

дажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – № 6. – С.9–17.

11. Богданов, А.В., Соколов, В.И., Шмелев, С.А. Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки железнодорожных колес // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 10(76). – С. 32-38.

12. Забелин, А.М., Оришич, А.М., Чирков, А.М. Лазерные технологии машиностроения. – Новосибирск: Издательство Новосиб. гос. ун-та, – 2004. – 142 с.

13. Богданов, А.В. Волоконные технологические лазеры и их применение: учеб. пособ. / А. В. Богданов, Ю. В. Голубенко. – СПб.: Лань, 2016. – 208 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).

14. Dr. Arnold Mayer. OPTECH CONSULTING. High Power Lasers for Materials Processing. Market Analysis and Forecast. October 2017.

REFERENCES

1. Balanovsky, A.E., Glazkov, V.S., Moroz, B.A. Flange plasma strengthening of rolling-stack wheel pairs // *Proceedings of SSUC "New Technologies on ESR"*. – Novosibirsk: SSUC, 1999. – pp. 57-65.

2. Balanovsky, A.E. Structurization peculiarities in medium carbon steels at plasma surface strengthening and their impact upon resistance to fatigue loads // *D. Eng. Degree Thesis*. – Irkutsk, 2012. – pp. 227.

3. Balanovsky, A.E., Hayasy, S.M. *Wear Problem in Friction Couple of Wheel-Rail* (short analysis and offers). – Irkutsk: Plasmaprotec, 1997. – pp. 56.

4. Reference sources on reasons of freight car delivery for current uncoupling repair during 10 months of 2016. RR CDIU CM.PKB.CM

5. Markov, D.P. Tribologic characteristics of Wheel-Rail Friction Couple // *Friction and Wear*. – 1995. – Vol. 16. – No.1. – pp. 138-156.

6. Kogan, A.Ya. Assessment of rails and wheel pair tread wear at rolling-stock motion along crooked ways // *Bulletin of ARRIRC*. – 1990. – No.2. – pp. 36-40.

7. Larin, T.V., Paryshev, Yu.M., Vikhrova, A.M. Low-alloy steel for freight car wheels // *"Rail and Railway Wheel Manufacturing" Topic Proceedings*. Kharkov, Issue III, - 1975. – pp. 103-107.

8. *Part Surface Engineering* / Authors' Group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

9. Petrov S.Y., Kostukevitsh A.I., Ryabov A.A. Hardening of the ridges and reduced wear of wheel. *Mir transporta – World of transport*, 2013, no. 2.

10. Kiselyov, S.N., Savrukhin, A.V., Kuzmina, G.D. Plasma treatment impact upon stress-strain and structural state of wheel tread flanges in locomotives // *Welding*. – 2001. – No.6. – pp. 9-17.

11. Bogdanov, A.V., Sokolov, V.I., Shmelyov, S.A. Choice of optical arrangement optimum patterns for problem of railway wheel laser thermal treatment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.10(76). – pp. 32-38.

12. Zabelin, A.M., Orishich, A.M., Chirkov, A.M. *Laser Technologies in Mechanical Engineering*. – Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk State University, - 2004. – pp. 142.

13. Bogdanov, A.V. *Fiber Technological Lasers and Their Application: manual* / A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. – S-Pb.: Lan, 2016. – pp. 208. (Textbooks for Colleges. Special Literature).

14. Dr. Arnold Mayer. OPTECH CONSULTING. High Power Lasers for Materials Processing. Market Analysis and Forecast. October 2017.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

УДК 621.789

DOI: 10.30987/article_5b71326c345ef3.52170494

М.А. Тамаркин, д.т.н.,

С.Н. Шевцов, д.т.н.,

В.А. Лебедев, к.т.н.,

Ф.А. Пастухов, ведущий инженер

(Донской государственный технический университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: tehn_rostov@mail.ru

Технология вибрационной стабилизирующей обработки изделий машиностроения

В статье раскрыта сущность вибрационной стабилизирующей обработки деталей и представлены способы её реализации; предложены методики разработки технологической системы, расчёта параметров управляющего воздействия стабилизирующей обработки; даны рекомендации по проектированию технологического оборудования.

Ключевые слова: вибрационная стабилизирующая обработка; технология; управляющие воздействия; энергопотребление.

M.A. Tamarkin, D. Eng.,
S.N. Shevtsov, D. Eng.,
V.A. Lebedev, Can. Eng.,
F.A. Pastukhov, Principal engineer
(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344000)

Technology of vibration-stabilizing machining of engineering products

In the paper there is shown an essence of the stabilizing machining of parts and the ways for its realization are presented, the methods of processing system development, parameters computation of the controlling impact of stabilizing processing are offered, and there are given recommendations for manufacturing equipment design.

Keywords: vibration stabilizing machining; technology; controlling effects; power consumption.

В настоящее время разработано большое число методов стабилизирующей обработки, отличающихся видом энергии, воздействующей на заготовку, оборудованием, режимами. В связи с тем, что все известные методы основаны на использовании температурного воздействия и деформации, их принято подразделять на термические, деформационные и комбинированные.

Сравнительный анализ технологических методов стабилизации деталей, проведённый в ряде научных работ, показывает, что наиболее перспективны в силу своей высокой производительности динамические методы стабилизирующей обработки динамическим нагружением. Из этой группы методов, включающей правку, обработку динамическим ППД, вибрационная стабилизирующая обработка (ВиСО) вызывает наибольший научный интерес, что обусловлено возможностью создания значительных циклических нагрузок во всём теле обрабатываемой детали за счёт резонансных свойств её конструкции.

Сущность ВиСО и способы её осуществления

Вибрационная стабилизирующая обработка – процесс гармонического, полигармонического или периодического ударного возбуждения акустических колебаний детали в звуковом диапазоне с целью обеспечения стабильности её точностных параметров.

Область эффективного применения процесса ВиСО предусматривает его функционирование во внешней среде, компонентами которой являются обрабатываемые заготовки (характеризуемые материалом, методом получения, структурой, величиной и распределением остаточных напряжений, формой и размерами), и включающее технологическую систему

ВиСО в машиностроительное производство (характеризуемое производственной структурой, типом, ритмом и тактом выпуска).

На практике ВиСО может реализовываться одним из способов: установкой обрабатываемой детали на виброплатформу; навеской на деталь одного или нескольких вибровозбудителей; нанесением по поверхности детали ударов, приводящих к совершению деталию собственных колебаний после каждого удара (рис. 1).

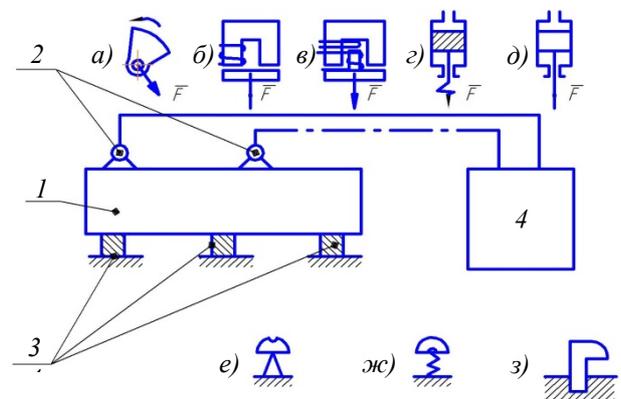


Рис. 1. Схема процесса вибрационной стабилизирующей обработки:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – вибровозбудители (а – десбалансный; б – электромагнитный; в – электродинамический; г – гидравлический; д – пневматический); 3 – опоры (е – свободная; ж – упругая; з – заделка); 4 – устройство управления

Механизм стабилизирующего воздействия вибрации на материал, как и другие деформационные методы стабилизации, снижает уровень остаточных напряжений (ОН) и повышает релаксационную стойкость структуры за счёт упрочнения при микропластической деформации виброползучести. Достигаемая в результате ВиСО стабильность геометрии де-

тали зависит от того насколько удалось повысить характеристики релаксационной стойкости и снизить ОН в зонах их концентрации.

Это достигается с помощью управляющих воздействий процесса, которые признаны синтезировать в детали поле циклических нагрузжений (ЦН), локальные характеристики которого в зонах концентрации ОН обеспечивают требуемую интенсивность релаксационных процессов. Основными параметрами управляющего воздействия ВиСО являются расположение на детали вибровозбудителей и их частота.

В общем виде технологическая система ВиСО включает: место (места) приложения к детали вибровозбуждающей силы (сил); характер распределения возбуждающей силы; направление возбуждающей силы; места опирания детали; тип опор. Установка детали, в зависимости от конструктивной формы может осуществляться по одной из следующих схем: на виброплатформе с креплением в одной и двух точках; консольное крепление детали; установка детали на упругие опоры.

Технологический режим процесса ВиСО характеризуется: типом воздействия на деталь (гармоническое, ударное); частотой возбуждаемых вибраций; сдвигом по фазе (если вибровозбудителей два и более); амплитудой возбуждения. При выборе режимов обработки необходимо руководствоваться эмпирически установленными правилами. Первое правило заключается в обеспечении свободного коробления детали в процессе ВиСО. Второе – вибрационное нагружение должно вызывать максимально возможный изгиб детали.

Разработка технологической системы ВиСО

Выбор схем и режимов ВиСО деталей зависит от их материала и формы. Разработка технологии начинается с анализа геометрии, норм точности детали, возникающих короблений, выявления базовых конструктивных элементов. Базовые поверхности деталей, точность формы и расположения которых нормируются, обычно представляют собой или плоскости, или цилиндры. Конструктивные элементы, которым принадлежат базовые поверхности, как правило, весьма протяжённые, более массивны и жёстки, чем остальные элементы, и чаще всего имеют форму плит, балок, круговых цилиндров и колец (рис. 2).

Если детали имеют сложную форму желательно её конструкцию представить в виде

набора сочленённых элементарных конструктивных элементов. Целесообразность такого расчленения детали обусловлено, с одной стороны, хорошей изученностью колебательных свойств простейших упругих тел с распределёнными параметрами, практически полным отсутствием зависимости нижних собственных частот и форм их колебаний от неупругих явлений в материале, а также возможностью применения методов диакоптики для анализа составного тела по частям и последующего синтеза форм его колебаний.

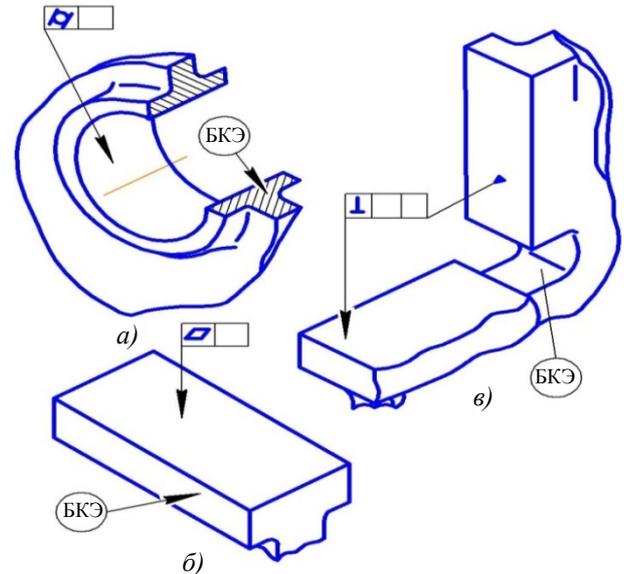


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая определение базового конструктивного элемента (БКЭ):
а – БКЭ-носитель базовой цилиндрической поверхности; *б* – БКЭ-носитель базовой плоскости; *в* – БКЭ-сочленение носителей базовых плоскостей

На следующем этапе строится упрощённая модель детали, структура которой должна согласовываться с характером наблюдаемых короблений и выбирается схема ВиСО.

Учитывая, что материалы, форма и размеры деталей, требующих ВиСО, многообразны, для выбора системы вибровозбуждения конкретного типоразмера детали разработаны следующие принципы, способствующие выбору наиболее рациональной схемы ВиСО.

Мысленно или графически форма детали подвергается упрощению, при котором базовые конструктивные элементы (БКЭ) своей формы не меняют, а остальные элементы заменяются минимальным числом упругих связей, ориентированных так, чтобы деталь могла выполнять свои эксплуатационные функции. Для деталей простейшей формы (балка, цилиндр, кольцо) множество таких связей явля-

ется пустым.

На полученной упрощённой схеме интересующая норма точности изображается в двух предельных положениях, отвечающих границам поля допуска. Эти положения должны соответствовать амплитудным значениям поля виброперемещения детали ВиСО. При этом мысленно деформация детали должна производиться в направлении наименьшей жесткости. Точки БКЭ, наиболее удалённые от своего первоначального положения, как правило, пригодны для приложения возбуждающих сил.

Схема возбуждения, обеспечивающая заданное ЦН σ_a , синтезируется при условии нестеснённого коробления детали в процессе ВиСО. Для этого моделируют форму колебаний, считая, что она отвечает предельно искажённому состоянию упрощённой модели детали. Возбуждающую силу (силы) прикладывают в точке (точках) детали, где имеет место экстремум собственной формы колебаний. Упругие виброопоры подводят в узлы возбуждаемой формы колебаний.

Применение сформулированных принципов проиллюстрировано применительно к схеме ВиСО детали «салазки» фрезерного станка СФ16. Деталь массы 90 кг имеет форму неоднородной балки (рис. 3, а) с ослабленной средней частью. Нормируется прямолинейность продольных (0,02 мм) и поперечной (0,012 мм) направляющих. Размерная нестабильность проявляется в виде изгиба и извёрнутости продольных направляющих. Упрощённая модель детали и её форма, отвечающая амплитудному значению виброперемещения при изгибных колебаниях, изображены на рис. 3, б, в.

Экспериментальные исследования этой схемы показали, что собственная частота, отвечающая этой форме колебаний, близка к 180 Гц ВиСО детали, возбуждаемой одним установленным посередине вибратором (2000 даН при 100 Гц) на частоте 120 Гц дала максимальные изгибные ЦН около 5 МПа. Повысить величину ЦН изменением режима обработки не представлялось возможным в силу ограниченности частотного и силового диапазонов вибратора.

Для решения данной задачи было использовано общее свойство колебательных систем понижать собственные частоты, если элементы матрицы жёсткостей неизменны, а хотя бы один элемент матрицы обобщённых масс увеличивается. На торцы «салазок» устанавливали с помощью винтовых прижимов накладные

грузы массой по 40 кг каждый (рис. 3, з). Это привело к понижению первой собственной частоты системы до 130 Гц и позволило создать при напряжённом режиме работы вибратора (500 даН, 100 Гц) амплитуду ЦН на среднем участке детали от 40 до 60 МПа.

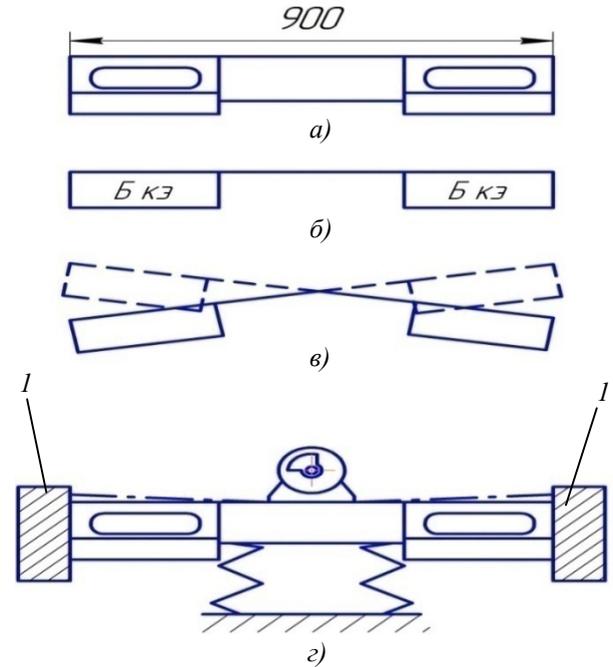


Рис. 3. Выбор схемы ВиСО детали «салазки»:

а – упрощенное изображение; б – схематическая модель; в – модель, отвечающая предельным состояниям с нарушенной нормой точности; г – схема ВиСО; I – накладной груз

При выборе схемы ВиСО можно воспользоваться следующими рекомендациями. Одновибраторную схему целесообразно применять к относительно простым балочным деталям с одной системой базовых параллельных плоских или соосных цилиндрических поверхностей. Одновибраторная схема с использованием накладного груза (грузов) целесообразна для ВиСО лёгких (десятки килограмм) жёстких деталей типа балок, колец, плит. Груз (грузы) устанавливается в точке (точках), отвечающей максимуму возбуждаемой формы изгибных колебаний.

Двухвибраторная схема с принудительной рассинхронизацией целесообразна для ВиСО сложных коробчатых деталей с несколькими системами базовых поверхностей. Элемент конструкции детали, подвергающийся наибольшей деформации при короблении, желательно располагать между вибраторами.

Ударно-вибрационная схема наиболее эффективна для ВиСО малых жёстких деталей,

имеющих первые собственные частоты изгибных колебаний более 200 Гц. Ударник должен располагаться напротив точки детали, отвечающей максимуму возбуждаемой формы колебаний. Материал и форму ударника следует выбирать так, чтобы время соударения было по возможности ближе периоду колебаний по желательной собственной форме.

Определение управляющих воздействий ВиСО

По искажённой короблением модели устанавливаются направления растягивающих ОН σ_r . Зная требуемый ресурс детали $t_{эк}$, характер и распределения в ней эксплуатационных напряжений $\sigma_{эк}$, параметры стабильности напряжённого состояния материала B и Γ , устанавливаются из соотношений:

$$B = \frac{\dot{\epsilon} \cdot E \cdot \gamma}{k \cdot T} \cdot e^{-\frac{U}{kT}};$$

$$\Gamma = \frac{\dot{\gamma}}{k \cdot T},$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость ползучести; E – модуль Юнга; γ – параметр, характеризующий разброс локальных перенапряжений, действующих на структурные элементы; U – энергетический барьер, который необходимо преодолеть структурному элементу для совершения единичного акта деформации; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Затем определяют допускаемые ОН $\sigma_r^{доп}$ в базовых конструктивных элементах, пользуясь универсальными номограммами [2].

Амплитуда ЦН σ_a должна быть ниже предельного напряжения $\sigma_{a\max}$, определяемого с учётом концентрации напряжений и масштабного фактора, по формулам:

– для хрупких материалов

$$\sigma_{a\max} = \sigma_{-1} \cdot (1 - \sigma_r / \sigma_B);$$

– для пластичных материалов

$$\sigma_{a\max} = \sigma_{-1} \cdot [1 - (\sigma_r / \sigma_B)^2];$$

где σ_{-1} – предел текучести; σ_B – предел прочности.

Время обработки определяется по формуле

$$t_{об} \geq \frac{e^{-\Gamma \cdot \sigma_r^{доп}} - e^{-\Gamma \sigma_r}}{B \cdot I(\Gamma \cdot \sigma_a)}$$

В отсутствие данных по величине σ_r амплитуда циклических напряжений в процессе ВиСО по выбранной схеме должна быть близкой или больше эксплуатационных.

Заключительная корректировка возбуждаю-

щей силы и частоты производится с помощью виброизмерительной аппаратуры и контроля энергопотребления технологической системы. Форму возбуждаемых колебаний определяют, измеряя виброперемещения характерных точек детали. Критерием эффективности ВиСО на выбранном режиме является закономерное снижение энергопотребления технологической системы за требуемое время. Величина этого снижения для эффективно обрабатываемых типичных корпусных деталей составляет десятки-сотни Ватт. Время обработки, обеспечивающее заданное качество может изменяться в широких пределах путём регулирования возбуждающих сил, что позволяет обеспечивать производительность технологической системы ВиСО даже при ритме выпуска изделий исчисляемых единицами минут.

Рекомендации по проектированию технологического оборудования ВиСО

Для реализации ВиСО разработана серия установок УВС, УВСД, И9-07, которые могут быть использованы как в лабораторных, так и промышленных условиях. Технические характеристики установок приведены в табл. 1

Функцией установок является управление технологическим режимом процесса обработки и контроль энергопотребления ТС ВиСО. Применение в вибровозбудителях высокооборотных (до 7500 об/мин) мощных ($P_{\max} = 1,5 \dots 2,5$ кВт; $I_{\max} = 50 \dots 120$ А) электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением в значительной степени определяет схему реализации перечисленных установок, ядром которых является тиристорный выпрямитель с импульсно-фазовым управлением. На рис. 4 в качестве примера представлена блок схема установки УВС.

Исследования, проведённые в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ позволили выявить границы диапазонов рабочих частот и возбуждающих сил, обеспечивающих эффективное протекание ВиСО в деталях. Несмотря на большое разнообразие конфигураций, размеров, масс изученных деталей первая собственная частота колебаний по требуемой форме лежала в пределах 80...180 Гц. Достаточным был диапазон возбуждающих сил 1,0...30 кН. Эти обстоятельства наряду с простотой и высокой эффективностью дисбалансных вибровозбудителей делают предпочтительным их использование для реализации процесса ВиСО большинства корпусных станочных деталей.

Надёжный контакт вибратора с поверхностью изделия и малость переходных потерь обеспечивают самоустанавливающиеся опоры, винтовые зажимы и высокая жёсткость конструкции вибратора-приспособления. Жё-

сткость узла вибровозбуждения должна быть в 2 – 3 раза выше жёсткости конструктивного элемента, к которому крепится вибратор. Силы зажима не должны создавать моментов, изгибающих обрабатываемую деталь.

1. Технические характеристики установок для ВиСО

Параметр	Единица измерения	Тип установки		
		УВС	УВСД	И9-07
Число управляемых вибраторов	шт	1	1 или 2	1 или 2
Регулируемые параметры цепи якоря: напряжение – ток –	В А	10...30 0...100	10...30 0...250	10...30 0...100
Регулирование частоты вибрации	Гц	50...125 ручное	50...125 ручное и автоматическое	
Стабильность частоты вибраций	Гц	не стабильно	± 0,5	± 0,5
Регулируемые параметры цепи возбуждения: напряжение – ток –	В А	25 (не регулируется) 1...1,5	10...30 0,5...1,5	
Система модуляции частоты обеспечивает: девиацию – частоту модуляции –	Гц Гц	система отсутствует	±20 ±2	
Погрешности регистрации мощности цепи якоря: систематическая – дрейф –	% %	2,5 1	2,5 0,5	
Погрешности регистрации мощности частоты вибрации: систематическая – дрейф –	% %	(класс точности прибора ЧЗ-7 1.5)	2 1	2 1
Дополнительно контролируется стрелочным прибором	–	$U_{я}, I_{я}$	$U_{я}, I_{я1}, I_{я2}, U_{B1}, U_{B2}$	$U_{я}, I_{я1} + I_{я2}$
Защита от перегрузок: длительных – кратковременных –	–	есть нет	есть нет	есть нет
Мощность потребления	кВт	3	5	3
Вес без вибраторов	кг	150	150	250

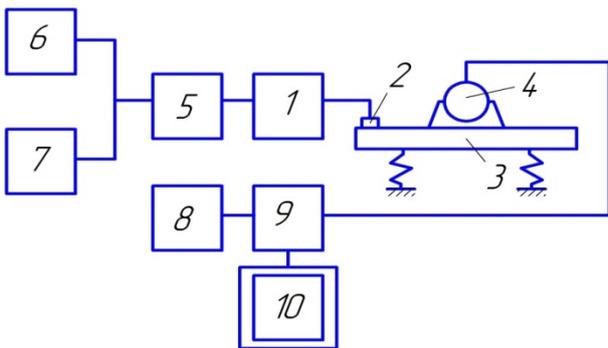


Рис. 4. Блок-схема установки УВС:

1 – согласующее устройство; 2 – акселерометр; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – дисбалансный вибратор; 5 – прибор ИШВ1; 6 – электронный осциллограф; 7 – конденсаторный частотомер ЧЗ-7; 8 – блок управления частотой вибраций; 9 – регулируемый тиристорный выпрямитель; 10 – самопишущий ваттметр

Опыт разработки и эксплуатации устройств управления процесса ВиСО показал техническую и экономическую целесообразность их изготовления на основе выпрямительных агрегатов типа ВАК, что обеспечивает сочетание широких технологических возможностей и надёжности оборудования.

Установлено, что существенная часть энергии колебаний (десятки Ватт) может необратимо рассеиваться в упругих виброопорах детали. Необходимость снижения этих потерь обусловлена как требованием снижения энергоёмкости процесса, так и тем обстоятельством, что энергопотребление ТС является контролируемой величиной, куда потери в опорах вносят дополнительные погрешности. Конечность ширины опор и не возможность их точ-

ного подведения в узлы изгибных колебаний определяют требования конструкции опор. Эти требования сводятся к обеспечению минимальных жёсткости и демпфирующей способности опор. При отношении собственной частоты колебаний детали на опорах и частоте вибраций равном 1/10 и менее во всех случаях установлено эффективное подавление колебаний.

Простота и надёжность вибрационных станков с однокомпонентной вибрацией [1] делают их наиболее удобным средством реализации ударно-вибрационной схемы ВиСО. Модернизация вибростанка заключается в удалении рабочего контейнера и установка на виброплатформу массивного ударника. Для повышения энергии удара и сокращения времени соударения масса ударника должна по возможности превышать массу детали. Частота колебаний детали на упругих опорах должна подбираться кратной частоте колебаний виброплатформы. Выполнение этого условия обеспечивает встречное движение детали и ударника в момент соударения, что способствует увеличению энергии удара.

Заключение

Технико-экономический анализ методов стабилизирующей обработки деталей, проведённый в [4] показал, что процесс ВиСО обладает лучшими экономическими показателями по сравнению с термическим и естественным старением для всех типов производств.

С организационной точки зрения ВиСО в условиях серийного производства целесообразно осуществлять на специально оборудованных для этой цели звукоизолированных участках с охватом всей номенклатуры изде-

лий, для которой предусмотрена стабилизирующая обработка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабичев, А.П., Бабичев, И.А. Основы вибрационной технологии. – Ростов-н/Д: ДГТУ, 1999. – 620с.
2. Бабичев, А.П., Сибирский, В.В., Шевцов, С.Н. Выбор оптимальных режимов вибрационной стабилизирующей обработки корпусных деталей балочной конструкции // Прогрессивная отделочно-упрочняющая обработка: Сборник статей. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1982. – С. 3-18.
3. Бабичев, А.П., Сибирский, В.В., Шевцов, С.Н. Выбор оптимальных режимов вибрационной стабилизирующей обработки корпусных деталей балочной конструкции / Прогрессивная отделочно-упрочняющая обработка; Сб. статей. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1982. – С. 3–18.
4. Шаповалов, И.И. Опыт и экономические аспекты промышленного внедрения стабилизирующей обработки / Прогрессивная отделочно-упрочняющая обработка; Сб. статей. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1985. – С. 96–101.

REFERENCES

1. Babichev, A.P., Babichev, I.A. *Fundamentals of Vibration Technology*. – Rostov-upon-Don: DSTU, 1999. – pp. 620.
2. Babichev, A.P., Sibirsky, V.V., Shevtsov, S.N. Optimum mode choice for beam structure basic parts stabilizing processing / *Efficient Finish-Strengthening: Proceedings*. – Rostov-upon-Don: RIAM, 1982. – pp. 3-18.
3. Babichev, A.P., Sibirsky, V.V., Shevtsov, S.N. Optimum mode choice for beam structure basic parts stabilizing processing / *Efficient Finish-Strengthening: Proceedings*. – Rostov-upon-Don: RIAM, 1982. – pp. 3-18.
4. Shapovalov, I.I. Experience and economic aspects of stabilizing processing industrial introduction / *Efficient Finish-Strengthening: Proceedings*. – Rostov-upon-Don: RIAM, 1985. – pp. 96-101.

Рецензент д.т.н. М.Г. Шалыгин

