

**ИНСТИТУТ НАДЕЖНОСТИ МАШИН НАН БЕЛАРУСИ**

**УДК 621.833:531.3**

**ЧЕМИСОВ ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ**

**УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ПРИВодОВ  
ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ  
КОЛЕС**

**05.02.02-Машиноведение и детали машин**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Минск 1998**

Работа выполнена в Институте надежности машин Национальной академии наук Беларуси.

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Басинюк В. Л.,  
Научный консультант: член-кор. НАН Беларуси,  
доктор технических наук,  
профессор О. В. Берестнев

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,  
профессор Добролюбов А.И.,  
кандидат технических наук,  
доцент Завистовский В.Э.

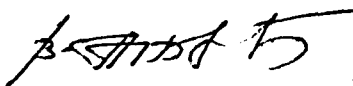
Опонирующая организация: Научно-исследовательский институт  
порошковой металлургии с опытным  
производством (НИИ ПМ с ОП)

Защита состоится " 5 " июня 1998 г. в 14<sup>30</sup> часов на заседании Совета по  
защите диссертаций Д.01.15.01 в Институте надежности машин НАН Беларуси по  
адресу: 220072, г. Минск-72, ул. Академическая, 12, тел. 2 100 747.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института надежности машин  
НАН Беларуси.

Автореферат разослан "30" апреля 1998 г.

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций  
кандидат тех. наук, с.н.с.



В.А. Андрияшин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### *Актуальность темы диссертации*

Динамические качества приводов обрабатывающего оборудования во многом определяют его виброакустические характеристики и качество изготавливаемой продукции. В целом - это одна из наиболее сложных и актуальных проблем станкостроительной промышленности, решение которой позволит значительно расширить экспортные возможности производителей, ускорить процессы технического развития и интенсификации производства.

В представляемой работе на примере радиально-сверлильных станков рассмотрены возможности улучшения динамических качеств приводов обрабатывающего оборудования путем создания и использования в их конструкциях металлопорошковых зубчатых колес, наиболее нагруженные элементы которых выполняются стальными, а остальные из спеченных порошковых композиций с улучшенными демпфирующими характеристиками.

### *Связь с крупными научными программами*

Настоящая работа выполнялась в рамках Государственных программ фундаментальных исследований по заданиям "Машиностроение 2.13" (1991-1995г.г.) и "Машиностроение 02", № госрегистрации 19962936" (1996...1998 г.г.).

### *Цель и задачи исследований*

Цель исследований - создание на основе металлопорошковых композиционных систем повышенного демпфирования зубчатых передач с улучшенными динамическими качествами.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие основные задачи исследований:

- создание и исследование новых конструктивных решений металлопорошковых зубчатых колес с улучшенными виброакустическими характеристиками, разработка методик их расчета, способов и средств оценки эффективности использования на стадии проектирования и доводки, технологических схем изготовления;
- разработка методических подходов к подбору рациональных соотношений и состава фаз порошковой композиции металлопорошковых шестерен, обеспечивающих повышенные задемпфированность и надежность зубчатых сопряжений.

### *Объект и предмет исследований*

В качестве объекта исследований выбраны зубчатые передачи скоростных кинематических цепей коробок передач сверлильных станков с закаленными ТВЧ зубьями. Вследствие специфики формирования кинематических цепей с переключаемыми скользящими шестернями основным видом их разрушения является изнашивание по торцам при значительных запасах изгибной прочности и контактной выносливости.

Предметом исследований стали динамическая нагруженность, виброакустическая активность и работоспособность новых конструкций шестерен с уменьшенными

до 1,5 модуля толщинами зубчатого обода, взаимодействующего внутренней цилиндрической поверхностью со спеченным кольцевым порошковым элементом, а также служебные свойства используемых в них композиционных материалов.

*Методология и методы исследований*

При выполнении работы использовались методические подходы к исследованию динамических процессов в зубчатых сопряжениях, разработанные М.Д.Генкиным, В.К.Гринкевичем, А.И.Петрусевичем, О.В.Берестневым и др., методы математической статистики и, при определении служебных характеристик порошковых композиций, методы ультразвуковой диагностики.

*Научная новизна и значимость полученных результатов*

- разработаны и исследованы новые конструкционные решения для металлопорошковых зубчатых колес, предложена методика расчета толщин зубчатого обода и оценки эффективности использования принятого технического решения на стадии проектирования передачи, позволяющие создать приводы обрабатывающего оборудования с улучшенными динамическими качествами;
- разработана модель и исследовано влияние на динамическую нагруженность зубьев повышенной задемпфированности обода, получены инженерные зависимости для определения динамической нагруженности зацепления с учетом безразмерного коэффициента демпфирования и напряженно-деформированного состояния венца при различных толщинах обода, обеспечивающие выбор наиболее рациональных толщин зубчатого венца и оценку эффективности использования металлопорошковой конструкции на стадии проектирования и доводки привода;
- разработан методический подход к выбору рациональных соотношений и состава фаз порошковой композиции металлопорошковых шестерен, установлена целесообразность формирования в ней каркасной структуры, пропитанной компактными материалами и имеющей дифференцированные по сечению свойства, исследованы особенности пропитки прессовок порошковых материалов на основе железа компактными металлами - медью и свинцом, определен комплекс служебных свойств пропитанных свинцом и медью порошковых композиций с дифференцированным и одинаковым по сечению объемным соотношением и составом фаз, что в целом позволяет исходя из условий нагружения технически обосновано сформулировать требования к порошковым демпфирующим элементам;
- разработаны новые технологические схемы изготовления металлопорошковых зубчатых колес, позволяющие на основе подбора последовательности технологических операций и управления режимами магнитоимпульсной обработки обеспечить создание требуемых дифференцированных свойств композиционного материала в радиальном и осевом сечениях шестерни;
- предложены новые, учитывающие специфику передач с биметаллическими зубчатыми колесами, средства исследования жесткости и изгибной прочности зубьев, способы испытания зубчатых колес на контактную усталостную прочность и

безразборного контроля износа рабочих поверхностей зубьев, позволяющие существенно сократить длительность и трудоемкость оценки служебных свойств шестерен на стадии доводки приводов с улучшенными динамическими качествами.

*Практическая значимость полученных результатов*

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что методический подход, разработанные конструкции металлопорошковых зубчатых колес и технологические схемы их изготовления могут быть использованы при проектировании, изготовлении и модернизации приводов обрабатывающего оборудования с нормализованными и закаленными ТВЧ шестернями, а также при создании других динамически нагруженных сопряжений с улучшенными виброакустическими характеристиками. В качестве объектов внедрения предложены зубчатые колеса быстроходных цепей коробок скоростей металлорежущих станков и приводов технологического оборудования легкой и химической промышленности. Созданные средства для исследования служебных характеристик шестерен могут быть применены при разработке новых и доводке существующих конструкционных и технологических решений в исследовательских лабораториях предприятий и НИИ. Доказана практическая возможность улучшения динамических качеств приводов обрабатывающего оборудования на основе использования металлопорошковых зубчатых колес. Результаты работы являются коммерческим продуктом.

Металлопорошковые зубчатые колеса успешно прошли производственные испытания на Витебском заводе "Вистан", результаты научных исследований внедрены в учебном процессе Полоцкого государственного университета.

*Основные положения диссертации, выносимые на защиту*

1. Обеспечение возможности значительного улучшения динамических качеств приводов обрабатывающего оборудования на основе использования зубчатых колес с пониженной виброакустической активностью за счет применения металлопорошковых композиций.
2. Новые конструкции металлопорошковых зубчатых колес с радиальным и осевым градиентами служебных свойств, позволяющие существенно улучшить виброакустические характеристики, снизить динамическую нагруженность приводов при обеспечении их высокой надежности (А.с. № 1587297, 1657807).
3. Новые способы испытаний зубчатых колес на контактную усталостную прочность зубьев и безразборного контроля износа рабочих поверхностей зубьев в процессе исследования (А.с. № 1809345, 1826010).
4. Новые технологические схемы изготовления металлопорошковых зубчатых колес, позволяющие обеспечить на основе подбора последовательности технологических операций и управления режимами магнитоимпульсной обработки создание дифференцированных свойств композиционного порошкового материала в радиальном и осевом сечениях шестерни (А.с. № 1579632, 1567824, 1717284, 1657807).
5. Новые технологии процессов пропитки прессовок порошковых материалов на основе железа компактными металлами - медью и свинцом; определение комплекса служебных свойств пропитанных медью и свинцом порошковых композиций с

дифференцированным и одинаковым по сечению объемным соотношением и составом фаз (А.с. № 1627321, 1633615).

*Личный вклад соискателя*

Соискателем выполнены теоретические и экспериментальные исследования, предложены в соавторстве новые конструкционные решения для металлопорошковых зубчатых колес, позволяющие на основе подбора последовательности технологических операций и управления режимами магнитно-импульсной обработки обеспечить создание дифференцированных свойств композиционных материалов в радиальном и осевом сечениях шестерен.

Исследованы особенности пропитки прессовок порошковых материалов на основе железа компактными металлами - медью и свинцом и определен комплекс служебных свойств пропитанных медью и свинцом порошковых композиций с дифференцированным и одинаковым по сечению объемным соотношением и составом фаз.

Исследованы динамическая нагруженность, виброакустическая активность и прочностные характеристики металлопорошковых зубчатых колес.

Разработаны математические зависимости для определения динамической нагруженности зацепления зубьев с учетом безразмерного коэффициента демпфирования и оценки напряженно-деформированного состояния венца при различных толщинах обода.

Проведены опытно-промышленные испытания металлопорошковых зубчатых колес с повышенными демпфирующими свойствами в приводах токарно-копировальных и универсальных настольных станков станкостроительного завода "Вистан" (г. Витебск).

Получены положительные результаты, показывающие, что приводы с экспериментальными металлопорошковыми зубчатыми колесами генерируют пониженные на 4...6 дБ уровни звукового давления и в 1,2...1,4 раза меньшие виброускорения по сравнению с серийными.

*Апробация результатов диссертации*

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: "Современные методы обработки и повышения долговечности деталей машин" (Новополоцк, 1989г.); "Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин" (Новополоцк, 1991г.); "Новые материалы и технологии" (Минск, 1996); "Современные проблемы машиноведения" (Гомель, 1996г.).

*Публикации*

По теме диссертации опубликованы 16 печатных работ, включая 9 авторских свидетельств на изобретения.

*Структура и объем работы*

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, выводов и приложений, изложена на 128 страницах, включая 79 страниц машинописного тек-

ста, 37 рисунков, 14 таблиц, акт производственных испытаний (приложение 1), акт использования (внедрения) НИР в учебном процессе (приложение 2) и список литературы, содержащий 82 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка современного состояния вопроса, обоснована актуальность темы и потребность проведения работ в рассматриваемой области, сформулирована цель исследований.

В первой главе рассмотрены основные причины повышенной виброакустической активности зубчатых колес обрабатывающего оборудования, проведен краткий обзор конструкционных решений составных зубчатых колес с улучшенными динамическими качествами и методик их расчета. На основе проведенного анализа установлено, что применение известных технических решений в приводах обрабатывающего оборудования не всегда возможно из-за ограниченных габаритных размеров последних. Кроме того, при средних и высоких частотах вращения зубчатых колес для исключения дисбалансов требуется повышенная точность изготовления упругих сопряжений составных зубчатых колес, что приводит к значительному возрастанию трудоемкости и себестоимости их изготовления.

К одному из наиболее перспективных путей решения этой задачи можно отнести создание зубчатых колес на основе порошковых композиционных систем повышенного демпфирования, однако возможности использования известных конструкционных решений в быстроходных кинематических цепях обрабатывающего оборудования весьма ограничены. Кроме того методики расчета динамической нагруженности не учитывают параметров демпфирования, что не позволяет оценить эффективность их использования на стадии проектирования.

Анализ прочностных и демпфирующих характеристик спеченных порошковых композиций на основе железа позволил выделить в качестве наиболее перспективных для использования в металлопорошковых зубчатых колесах системы "железо-медь" и "железо-свинец" с каркасной структурой. Вместе с тем в научно-технической литературе недостаточно полно отражены вопросы влияния на их служебные характеристики объемных соотношений основных фаз, а также особенности получения железного каркаса с сообщающейся пористостью и его последующей пропитки.

Краткий обзор методик и средств исследований служебных характеристик зубчатых колес показал, что несмотря на значительное число разработок в этой области их практическая реализация по-прежнему остается трудоемким и длительным процессом.

Были сформулированы основные задачи представляемой диссертационной работы.

Во второй главе изложены результаты разработки конструкций и исследования нагруженности металлопорошковых зубчатых колес, имеющих ориен-

тированное на использование в приводах обрабатывающего оборудования конструктивное исполнение.

В соответствии с характером нагружения шестерен приводов обрабатывающего оборудования были разработаны конструктивные решения с радиальным (а.с.1579632, а.с.1657807) и осевым (а.с.1567824, а.с.1567824, а.с.1717284) градиентами свойств. В них наиболее нагруженные элементы конструкции выполняются из стали или порошковых композиций с повышенными прочностными характеристиками, менее нагруженные - из порошковых композиций с повышенными демпфирующими характеристиками. Предложены цельнометаллические зубчатые колеса, у которых для улучшения их виброакустических характеристик порошковые композиции формируются на их торцевых поверхностях (а.с.1587297). Конструктивные исполнения металлопорошковых шестерен приведены на рис. 1.

Исследования влияния демпфирования на динамическую составляющую нагрузки осуществлялись для зубчатых колес со стальным ободом и размещенным между венцом и ступицей, спеченным кольцевым порошковым элементом. При этом был использован методический подход, приведенный в работах О.В. Берестнева, В.К. Гринкевича и др. с введением в него параметров демпфирования. Для разработки модели были составлены дифференциальные уравнения колебаний элементов зубчатых зацеплений в процессе пересопрежения при кромочном и срединном контактах. Получены решения, описывающие колебания приведенных масс зубчатого сопряжения после выхода контактной точки на теоретическую линию зацепления:

при кромочном контакте с деформацией зубьев, большей погрешности шага зацепления

$$x = e^{-\alpha_s w u t} \{ [x_0 + 0,5 w u [x_0 - C_k (\Delta_0 + \delta_c) / C] \sin[(w(1-u^2/4)^{0,5} t] / [w(1-u^2/4)^{0,5}] + [x_0 - C_k (\Delta_0 + \delta_c) / C] \cos [(w(1-u^2/4)^{0,5} t)] + C_k (\Delta_0 + \delta_c) / C \} \quad (1)$$

при кромочном контакте с деформацией зубьев, меньшей погрешности шага зацепления

$$x = e^{-\alpha_s w u t} \{ [x_0 + 0,5 w u [x_0 - C_k (\Delta_0 + \delta_c) / C] \sin[(w(1-u^2/4)^{0,5} t] / [w(1-u^2/4)^{0,5}] + [x_0 - C_k (\Delta_0 + \delta_c) / C] \cos [(w(1-u^2/4)^{0,5} t)] + \Delta_0 - (C_k - C_c) \delta_c / C_k \} \quad (2)$$

при срединном контакте:

$$x = e^{-\alpha_s w_c u t} \{ [x_0 + 0,5 w_c u [x_0 - C_k (S_0 + \Delta_0) / C_c] \sin[(w_c (1-u^2/4)^{0,5} t] / [w_c (1-u^2/4)^{0,5}] + [x_0 - C_k (S_0 + \Delta_0) / C_c] \cos [(w_c (1-u^2/4)^{0,5} t)] + C_k (S_0 + \Delta_0) / C_c \} \quad (3)$$

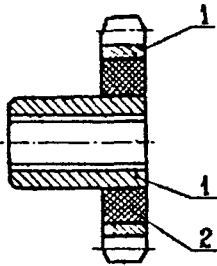
где  $x$  - смещения приведенной массы зубчатых колес;

$e = 2,7183\dots$ ;

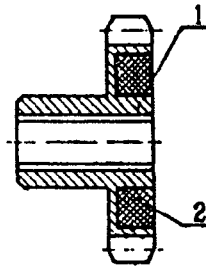
$u$  - безразмерный коэффициент затухания, равный  $u = \gamma/\pi$  ( $\gamma$  - логарифмический декремент затухания,  $\pi = 3,1415\dots$ );



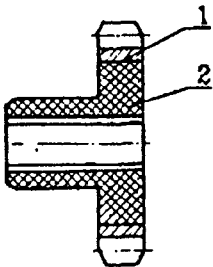
а)



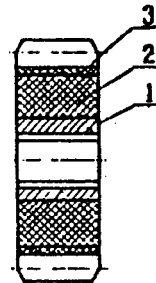
б)



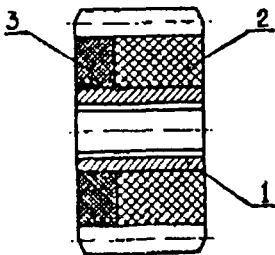
в)



г)



д)



е)

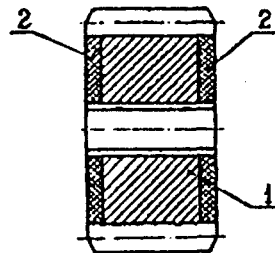


Рис.1. Металлопорошковые зубчатые колеса  
 1 - стальной элемент; 2, 3 - спеченные порошковые элементы с повышенными соответственно прочностными и демпфирующими характеристиками

$t$  - время;

$C, C_k, C_c$  - жесткость зацепления при соответственно двухпарном зацеплении, кромочном и срединном контакте;

$\Delta_0$  - погрешность шага зацепления;

$w$  - круговая частота колебаний динамической составляющей нагрузки срединном зацеплении зубьев;

$\delta_c$  - деформация зубьев под действием приложенного усилия;

$S_0$  - деформация при контакте срединной пары зубьев;

$w_c$  - круговая частота колебаний динамической составляющей нагрузки при контакте срединной пары зубьев.

Значение безразмерного коэффициента затухания "u" для металлопорошковой композиции может быть определено экспериментальным или расчетным путем.

На основе анализа полученных решений на ПЭВМ с выбором максимальных значений динамических составляющих нагрузки, равных при кромочном контакте -  $R_d = C_k x$ , при срединном контакте  $R_d = C_c x$  для значений  $u=0,1...0,5$  была получена аппроксимирующая зависимость, позволяющая с достаточной для инженерной практики точностью оценить влияние безразмерного коэффициента демпфирования на динамическую нагруженность зацеплений с металлопорошковыми шестернями:

$$R_{d,мп} / R_{d,цм} = 0,38(2,8 - u) \quad (4)$$

где  $R_{d,мп}, R_{d,цм}$  - динамическая составляющая в зацеплении соответственно металлопорошковых и цельнометаллических и зубчатых колес.

Разработанный подход был использован для оценки влияния на ресурс работоспособности передач с металлопорошковыми зубчатыми колесами окружных скоростей (рис.2) и нагруженности (рис.3). Полученные результаты показали, что наиболее эффективно использование композитных шестерен в скоростных цепях обрабатывающего оборудования, имеющих, как правило, относительно высокие (до 200 рад/с) частоты вращения и динамические составляющие нагруженности при небольших моментах на входных валах.

Экспериментальные исследования влияния толщины зубчатого обода на его напряженно-деформированное состояние осуществлялись путем сравнительной оценки статической изгибной прочности и податливости зубьев металлопорошковых и цельнометаллических зубчатых колес. Обработка полученных результатов осуществлялась с использованием методов математической статистики. На основании обработки результатов проведенных исследований получены эмпирические зависимости для определения рациональных толщин зубчатого обода  $h$  и коэффициента  $K_0$ , учитывающего влияние принятой толщины обода на податливость зубьев:

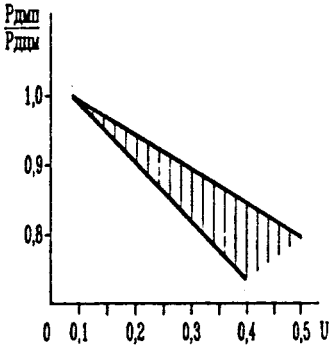


Рис.2. Влияние скоростных режимов на динамическую составляющую нагруженности металлопорошковых зубчатых передач

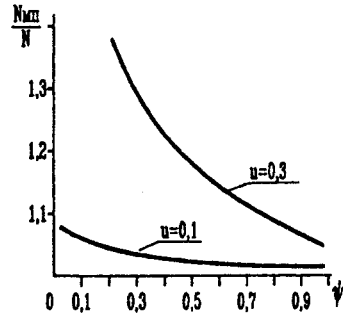


Рис.3. Влияние нагрузочных режимов на ресурс работоспособности металлопорошковых зубчатых передач

$$h \geq 3,56 m (\sigma_F / \sigma_{FP}) \quad (5)$$

$$K_0 = 1 + 0,0036 R/h \quad (6)$$

где  $m$  - модуль зубьев;

$\sigma_F, \sigma_{FP}$  - соответственно расчетные и допустимые напряжения на переходной кривой при изгибе зубьев, рассчитанные по методике ГОСТ 21354-75;

$R$  - радиус нейтральной линии обода.

На основе полученных зависимостей предложена методика расчета геометрических параметров обода и оценки ориентировочной эффективности использования металлопорошковых зубчатых колес на стадии их проектирования, включающая:

- расчет посредством эмпирических зависимостей (4,5) рациональной толщины обода и податливости зубьев;
- расчет динамической составляющей нагрузки

$$P_{д.мп} = 0,38 P_{д.ст.мп} (2,8 - u) K_0^{-1/2} \quad (7)$$

и определение коэффициента неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий с учетом изменения податливости зубьев;

• оценка сравнительного ресурса работоспособности металлопорошковых и цельнометаллических шестерен.

В третьей главе приведены результаты исследований служебных характеристик спеченых порошковых материалов, полученных магнито-импульсным прессованием. Установлено, что их прочностные и демпфирующие характеристиками в основном определяются параметрами пористости и градиентом их изменения по сечению шестерни. Для управления процессом их формирования при изготовлении была введена дополнительная бесконтактная магнитоимпульсная обработка, осуществляемая после начального магнитоимпульсного прессования и предварительного спекания образцов магнитным полем с напряженностью  $H$  у поверхности порошкового тела прессовки:

$$H=2 \left\{ P / \left\{ \mu_0 \left[ 1 - \exp(-hp/s) \right] \right\} \right\}^{0,5} \quad (8)$$

где  $P$  - давление, обеспечивающее прессование заготовки до плотности 85-90%, что позволяет практически полностью сохранить сообщающуюся открытую систему пор;

$hp$  - толщина прессовки;

$\mu_0$  - постоянная магнитной проницаемости;

$s$  - величина скин-слоя порошкового материала.

Результаты исследований изменений пористости заготовки до и после предварительного спекания и электромагнитного давления и плотности по сечению прессовки показаны на рис. 4,5.

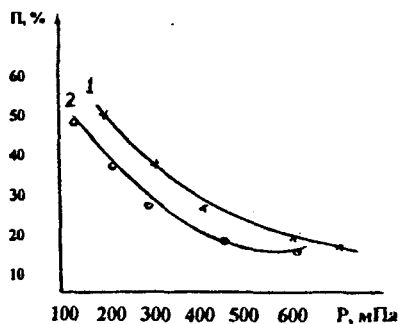


Рис.4. Изменение пористости заготовки до (1) и после (2) предварительного спекания от от давления МИО

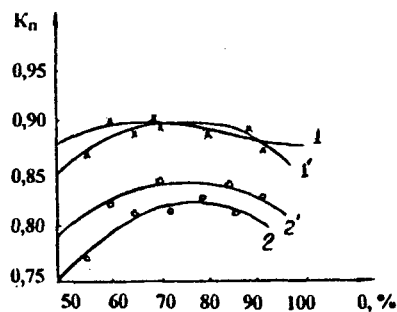


Рис.5. Изменение коэффициента пропитки  $K_p$  в зависимости от плотности прессовки  $Q$  (1,1' пропитка медью; 2,2' пропитка свинцом; 1',2' пропитка после МИО)

Исследование процесса пропитки пористого тела расплавами металлов показало, что максимум пропитки достигается в диапазоне плотности прессовки 75-80%. Дополнительная магнитоимпульсная обработка повышает коэффициент пропитки за счет повышения капиллярного потенциала по мере продвижения фронта пропитки при уменьшении размеров пор.

Исследования влияния удельного содержания компонентов на прочностные и демпфирующие характеристики проводились с использованием метода ультразвуковой диагностики на призматических образцах 90x5x5 мм. У части образцов посредством магнитоимпульсной обработки обеспечивалось создание свойств с дифференцированными по толщине значениями параметров.

При исследованиях определялись и контролировались изменения следующих параметров: модуля упругости (E), модуля сдвига (G), модуля объемной упругости ( $K_{П}$ ), коэффициента Пуассона ( $\mu_0$ ), коэффициента внутреннего трения (q). Результаты исследований приведены в таблице.

Таблица

Материал образца	$E \cdot 10^{-5}$ , Н/м	G, Н/м	$\mu_0$	$K_{П}$ , Н/м	$q \cdot 10^4$
72 % Fe + 28 % Cu	130,1	49,2	0,32	121,9	11,5
80 % Fe + 20 % Cu	145,2	55,3	0,31	129,3	18,4
70 % Fe + 30 % Pb	98,2	37,5	0,40	85,8	16,5
80 % Fe + 20 % Pb	110,4	40,9	0,35	122,4	25,8
(72 % Fe + 28 % Cu)*	162,3	61,0	0,33	159,4	21,3
(72 % Fe + 28 % Pb)*	131,1	47,1	0,38	182,4	30,2

Проведенные исследования показали, что более высокими прочностными и демпфирующими характеристиками (коэффициентами внутреннего трения) обладают образцы с пропиткой объемом 20% с дифференцированными по толщине свойствами.

В четвертой главе приведены результаты сравнительных исследований служебных характеристик металлопорошковых и цельнометаллических зубчатых колес 2K52-1.31.00.028 быстроходной кинематической цепи коробки скоростей сверлильного станка 2K52-1 Гомельского завода станочных узлов. Основные параметры колеса: модуль  $m=2$  мм, число зубьев  $z=42$ , ширина венца  $b=9$  мм ( $b=6$  мм), материал венца - сталь 40X, термообработка зубьев - закалка ТВЧ до твердости 48...52HRC.

У металлопорошковых шестерен венец соединялся с цельнометаллической ступицей стальной перемычкой со стороны переключаемого торца. Порошковая композиция на основе железа ГДЖМЗ размещалась в образованную венцом, ступицей и перемычкой полость. Ее прессование осуществлялось на установке МИУ-30 с образо-

\* - образцы с дифференциальным по толщине удельным содержанием компонентов.

ванием каркасной структуры, имеющей открытую капиллярную пористость объемом 15-20%. Спеченная порошковая композиция пропитывалась медью. Порошковые шестерни выполнялись с толщиной обода 3 и 5 мм. Сравнительные исследования контактной усталостной прочности, износостойкости, виброакустической активности и динамической нагруженности проводились на стенде с разомкнутым силовым контуром при эксплуатационной частоте вращения  $\omega = 150$  с и нагружающих моментах 0...200 Н/м.

Измерения виброакустической активности осуществлялись посредством аппаратуры фирм RFT и "Брюль и Кьер". Динамическая нагруженность исследовалась прямым тензометрированием тензорезисторами 2ФКПА-5-100ГВ126, наклеенными на торцах обода на прилегающих к впадинам зубьев участках, прецизионного усилителя У7-1 и осциллографа С1-77. Отдельные результаты исследований приведены на рис. 6...9. Их анализ показал, что на режимах испытаний зубчатые сопряжения с металлопорошковыми шестернями генерировали на 6-8 дБ меньшие уровни шумов, имели в 1,3...2 раза меньшую динамическую нагруженность и в 1,19...1,23 раза большую контактную усталостную прочность.

Сравнительные исследования усталостной прочности зубьев металлопорошковых и цельнометаллических колес подтвердили обоснованность предложенной методики расчета рациональной толщины зубчатого обода металлопорошковой конструкции и возможность ее применения при создании подобных конструкций.

Для ускорения и снижения трудоемкости исследований были предложены способы испытания зубчатых колес на контактную усталостную прочность /а.с.1826010/ и безразборного контроля износа зубьев зубчатых колес /а.с.1809345/. В предложенном способе испытаний в цепочке последовательно соединенных зубчатых колес создаются различные рабочие ширины зацеплений, соотношения которых и величина нагружающего момента обеспечивают в процессе проведения одного цикла исследований получение трех-четырех точек левой ветви кривой усталости. В способе безразборного контроля на рабочие поверхности зубьев наносятся искусственные базы в виде пирамидальных углублений, с которых прокаткой между зубьями медной или латунной фольги с упругой подложкой снимают слепки, по изменению геометрических параметров которых определяется величина износа.

В п я т о й главе рассмотрены технологические схемы изготовления металлопорошковых зубчатых колес и передач на их основе.

Предложен и апробирован способ изготовления порошковых шестерен с дифференцированными в радиальном сечении свойствами. При этом повышенные прочностные свойства порошкового материала формируются в наиболее нагруженной зоне (зубчатом венце) за счет ее пропитки медью. В остальном объеме порошковая композиция пропитывается свинцом, обеспечивающим повышенные демпфирующие характеристики /а.с.1579632/. Пропитка и смещение расплава меди в зону венца осуществляется дополнительной магнитоимпульсной обработкой до пропитки свинцом.

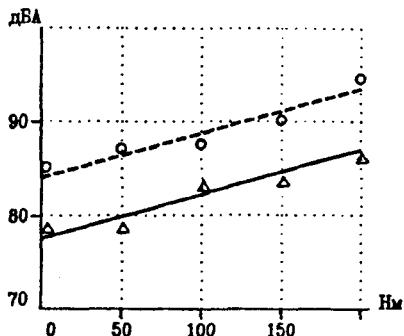


Рис.6. Уровни звука передач с металлопорошковыми (1) и цельнометаллическими зубчатыми колесами

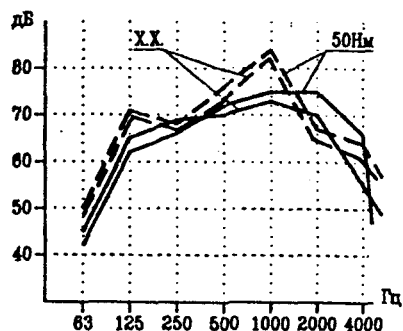


Рис.7. Уровни звукового давления в октавных полосах частот передач с металлопорошковыми (1) и цельнометаллическими (2) шестернями

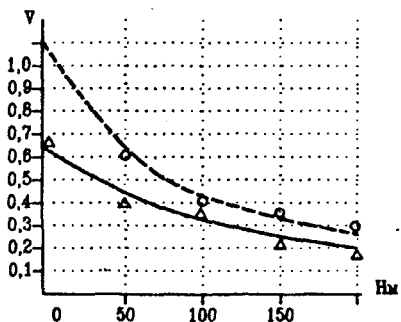


Рис.8. Динамическая составляющая нагрузки в передаче с металлопорошковыми (1) и цельнометаллическими (2) шестернями

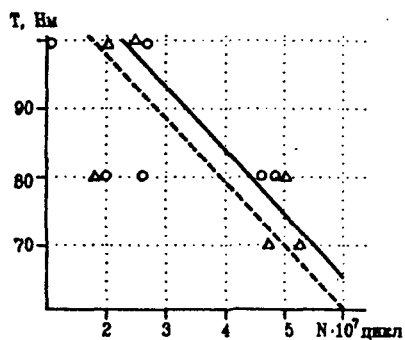


Рис.9. Контактная усталостная прочность зубьев передач с металлопорошковыми (1) и цельнометаллическими (2) шестернями

Порошковая заготовка частично охлаждается до температуры, близкой к температуре кристаллизации меди. При реализации процесса напряженность магнитного поля дополнительной обработки принимается равной:

$$\{P_1 / \{\mu_0 [1 - \exp(-2A/s)]\}\}^{0.5} < H < 2 \{P_2 / \{\mu_0 [1 - \exp(-2B/s)]\}\}^{0.5} \quad (9)$$

где  $P_1, P_2$  - расчетные давления электромагнитного поля, обеспечивающие плотность порошкового материала соответственно 90 и 75%;

$A, B$  - радиальное расстояние от ближайшей к источнику магнитного поля поверхности до поверхностей соответственно начала и конца сечения заготовки, материал которого имеет повышенные демпфирующие характеристики.

После кристаллизации меди прессовка пропитывается свинцом с созданием между поверхностями, лежащими на расстоянии  $A$  и  $B$  от ближайшей к источнику магнитного поля поверхности, зоны повышенного демпфирования.

Эффективность разработанного технического решения оценивалась на червячных передачах фартука станка 16К20, выпускаемого Гомельским заводом станочных узлов. Исследования показали, что передачи с червячными колесами, изготовленными в соответствии с разработанным способом, имели значительно меньшую виброакустическую активность и в 1,4 раза большую, по сравнению с серийными, износостойкость.

Разработан способ изготовления высокоскоростных винтовых колес и передач на их основе /а.с.1567824/, в котором создаются дифференцированные механические и демпфирующие свойства материала вдоль оси зубчатых колес. При ограниченных условиях смазки в порошковую композицию вводят специальные легирующие компоненты, обеспечивающие повышенные антифрикционные свойства контактирующих поверхностей /а.с.1633615/ или создают слои из порошкового материала со сквозной пористостью, позволяющие смазке поступать в зону контакта зубьев /а.с.1717284/.

Предложены зубчатые колеса с порошковыми покрытиями на торцах, позволяющими улучшить виброакустические и прочностные характеристики передачи /а.с.1587297/. Сквозная пористость торцевых покрытий способствует улучшению условия подачи смазочных материалов в зону силового взаимодействия зубьев. Меньший модуль упругости порошкового материала обеспечивает создание пониженной в направлении торцев жёсткости зубьев, что, как следствие, приводит к повышению равномерности распределения нагрузки по длине контактных линий. Введение в порошковую композицию теплоотводящих компонентов снижает тепловую нагруженность передачи.

Конструкция обладает значительно большей технологичностью, надёжностью и эффективностью по сравнению с техническими решениями зубчатых колес, имеющих накладные со стороны торцев демпфирующие элементы.



## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведен анализ возможностей улучшения динамических качеств приводов обрабатывающего оборудования на основе использования зубчатых колес с улучшенными виброакустическими характеристиками. Установлено, что эффективное и экономичное решение поставленных задач может быть достигнуто путем использования металлопорошковых шестерен, для чего необходимо создание и исследование новых конструктивных решений, разработка методик расчета и технологических схем их изготовления.

2. Предложены новые конструкции металлопорошковых зубчатых колес с радиальным и осевым градиентами служебных свойств, позволяющие существенно улучшить виброакустические характеристики и снизить динамическую нагруженность приводов при обеспечении их высокой надежности. Разработана модель и исследовано влияние на динамическую нагруженность зубьев повышенной задемпфированности цельнометаллического обода, взаимодействующего с введенным в конструкцию кольцевым порошковым элементом. Получена инженерная зависимость для расчета динамической нагруженности с учетом безразмерного коэффициента демпфирования. На основе исследований определены приближенные зависимости для оценки влияния толщин обода на его напряженно деформированное состояние.

3. Разработана и апробирована методика выбора рациональной толщины обода металлопорошковых шестерен, позволяющая обеспечить высокую надежность конструкции при значительном улучшении ее динамических качеств и оценить эффективность использования принятого технического решения на стадии проектирования передачи.

4. Разработан методический подход, позволяющий осуществить технически обоснованный подбор рациональных соотношений и состава фаз порошковой композиции, обеспечивающий достижение повышенных демпфирующих и прочностных характеристик. Установлена целесообразность формирования для металлопорошковых зубчатых колес композиционного материала с каркасной структурой и дифференцированными за счет соответствующего перераспределения компонентов по сечению шестерни свойствами.

5. Исследованы металлопорошковые композиции, полученные методом магнитно-импульсного прессования порошка железа и последующей пропитки пористого каркаса демпфирующими компактными металлами. Установлено, что пропитка пористых порошковых композиций при окончательном спекании позволяет повысить ее прочностные характеристики, однако с увеличением удельного содержания материала пропитки коэффициент внутреннего трения и соответствующие ему демпфирующие характеристики снижаются. Существенное улучшение служебных свойств достигается при создании дифференцированных по сечению состава и удельного содержания компонентов.

6. Разработаны новые способы испытаний зубчатых колес на контактную усталостную прочность зубьев и безразборного контроля износа рабочих поверхностей зубьев в процессе исследований, позволяющие существенно сократить длительность и трудоемкость оценки служебных свойств шестерен. В предложенном способе испытаний в цепочке последовательно соединенных зубчатых колес создаются различные рабочие ширины зацеплений, соотношения которых и величина нагружающего момента обеспечивают получение в процессе проведения одного цикла исследований трех-четырех экспериментальных точек левой ветви кривой усталости. В способе безразборного контроля износа на рабочие поверхности зубьев наносятся искусственные базы в виде пирамидальных углублений, с которых в процессе испытаний на медную или латунную фольгу с упругой подложкой прокаткой снимаются слепки, по изменению геометрических параметров которых определяется величина износа.

7. Разработаны и апробированы новые технологические схемы изготовления металлорошковых зубчатых колес, позволяющие на основе подбора последовательности технологических операций и управления режимами магнитоимпульсной обработки обеспечить создание дифференцированных сред композиционного порошкового материала в радиальном и осевом сечениях шестерни. Одна из схем основана на предварительной бесконтактной обработке пористого каркаса импульсным магнитным полем определенной напряженности и частоты, обеспечивающих заданный градиент уплотнения по объему в соответствии с поглощением магнитного поля. Другая схема включает магнито-импульсное прессование порошка в медной оболочке с переменной эффективной толщиной, что создает необходимые условия для распределения вдоль оси оболочки электромагнитного давления.

8. Исследованы металлорошковые зубчатые колеса 2K52-1.31.00.028 быстросходной цепи коробки скоростей сверлильного станка Гомельского завода станочных узлов, имеющие цельнометаллические венец и ступицу и размещенный между ними спеченный и пропитанный медью кольцевой элемент из порошка ПЖ 3М3. Установлено, что использование металлорошковых зубчатых колес, изготовленных на основе разработанных конструктивных и технологических решений, позволяет на 4...8 дБ снизить уровни генерируемых передач шумов, в 1,3...2 раза уменьшить динамическую нагруженность, в 1,19...1,23 раза повысить контактную выносливость по сравнению с передачами с цельнометаллическими шестернями.

Разработанные конструктивные и технологические решения металлорошковых зубчатых колес могут быть рекомендованы для использования в скоростных зубчатых передачах обрабатывающего оборудования с нормализованными, улучшенными и закаленными с нагревом ТВЧ шестернями, что позволит значительно улучшить динамические качества и повысить ресурс работоспособности их приводов.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. А.с.1567824 СССР, F 16 Н 1/18,55/17, В 22 F 5/08. Винтовая зубчатая передача и способ ее изготовления / О.В.Берестнев, В.Л.Басинюк, А.А.Кот, В.Б.Чемисов (СССР).- № 4455583/28; Заявлено 05.07.88; Оpubл.30.05.90, Бюл.№ 20. - 6 с.

2. А.с.1579632 СССР, В 23 F 7/04, 5/08. Способ изготовления биметаллических зубчатых колес / В.Ф.Горошко, О.В.Берестнев, А.А.Кот, В.Б.Чемисов (СССР).- № 4401754/31. Заявлено 31.03.88; Оpubл.23.07.90, Бюл. № 27. - 4 с.

3. А.с.1587297 СССР, F 16 Н 57/04. Зубчатая передача / В.Ф.Горошко, А.А.Кот, В.Б.Чемисов (СССР). № 4618315/25-28; Заявлено 21.10.88; Оpubл.23.08.90, Бюл. № 31. - 3 с.

4. А.с.1627321 СССР, F 3/03/ Способ изготовления изделий из порошков/ А.А.Кот, В.Ф.Горошко, В.Б.Чемисов, П.Ф. Евтушенко (СССР) - № 4499847/02; Заявлено 31.10.88; Оpubл.15.10.91, Бюл. № 6. - 5 с.

5. А.с.1633615 СССР, В 22 F 5/08. Способ изготовления порошковых винтовых пар скольжения /А.А.Кот, В.Ф.Горошко, В.Б.Чемисов, Н.В.Новик (СССР). Не публикуется в открытой печати.

6. А.с.1657807 СССР, 5F 16 Н 55/17. Зубчатое колесо / А.А.Кот, В.Ф.Горошко, В.Л.Басинюк, В.Б.Чемисов (СССР).- № 4667746/28; Заявлено 27.03.89; Оpubл.23.06.91, Бюл. № 23. - 4 с.

7. А.с.1717284 СССР, 5В 22 F7/02, В 22 F 5/08. Зубчатая пара и способ ее изготовления / А.А.Кот, В.Ф.Горошко, В.Л.Басинюк, В.Б.Чемисов (СССР). № 4667747/02; Заявлено 27.03.89; Оpubл.7.03.92, Бюл. № 9. 6 с.

8. А.с. 1809345 СССР, G 01 M 13/02. Способ контроля износа зубьев зубчатых колес / В.Л.Басинюк, В.Ф.Горошко, А.А.Кот, В.Б.Чемисов (СССР).- № 4922601/28; Заявлено 25.01.91; Оpubл.15.04.93. Бюл. № 14.- 4 с.

9. А.с.1826010 СССР, МКИ G 01 M 13/02. Способ испытаний зубчатых колес на контактную усталость зубьев / В.Л.Басинюк, В.Ф.Горошко, А.А.Кот, В.Б.Чемисов (СССР).- № 4904754/28; Заявлено 24.01.91; Оpubл. 07.07.91, Бюл. № 25.- 5 с.

10. Берестнев О.В., Басинюк В.Л., Чемисов В.Б., Кот А.А., Александрова В.С. Создание зубчатых передач обрабатывающего оборудования с улучшенными динамическими качествами. Оперативно-информационные материалы ИНДМАШ АНБ.- Препринт / ИНДМАШ АНБ.-Минск, 1995г.- 48 с.

11. Чемисов В.Б., Берестнев О.В., Аршиков А.С. Зубчатые колеса с порошковыми покрытиями на торцах // Материалы, технологии, инструмент. Тез. докл. 2-й научно-технической конференции "Nototex-96", - Минск, 1996. - С. 43-44.

13. Чемисов В.Б., Берестнев О.В., Хейфиц М.Л. Исследование динамической составляющей нагрузки в зубчатом зацеплении с металлопорошковыми шестернями // Износостойкость машин. Тезисы доклада 2-ой международной научно-технической конференции. - Гомель, 1996. - С.

14. Чемисов В.Б., Лысов А.А. Исследование износостойкости зубчатых колес, упроченных ферромагнитными порошками // Современные методы обработки и повышения долговечности деталей машин. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Новополоцк, 1989. - С. 30.

15. Чемисов В.Б., Елистратов А.П., Лысов А.А. Пути снижения термического воздействия электродуговой наплавки // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Новополоцк, 1991. - С. 34.

16. Берестнев О.В., Басинюк В.Л., Чемисов В.Б. Зубчатые колеса пониженной виброактивности. - Новополоцк: - Изд. ПГУ, 1997.-122 с.

## РЕЗЮМЕ

Чемисов Владимир Борисович

Улучшение динамических качеств приводов обрабатывающего оборудования на основе использования металлопорошковых зубчатых колес

Зубчатые передачи, динамика, демпфирование, металлопорошковые композитные материалы, магнитоимпульсная обработка, виброакустическая активность, работоспособность.

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств порошковых композитов систем железо-медь и железо-свинец, передач с металлопорошковыми зубчатыми колесами, включающих демпфирующие элементы из приведенных материалов, и технологических схем их изготовления с использованием магнитоимпульсной обработки. Цель работы - разработка и исследование новых, ориентированных на использование в приводах обрабатывающего оборудования конструкций металлопорошковых зубчатых колес с улучшенными виброакустическими характеристиками, создание методик их расчета и технологических схем изготовления.

Исследования проводились на испытательных стендах с разомкнутым силовым контуром с использованием тензорезисторов, усилителей У7-1, аппаратуры для измерения шумов и вибраций фирмы "Брюль и Кьер", средств ультразвуковой диагностики.

Разработаны новые конструкционные решения металлопорошковых зубчатых колес, методики их расчета и технологические схемы изготовления.

Показана путем теоретических и экспериментальных исследований их высокая эффективность. Разработаны методический подход, позволяющий осуществить подбор рациональных соотношений и состава фаз порошковых композиций металлопорошковых шестерен, и способы их получения путем управления режимами и последовательностью магнитоимпульсной обработки заготовки. Предложены новые способы испытаний на контактную усталостную прочность и безразборного контроля износа зубьев. Дана схема ориентировочной оценки эффективности использования металлопорошковых зубчатых колес на стадии их проектирования, рекомендованы области наиболее рационального использования.

Результаты работы прошли производственные испытания на станкостроительном заводе "Вистан" г. Витебск.

## РЭЗІЮМЭ

Чэмісау Уладзімір Барысавіч

Паляпшэнне дынамічных якасцей прывадоу апрацоўчага абсталявання на аснове выкарыстання металапарашковых зубчастых колау

Зубчастыя перадачы, дынаміка, дэмпфіраванне, металапарашковыя кампазітныя матэрыялы, магнітаімпульсная апрацоўка, вібраакустычная актыўнасць, працаздольнасць.

Выкладзены вынікі тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў уласцівасцей парашковых кампазітаў сістэм жалеза-медзь і жалеза-свінец, перадач з металапарашковымі зубчастымі коламі, уключаючы дэмпфіруючыя элементы з прыведзеных матэрыялаў, і тэхналагічныя схемы іх вырабу з выкарыстаннем магнітаімпульснай апрацоўкі. Мэта работы - распрацоўка і даследаванне новых, арыентаваных на выкарыстанне у прывадах апрацоўчага абсталявання канструкцый металапарашковых зубчастых колау з палепшанымі вібраакустычнымі характарыстыкамі, стварэнне метады іх разліку і тэхналагічных схем вырабу.

Даследаванні праводзіліся на выпрабавальных стэндах з разамкнутым сілавым контурам з выкарыстаннем тэнзарэзыстароў, узмацняльнікаў У7-1, апаратуры для мерання шуму і вібрацый фірмы "Брюль і Кер", сродкаў ультрагукавай дыягностыкі.

Распрацаваны новыя канструкцыйныя рашэнні металапарашковых зубчастых колаў, метады іх разліку і тэхналагічныя схемы вырабу. Паказана шляхам тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў іх высокая эфектыўнасць. Распрацаваны метады і падыходы, які дазваляе ажыццявіць падбор рацыянальных суадносін і саставу фаз парашковых кампазіцый металапарашковых шасцярон і спосабы іх атрымання шляхам кіравання рэжымамі і паслядоўнасцю магнітаімпульснай апрацоўкі. Прапанаваны новыя спосабы выпрабавання на кантактную стомленую трываласць і безразборнага кантролю зносу зубцаў. Дана схема арыентаванай ацэнкі эфектыўнасці выкарыстання металапарашковых зубчастых колаў на стадыі іх праектавання, рэкамендованы галіны найбольш рацыянальнага выкарыстання.

Вынікі работы прайшлі вытворчыя выпрабаванні на станкабудаўнічым заводзе "Вістан".

## SUMMARY

Chemisov Vladimir Borisovich

The improvement of dynamic qualities of the processing equipment drives on the basis of using of powdered metal gear wheels

**Key words:** gear, dynamics, damping, compound powdered metal materials, magnetoimpulsive processing, vibroacoustic activity, capacity.

This paper deals with the results of theoretical and experimental research of powdered compounds qualities of iron-copper and iron-lead system, drives with powdered metal gear wheels including damping elements from the materials mentioned, and process schemes diagrams of their manufacturing with the use of magnetoimpulsive processing. The aim of this paper is working out and researching of new powdered metal gear wheels constructions with improved vibroacoustic characteristics in order to use them in processing equipment drives, and creation of the techniques of their design and process schemes of their manufacturing.

The research was held on test with disconnected power circuit with the use of tensoresistors, amplifiers U7-1, noise and vibration measuring equipment from Brull and Cierre C° and means of ultrasonic diagnostics.

New Constructive solutions of powdered metal gear wheels, the techniques of their design and process schemes of their manufacturing were worked out. Their high efficiency was proved by theoretical and experimental research. Methodical approach allowing to carry out the proportioning of ratio and composition of phases of powdered metal gears and the ways to obtain them by controlling the conditions and sequence of magnetoimpulsive processing of blanks worked out. New ways of contact fatigue testing and wear control without disassembly. Approximate estimate scheme of the efficiency of the use of powdered metal gear wheels on the stage of their designing and the branches of their most rational use are recommended.

The results of this work had undergone production tests at the machine-building "Vistan" in Vitebsk.