

УДК 621.01: 534.1

**ВИБРОУДАРНЫЕ (СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНЫЕ) СИСТЕМЫ:
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРИИ ВИБРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ИНСТИТУТА МАШИНОВЕДЕНИЯ РАН**

© Владимир Константинович Асташев, Виталий Львович Крупенин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

v_astashev@mai.ru; krupeninster@gmail.com

***Аннотация.** Дается обзор работ в области динамики виброударных (сильно нелинейных) и других вибротехнических систем, изучаемых в лаборатории Вибротехнических систем ИМАШ РАН. Даны краткие описания работ, посвященных волновым и дискретным системам, схемам их расчета, динамического анализа, а также экспериментального изучения. Описаны важнейшие инженерные приложения.*

***Ключевые слова.** Виброударные процессы, ограничители хода, машинные конструкции, сплошные среды сложной структуры, виброводы, многомерные системы, экспериментальные стенды, стоячие волны, ультразвуковая обработка металлов, наноструктуры, авторезонансные машины.*

**VIBROIMPACT (STRONGLY NONLINEAR) SYSTEMS: MAIN RESULTS OF
LABORATORY OF VIBROTECHNICAL SYSTEMS OF MECHANICAL ENGINEERING
RESEARCH INSTITUTE, RAS**

Vladimir K. Astashev, Vitaly L. Krupenin

Federal Budget-Funded Mechanical Engineering Research Institute, RAS, Moscow, Russia

***Summary.** The review of works in the field of vibroimpact (strongly nonlinear) and other vibrotechnical systems is given, are studied in laboratory Vibrotechnical systems IMASh Russian Academy of Sciences. Short descriptions of the works devoted to wave and discrete systems, schemes of their calculation, the dynamic analysis, and also experimental studying are given. The major engineering appendices are described.*

***Keywords.** Vibroimpact processes, course limiters, machine designs, continuous environments of difficult structure, vibrowater, multidimensional systems, experimental stands, standing waves, ultrasonic processing of metals, nanostructures, autoresonant cars.*

Основные научные направления Лаборатории вибротехнических систем Института машиноведения РАН связаны с развитием теории сильно нелинейных вибрационных процессов во всех аспектах от теории виброударных систем до ультразвуковых технологических устройств.

Теория виброударных систем в настоящее время стала важным отделом теории нелинейных колебаний и волн. При этом важной особенностью оказывается её реальная востребованность при проведении инженерного анализа сложных машиностроительных конструкций, а также научно обоснованного проектирования многих типов машин, механизмов и аппаратуры. При этом приходится отказываться от предположений о малом

числе степеней свободы систем и простых видов ограничителей хода, с которыми соударяются элементы изучаемых конструкций.

Наконец, при построении моделей реальных конструкций, имеющих зазоры, и работающих в широком диапазоне частот приходится отказываться от классических представлений об ударе, вводя в рассмотрение распределенные ударные элементы и протяженные ограничители с нетривиальной топологией. Разработанные подходы дают возможность получить более реалистичские результаты и позволяют построить адекватное описание виброударных процессов в сильно нелинейных системах сложной физической и топологической структуры и решить содержательные инженерные задачи. С помощью новых представлений рассмотрены вопросы образования нелинейных плоских и пространственных волн, распространяющихся в объектах сложной структуры, оснащенных ограничителями хода различного типа. Проведен учет наследственных свойств материала анализируемых конструкций. Построена теория многомерных механических фильтров и рассмотрены процессы фильтрации резонансных виброударных процессов.

Обнаруженные в результате теоретических исследований сильно нелинейные волновые эффекты в дискретных и распределенных виброударных системах эффекты получили экспериментальное подтверждение на специально созданных стендах.

В частности для систем со многими дискретными ударными парами был обнаружен эффект синхронизации ударов многих тел на резонансных режимах, возбуждаемых в определенных частотных диапазонах.

Дальнейшим расширением теории явились описания постановок и разработка методов решения достаточно общих задач, моделирующих динамику машинных агрегатов и конструкций при помощи так называемых одномерных моделей сильно нелинейных сплошных сред сложной структуры. Рассмотрены также и 2D-аналоги таких сред. Введены понятия и модели, необходимые при рассмотрении конкретных конструкций. При этом развита теория сильно нелинейных виброударных систем, моделей, которых содержат несущий элемент и присоединенное оборудование. Показано, что использование моделей данного типа дает возможность, в частности, аналитически описать сложные машинные конструкции, возникающие в них динамические процессы и присущие им и ранее не описанные сильно нелинейные эффекты. Проведено моделирование и разработка методов анализа конструкций, содержащих 2D (и высокоразмерные) виброударные системы простой и сложной структуры, генерирующие резонансные виброударные процессы в

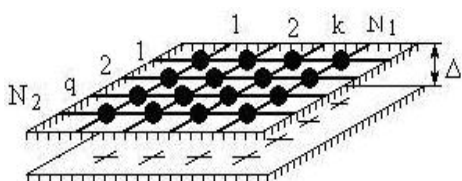


Рис.1

Модели 2D виброударной системы и многомерной виброударной системы с 2D механическими фильтрами низших частот решетчатого типа.

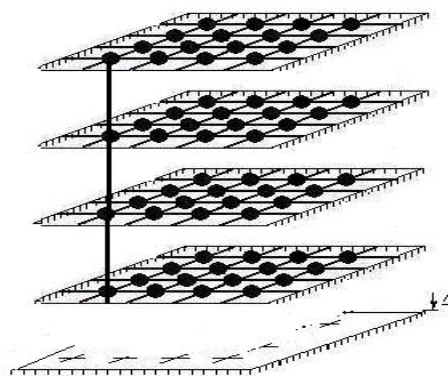


Рис.2.

дискретных или гибридных системах простой и сложной структуры. Построена теория многомерных механических фильтров и рассмотрены процессы фильтрации резонансных виброударных процессов. Дано достаточное полное описание широкополосных многомерных случайных виброударных процессов, описаны динамические эффекты,

проявляющиеся во всех моделях подобных систем. Получены новые результаты математической теории виброударных систем, основанной на принципах частотно-временного анализа и современных положениях нелинейной механики.



Рис. 3. Стенд «Аллигатор» для исследования виброударных процессов в системах со многими ударными парами

В виброударных системах с распределенными ударными элементами обнаружено явление образования трапецевидных стоячих волн при наличии как протяженных, так и точечных ограничителей. На фотографии показаны полученные в стробоскопическом освещении конфигурации такой волны при колебаниях струны, соударяющейся с точечным и тавровым ограничителями.

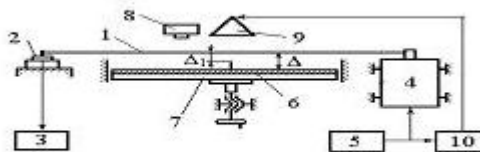


Рис. 4

Установка для изучения динамики распределенных ударных элементов

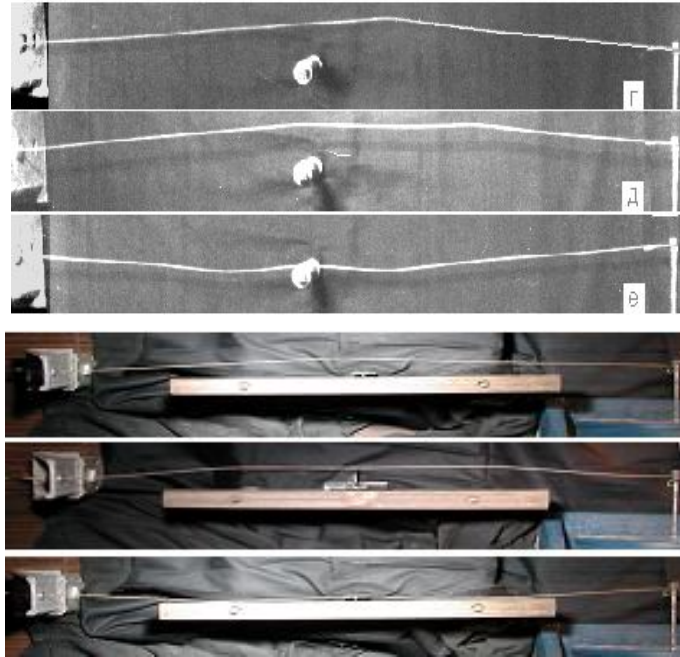


Рис.5. Профили стоячих волн в струне, соударяющейся с точечным и тавровым ограничителями

Вибрационные процессы, возникая как паразитные явления, часто становятся основной причиной аварий и выхода машин и аппаратуры из строя.

Один из знаменательных примеров – трубный теплообменный аппарат энергетического оборудования, в котором могут происходить соударения тонкостенных трубок, находящихся в потоке теплоносителя. Трубки могут соударяться с элементами промежуточных опор, стенками корпуса и экранами, предусмотренными конструкцией аппарата. Разработана методика, позволяющая разместить конструктивные элементы теплообменного аппарата так, чтобы свести интенсивность паразитного виброударного процесса к минимуму.

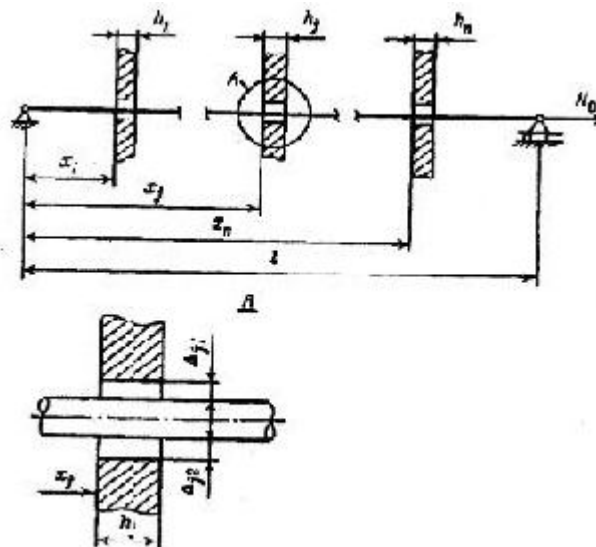


Рис. 6. Схема расчета трубки теплообменного аппарата, соударяющейся с промежуточными опорами.

Известно, что вибрационные процессы составляют основу разнообразных технологических машин и устройств, таких как вибрационные транспортеры, смесители и сепараторы, разнообразные ультразвуковые технологические устройства.

В лаборатории Вибротехнических систем развивается теория авторезонансных систем, обеспечивающих возбуждение и автоматическую стабилизацию наиболее эффективных резонансных режимов работы вибрационной машин при изменении параметров системы и технологической нагрузки в широких пределах. На примерах вибрационных транспортирующих устройств показано, что применение авторезонансной системы возбуждения позволяет существенно повысить эффективность машины, многократно снизить энергозатраты и металлоемкость. Эти выводы подтверждены экспериментами, выполненными на стенде, снабженном авторезонансными бункером и лотком для и транспортирования и дозирования сыпучих материалов.

В лаборатории разработана теория ультразвуковых технологических процессов и созданы образцы ультразвуковых устройств, реализующих авторезонансные технологические процессы точения и упрочняющей обработки поверхности детали путем высокочастотного виброударного пластического деформирования. На рисунке показаны образцы авторезонансных устройств, содержащих генераторы и ультразвуковые головки с соответствующими сменными инструментами.



Рис.7. Авторезонансные ультразвуковые устройства

Устройства могут использоваться как на универсальных токарных станках, так и станках с программным управлением.

Исследования деталей после авторезонансного ультразвукового точения выявил уникальные свойства как геометрических параметров полученных поверхностей, так и механических характеристик материала в приповерхностном слое. На рисунке а) показана фотография поверхности образца после авторезонансного ультразвукового точения, на которой видно четкое структурирование поверхности. Измерения показали возможность повышения чистоты поверхности, которая в ряде случаев не нуждается в последующей чистовой обработке. Подобное структурирование наблюдается и после проведения травления изготовленных шлифов. Фотографии слоев шлифов, протравленных в течение 10 мин., показаны на рисунке б), на котором хорошо видны упрочняющие поверхность наноструктуры, получившиеся в результате ультразвуковой обработки.

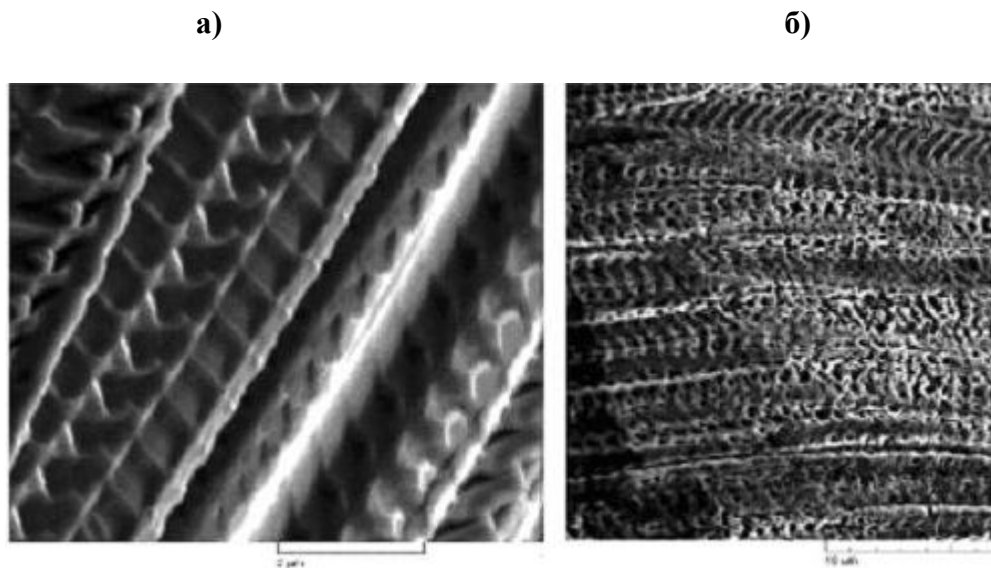


Рис. 8. Фотографии поверхности (а) и протравленных шлифов (б)

Исследование механических свойств нанокластеров и наноструктур показало их высокую твердость и высокую пластичность, причем все подвергнутые авторезонансной ультразвуковой обработке образцы из различных материалов имеют прирост микротвердости от 10 до 80%.

В предлагаемом списке литературы приведены принципиальные работы, в основном, последних лет, касающихся данной проблематики.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-01235 и 13-08-90419).

Список литературы

1. Крупенин В.Л. К расчету резонансных колебаний гибкой нити, взаимодействующей с точечным ограничителем хода// Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992, №2, с.29-36.
2. Крупенин В.Л. Трансформация форм колебаний струны, взаимодействующей с двумя протяженными преградами// ДАН СССР, 1990, т.313, №6, с. 1390-1394.
3. Крупенин В.Л. О представлении периодических виброударных процессов через параметры движения «импульс - фаза» //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №1. С. 34-42.
4. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Волны в распределенных и дискретных виброударных системах и сильно нелинейных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998, № 5, с. 13-30.
5. Крупенин В.Л. Об исследованиях одномерных и многомерных виброударных процессов при случайном широкополосном возбуждении //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №6. С. 34-42.
6. Крупенин В.Л. К описанию динамических эффектов, сопровождающих колебания струн вблизи однотавровых ограничителей// Доклады Российской Академии наук. 2003. № 388 (3). С. 75-80.
7. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Продольные колебания тонкого стержня, взаимодействующего с неподвижным ограничителем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. №6. С. 41-48.
8. Бабицкий В.И., Крупенин В.Л. Колебания в сильно нелинейных системах. – М., Наука, 1985. 384 с.

9. Babitsky V.I., Krupenin V.L. *Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems*. Springer 2001, 330 p.
10. Веприк А.М., Крупенин В.Л. О резонансных колебаниях системы с распределенным ударным элементом // *Машиноведение*. 1988. № 6. С. 39-47.
11. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Эксперименты с протяженными виброударными системами (резонансные движения) // *Вестник научно-технического развития*. 2010. № 7(35). С.3-10.
12. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин. Картины стоячих волн с изломами профилей, в распределенных объектах, соударяющихся с препятствиями различных конфигураций (часть I) // *Интернет –журнал ВНТР*. 2011, №2 (42), с.3-12.
13. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Экспериментальное исследование колебаний струн, взаимодействующих с точечными ограничителями // *Доклады Академии Наук*. 2001. Т. 379. №3. С. 329-333
14. Асташев В.К. Нелинейные эффекты в ультразвуковых технологических системах // *Труды XXVIII Летней школы «Актуальные проблемы механики»*. Т. 2. Санкт-Петербург. 2001. С.368-380.
15. Асташев В.К., Бабицкий В.И. Резонансные колебания вязкоупругого стержня сограничителем // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1972. № 4. С. 176–182.
16. Асташев В.К., Бабицкий В.И. Виброударные взаимодействия вязкоупругих стержней // *Машиноведение*. 1974. № 5. С. 3–9.
17. Асташев В.К. Настройка ультразвуковых станков под нагрузкой // *Станки и инструмент*. 1972. №10. С. 32 – 34.
18. Асташев В.К., Бабицкий В.И. Эффективность резонансной настройки систем для ультразвуковой обработки // *Машиноведение*. 1981. № 6. С. 3–9.
19. Асташев В.К., Бабицкий В.И., Герц М.Е. и др. Измерение сил с использованием виброударной системы // *Измерительная техника*, 1986. №7. С. 33-35.
20. Широкополосные виброударные генераторы механических колебаний // Крупенин В.Л., Веприк А.М./ Вознюк А.Д. и др.- Л.: Машиностроение, 1987. 76 с.
21. Astashev V.K.; Babitsky V.I.; Kolovsky M.Z. *Dynamics and Control of Machines*. Berlin: Springer, 2000. 233 p.
22. Astashev V.K., Babitsky V.I. *Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications*. Berlin: Springer. 2007. 330 p.
23. Асташев В.К. Вибрационный привод // *Машиностроение энциклопедия*. Т. IV-2. Книга 2 «Гидро- и виброприводы». М.: Машиностроение. 2011. С.245-303.