узле смещения, к которому прикладывается статическая нагрузка.

Для определения основных динамических характеристик указанной колебательной системы и выяснения физического механизма ее разгрузки проводили эксперименты на установке, схема которой показана на рис. 3.

Экспериментальная установка включает в себя магнестрикционный преобразователь 1 с волноводом диаметром 30 мм, втулку с наружным диаметром 40 мм, внутренним 32 мм, имеющую длину, равную половине длины ультразвуковой волны в материале втулки 2, датчик амплитуды колебаний торца ультразвуковой системы 3, датчик силы ударного взаимодействия торца волновода с изделием 4. Волновод и втулка изготовлены из стали 45.

Возбуждение магнестрикционного преобразователя производилось от генератора УЗГ5-1,6/22 электрической мощностью 1,5 кВт, который работал в режиме независимого

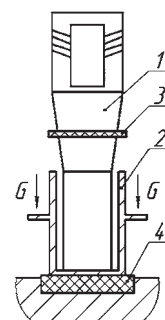


Рис. 3. Схема ультразвуковой колебательной системы с «силонечувствительной» опорой

тельной системы предельная сила поджатия P , при которой еще возможны ударные колебания, равна 750 Н.

Как было показано выше, нелинейные эффекты, возникающие при этом, затрудняют настройку системы в режиме вынужденных колебаний. Вместе с тем, резонансные ударные режимы могут быть получены при автоколебательной схеме возбуждения, осуществляемой цепью запаздывающей обратной связи [4]. На рис. 2, а показана схема установки, в которой напряжение питания обмоток магнестриктора формируется усилителем 4, имеющим релейную характеристику и преобразующим сигнал, пропорциональный напряжению какого-либо элемента колебательной системы.

Для интенсификации технологических процессов необходимо, чтобы такой сигнал снимался с датчика 1, предварительно усиливался усилителем 2,

возбуждения, осуществляемого от генератора сигналов ГЗ-112/1. Такая схема подключения давала возможность менять частоту рабочего напряжения на преобразователе в диапазоне от 8 до 30 кГц. Частота регистрировалась частотомером Ф5034. Для регистрации амплитуды колебаний использовали датчик, принцип действия которого основан на обратном магнитострикционном эффекте. Датчик крепили в пучности напряжений волновода. С датчика сигнал подавался на милливольтметр ВЗ-38А. Тарировку датчика амплитуды проводили с помощью микроскопа МИ-1 для колебательной системы совместно с «силонечувствительной» опорой и без нее. Статическое поджатие колебательной системы к плоскости осуществляли на разрывной машине «Инстрон». В процессе взаимодействия торца колебательной системы с плоскостью регистрировалась сила удара с помощью пьезодатчика [1]. Собственная частота датчика порядка 90 кГц. Сигнал с пьезодатчика подавался на милливольтметр ВЗ-38А и осциллограф С1-75, с экрана которого и фотографировали осциллограммы.

Как показано в [3], пьезодатчик ведет себя как жесткая пружина с линейной упругой характеристикой: время удара не зависит от его скорости, а амплитуда снимаемого при ударе сигнала пропорциональна скорости в момент начала удара, что позволяет легко его тарировать.

Для тарировки воспользуемся теоремой импульсов. При виброударном режиме взаимодействия торца волновода ультразвуковой колебательной системы, поджатой к изделию статической силой, справедливо следующее равенство:

$$GT = \int_0^{2\tau} F dt, \quad (1)$$

где T – период колебаний ультразвуковой системы; 2τ – время удара; F – закон изменения силы удара.

Вследствие линейности датчика силу удара можно записать так:

$$F = kA \sin \frac{\pi}{2\tau} t, \quad (2)$$

где A – амплитуда сигнала, снимаемого во время удара; k – масштабный коэффициент силы, зависящий от скорости в момент начала удара.

Показания вольтметра при снятии сигнала с датчика определим следующим образом:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2 dx} = A \sqrt{\frac{\tau}{T}}. \quad (3)$$

Из выражений (1)–(3) найдем зависимость масштабного коэффициента силы от колебательной скорости V_b торца волновода:

$$k = \frac{G\pi}{2U(V_k)}. \quad (4)$$

Запишем равенство (1) в более наглядном виде с учетом (4)

$$G = \frac{2Uk(V_k)}{\pi}. \quad (5)$$

Следует отметить, что равенство (5) не выполняется, если торцовое сечение волновода в процессе взаимодействия постоянно прижато к обрабатываемой поверхности. Это обусловлено тем, что в уравнении (5) не все импульсы сил учтены, в частности, импульс силы реакции обрабатываемой поверхности. В том случае если наблюдается виброударный режим взаимодействия, а равенство (5) не выполняется, это будет означать, что торцовое сечение колебательной системы полностью не отрывается от датчика.

В табл. 1 приведены основные результаты экспериментов по динамике ультразвуковой колебательной системы с разгрузкой. Для всех статических усилий поджатия выбраны резонансные виброударные режимы. Как видно из результатов экспериментов, с одной стороны, равенство (5) для колебательной системы с «силонечувствительной» опорой не выполняется, с другой – анализ осциллограмм указывает на виброударный характер взаимодействия. Это означает, что торцовое сечение отрывается от плоскости не по всей площади. В результате экспериментов установлено также, что с увеличением статической силы поджатия резонансная частота смещается в сторону более высоких частот. В частотной характеристике ультразвуковой колебательной системы с разгрузкой во всем диапазоне статических сил поджатия, приведенных в табл. 1, областей двузначности не наблюдается, в то время как в частотной характеристике волновода без «силонечувствительной» опоры области двузначности присутствуют [3, 7].

Таблица 1. Результаты экспериментов по динамике ультразвуковой колебательной системы с разгрузкой

G , кН	A , мкм	f , кГц	U , В	$2Uk/\pi$, кН
5	7,8	18,996	17	0,303
10	8,7	19,135	19	0,302
20	9,5	19,232	26	0,397
30	8,7	19,279	40	0,637
60	8,5	19,386	28	0,446
70	7,5	19,564	42	0,775
100	6,2	19,760	33	0,840
0	11	18,691	–	–

Примечание. A – амплитуда колебаний торца волновода, f – резонансная частота.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы: в процессе обработки ультразвуковая колебательная система с разгрузкой опирается на изделие с постоянным контактом по контуру торца втулки; торец такой колебательной системы можно рассматривать как пластину, опирающуюся по контуру, с которой жестко связан волновод с магнито-стрикционным преобразователем; торец волновода установлен по отношению к обрабатываемой поверхности с нулевым зазором, что является причиной изохронности частотной характеристики колебательной системы [2].

В работе [4] рассмотрены некоторые особенности и результаты ультразвукового ударного упрочнения поверхности металлов и сплавов. Метод ультразвуковой ударной обработки поверхности может быть реализован в двух вариантах: связанными (имеющими одну степень свободы перемещения) деформирующими элементами и свободными рабочими телами.

Метод ультразвуковой обработки поверхности связанными деформирующими элементами к настоящему времени достаточно подробно описан в литературе, в то время как основные закономерности метода ультразвуковой обработки поверхности свободными рабочими телами еще нуждаются в обсуждении.

В задачу проведенных исследований входило сопоставление особенностей изменения состояния поверхностного слоя с акустическими и технологическими параметрами процесса ультразвуковой ударной обработки свободными рабочими телами.

При анализе механизма поверхностного упрочнения металлов были рассмотрены два физических процесса, играющих в нем основную роль:

- 1) соударение возбужденного ультразвуковыми колебаниями и движущегося с определенной скоростью рабочего тела с поверхностью образца;
- 2) пластическая деформация поверхностных слоев образца.

При рассмотрении процесса соударения рабочего тела с поверхностью образца была оценена сила удара рабочего тела о поверхность обрабатываемого металла в зависимости от технологических параметров процесса: амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний, плотности материала и размеров рабочего тела, количества рабочих тел, расстояния между образцом и излучателем.

Для выявления характера ультразвукового воздействия на изменение механических характеристик поверхностного слоя и его глубину были проведены оценки возможной степени упрочнения, пороговой амплитуды колебаний, глубины упрочненного слоя, времени обработки, необходимого для реализации на поверхности равномерного упрочненного слоя. Расчеты проводили для металлов с различной кристаллической структурой.

Анализируя результаты расчетов, следует отметить, что наибольшую степень упрочнения можно ожидать в металлах с ГЦК-решеткой. Пороговая амплитуда и время обработки снижаются с уменьшением предела текучести материала.

Экспериментальные исследования были проведены на следующих материалах:

- чистые металлы с различной кристаллической структурой (ОЦЕ – Al, Ni, Cu; ГЦК – Fe, Nb, Mo; ГПУ – Mg, Ti, Co) и известными механическими свойствами, для которых выше были проведены расчеты возможной степени упрочнения и глубины упрочненного слоя. Обработку этих материалов проводили с целью сопоставления расчетных и экспериментальных результатов;

- образцы промышленных сплавов на основе железа (углеродистые и аустенитные стали, чугуны, сплавы системы Fe–В, полученные по порошковой технологии), меди (бронза) и алюминия (сплавы системы Al–Mg–Si), широко используемые в машиностроительной практике;

- реальные детали машиностроительного назначения, изготовленные из низколегированной и аустенитной сталей, более или менее сложной геометрической формы для выявления технических возможностей метода упрочнения с ультразвуком.

Результаты ультразвуковой обработки показали, что упрочнение поверхности образцов имело место при амплитудах колебаний излучателя, превышающих определенный уровень. Степень упрочнения возрастала с увеличением амплитуды колебаний излучателя. Эффект начинал проявляться при времени обработки свыше 30 с. Максимальная степень упрочнения наблюдалась при времени обработки 360 с, затем степень упрочнения уменьшалась [7].

Более высокая степень упрочнения имела место при обработке поверхности шариками диаметром 3,2 мм по сравнению с шариками диаметром 0,6 мм. Использование в качестве рабочих тел шариков из карбида вольфрама давало более высокую степень упрочнения.

Наилучшие результаты были получены при размещении на поверхности одного слоя рабочих тел. С увеличением расстояния между излучателем и образцом степень упрочнения снижалась. Некоторые из полученных результатов приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Влияние ультразвука на степень упрочнения различных металлов

Металл	Условия обработки	HV*	Степень упрочнения $k, \%^{**}$
Алюминий	С	96	100
	U	193	
Никель	С	211	50
	U	315	
Железо	С	193	45
	U	280	
Ниобий	С	520	17
	U	608	
Магний	С	120	56
	U	187	
Кобальт	С	330	26
	U	416	

Примечание. *Нагрузка 50 г. $^{**}k = HV_u - HV_c / HV_c$.

Таблица 3. Влияние ультразвука на степень упрочнения и чистоту поверхности различных сплавов

Сплав	Условия обработки	HV (нагрузка 50 г)	Степень упрочнения, %	Шероховатость поверхности Ra, мкм
AlMgSi	С	60	166	0,54122
	U	160		5,66064
90MnV8	С	215	18	0,38384
	U	255		1,92802
Система Fe–В	С	181	51	
	U	273		
X18H9T	С	173	32	0,71255
	U	229		0,67032

Сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретического анализа процесса соударения рабочего тела с образцом показало их качественное и в ряде случаев количественное соответствие.

Анализируя полученные результаты по влиянию ультразвуковых и технологических параметров процесса на степень поверхностного упрочнения, можно с достаточным основанием предположить, что она будет определяться тремя факторами: силой удара шарика об образец, продолжительностью обработки и природой обрабатываемого материала (модулем упругости и его прочностными характеристиками). Сказанное справедливо для материалов, в которых ультразвуковое упрочнение не сопровождается фазовыми переходами (например, типа $\gamma \rightarrow \alpha$ для сталей). Фазовый переход может внести свой вклад в процесс поверхностного упрочнения.

Упрочнение с помощью мощных ультразвуковых колебаний целесообразно использовать для плоских полос рессор. Иногда встречаются рессоры и плоские пружины с резкими перепадами толщин, крепежными элементами, ребрами жесткости и др. Их упрочняют дробеструйной обработкой. В таких случаях целесообразно использовать разработанные авторами способы ультразвуковой поверхностной пластической обработки.

На рис. 4 показан общий вид устройства для поверхностного ультразвукового упрочнения пластин рессор с насыпными деформирующими шариками [8], которое включает в себя ультразвуковой генератор гармонических сигналов (на рисунке не показан), электроакустический преобразователь 1 с концентратором 2, закрепленным на его торце узлом деформирования, выполненным в виде камеры 3, заполненной свободно насыпанными металлическими шариками 4, причем камера 3 узла деформирования снабжена поперечным пазом 5, у основания которого установлены опорные ролики 6. Для перемещения рессорных пластин 7 по опорным роликам 6 в полости паза 5 устройство снабжено приводным обрезиненным роликом 8.

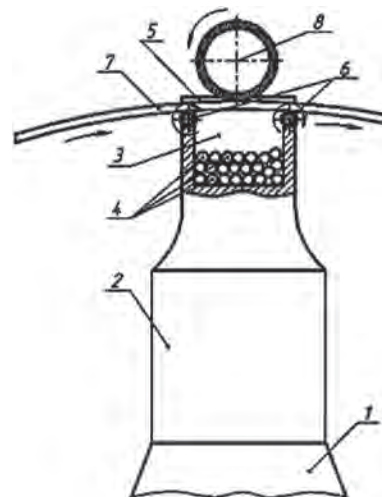


Рис. 4. Устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения плоских упругих элементов с насыпными деформирующими шариками

Устройство работает следующим образом. Обрабатываемая рессорная пластина 7 укладывается в паз 5 на опорные ролики 6, одновременно прижимается и приводится в движение при помощи приводного обрезиненного ролика 8. После включения ультразвукового генератора в электроакустическом преобразователе 1 возбуждают механические колебания ультразвуковой частоты в диапазоне 22 кГц, которые посредством концентратора 2 возбуждают в слое металлических шариков 4 колебания той же частоты 22 кГц и придают им ускорение, необходимое для удара об обрабатываемую поверхность рессорной пластины 7. Размер шариков может колебаться от 0,5 до 1,0 мм. Помимо собственно упрочнения на представленном устройстве можно осуществлять нанесение на поверхность рессоры различных покрытий – цинковых антикоррозионных, антифрикционных, например диоксид молибдена, графит и др. Для этого в контейнер с шариками помещают требуемые материалы в виде мелкодисперсных порошков, которые «зачеканиваются» в обрабатываемую поверхность при ударах шариков.

Представляет интерес устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения плоских упругих элементов [9] с закрепленными деформирующими шариками (рис. 5), включающее в себя ультразвуковой генератор гармонических сигналов, электроакустический преобразователь 1 с концентратором 2, за-

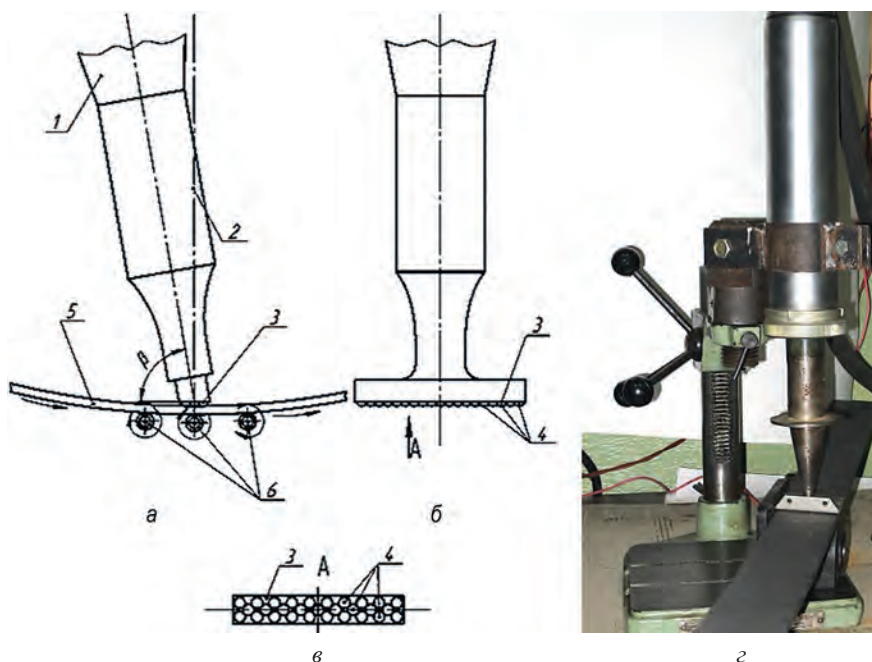


Рис. 5. Устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения плоских упругих элементов с закрепленными деформирующими шариками: а, б, в – схема устройства; з – общий вид

крепленным на его торце деформирующим элементом 3, выполненным в виде сфер 4, выступающих над торцом концентратора 2 на одинаковую высоту, причем ширина деформирующего элемента 3 равна ширине обрабатываемой поверхности пластины рессоры 5, а рабочая поверхность деформирующего элемента 3 расположена под углом к продольной оси концентратора 2. Для перемещения пластин рессор 5 вдоль концентратора 2 устройство снабжено опорными роликами 6.

Устройство работает следующим образом. Обрабатываемая пластина рессоры 5 укладывается на опорные ролики 6. Деформирующий элемент 3 своей рабочей поверхностью прижимается к обрабатываемой поверхности пластины рессоры 5. После включения ультразвукового генератора в преобразователе 1 возбуждают механические колебания ультразвуковой частоты, которые посредством концентратора 2 возбуждают в деформирующем элементе 3 колебания той же частоты, необходимые для обработки поверхности рессорной пластины рессоры 5. За счет того, что рабочая поверхность деформирующего элемента 3 расположена под углом к продольной оси концентратора 2, в процессе обработки поверхности пластины рессоры 5 одновременно происходит перемещение пластины рессоры 5 по опорным роликам 6. Данное устройство позволяет производить строго регламентированную обработку, варьируя диаметром и расположением шариков в деформирующем элементе, а также углом его наклона β . Однако имеются ограничения по ширине обрабатываемой полосы. В широком деформирующем элементе возможно возникновение нежелательных изгибных колебаний.

Выводы

В процессе выполнения работы были разработаны и исследованы различные схемы ультразвуковой колебательной системы: с «силонечувствительной» опорой, «силочувствительной» опорой, насыпными деформирующими стальными шариками. Результаты ультразвуковой обработки показали, что упрочнение поверхности образцов имеет место при амплитудах колебаний излучателя, превышающих определенный уровень, причем степень упрочнения возрастает с увеличением амплитуды колебаний излучателя. Более высокая степень упрочнения проявляется при обработке поверхности стальными шариками.

Литература

1. Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Минск: Наука и техника, 1973. 286 с.
2. Северденко В. П. Ультразвук и пластичность / В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. Минск: Наука и техника, 1976.
3. Асташев В. К. Возбуждение и стабилизация резонансных колебаний ультразвуковых стержневых систем / В. К. Асташев, М. Е. Герц // Акустический журнал. 1976. Т. 22. № 2. С. 192–200.
4. Асташев В. К. Расчет стержневых концентраторов с нелинейной нагрузкой // Акустический журнал. 1981. Т. 27. С. 821–827.
5. Артемьев В. В. Ультразвук и обработка материалов / В. В. Артемьев, В. В. Клубович, В. В. Рубаник. Минск: Беларуская навука, 2003.
6. Артемьев В. В. Ультразвуковые виброударные процессы на процессы / В. В. Артемьев, В. В. Клубович, В. Н. Сакевич. Минск, 2004.
7. Клубович В. В. Влияние ультразвука на процесс пластической деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1963.
8. Бабицкий В. И. Теория виброударных систем. М.: Наука, 1978.
9. Устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения пластин рессор: пат. 3992 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 24В 39/00 / В. В. Клубович, В. А. Томило, Е. В. Хрущев, Н. М. Лаппо; заявитель БНТУ, ГНУ «ИТА НАН Беларуси» – № и 20070317; Заявл. 27.04.07. опубл. 2007.10.30// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 5.
10. Устройство для поверхностного ультразвукового упрочнения плоских упругих элементов: пат. 3879 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 21D 7/00, В 24В 39/00, В 24С 1/10 / Клубович В. В., Томило В. А., Хрущев Е. В., Марусич В. И.; заявитель БНТУ, ГНУ «ИТА НАН Беларуси» – №и20060187; Заявл. 20.03.07; опубл. 2007.10.30// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 5. С. 193.

References

1. Severdenko V. P., Klubovich V. V., Stepanenko A. V. *Obrabotka metallov davleniem s ul'trazvukom* [Metaldeformation process with ultrasound]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1973. 286 p.
2. Severdenko V. P., Klubovich V. V., Stepanenko A. V. *Ul'trazvuk i plastichnost'* [Ultrasound and Ductility]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1976.
3. Astashev V. K., Gerts M. E. *Vozbuzhdenie i stabilizacija rezonansnyh kolebanij ul'trazvukovykh stержnevyykh system* [Stimulation and stabilization of resonance oscillations of ultrasonic rod systems]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustic Journal*. 1976, vol. 22, no.2, pp.192–200.

4. Astashev V. K. Raschet sterzhnykh koncentratorov s nelinejnoj nagruzkoy [Calculation of rod concentrators with nonlinear load]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustic Journal*. 1981, vol.27, pp.821–827.
5. Artem'ev V. V., Klubovich V. V., Rubanik V. V. *Ul'trazvuk i obrabotka materialov* [Ultrasound and processing of materials]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2003.
6. Artem'ev V. V., Klubovich V. V., Sakevich V. N. *Ul'trazvukovyje vibroudarnye processy na process* [Ultrasonic vibro-impact processes on the processes]. Minsk, 2004.
7. Klubovich V. V. Vlijanie ul'trazvuka na process plasticheskoj deformacii [Influence of ultrasound on the process of plastic deformation]. *Avtory diss. kand. tech. nauk*. Minsk, 1963.
8. Babickij V. I. *Teorija vibroudarnyh sistem* [The theory of vibroshock systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 52 p.
9. Klubovich V. V., Tomilo V. A., Hrushhev E. V., Lappo N. M. Ustrojstvo dlja poverhnostnogo ul'trazvukovogo uprochnenija plastin resor [The Device for surface ultrasonic hardening of springs plates]. *Patent Belarus*, no.3992, 2007.
10. Klubovich V. V., Tomilo V. A., Hrushhev E. V., Marusich V. I. Ustrojstvo dlja poverhnostnogo ul'trazvukovogo uprochnenija ploskih uprugih elementov [The device for surface ultrasonic hardening of flat spring elements]. *Patent Belarus*, no.3879, 2007.

Сведения об авторе

Томило Вячеслав Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. Беларусь, г. Минск, ул. Купревича, 10. Тел. +375-17-267-60-10.

Information about the authors

Tomilo Vyacheslav, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences, Belarus, Minsk, 10 Kuprevicha str. Tel. +375-17-267-60-10.