

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2020 Том 21  
11 (244)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Экономика и организация сборочного производства

Аристова Н.И. Минимизация стоимости продукции, выпускаемой сборочной линией ..... 483

#### Технологичность конструкции

Дубовик Е.А. Сборка из ЛСТК отечественной автомобильной мойки ..... 488

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

Колокатов А.М. Рекомендации по выбору характеристик алмазных брусков при хонинговании гильз цилиндров ДВС ..... 492

Шишкарев М.П. Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты с отрицательно-нулевой обратной связью ..... 499

Самусенко В.Д., Завидовский И.А., Стрелецкий О.А., Буяновский И.А., Хрущов М.М., Щербаков Ю.И. Тонкие покрытия со структурой тетраэдрического аморфного углерода и их поведение в условиях граничной смазки ..... 506

#### В помощь конструктору, технологу

Житников Ю.З., Лошкарев А.А. Обоснование угла окончательной затяжки резьбовых соединений гайковертами ударного действия с учетом потерь энергии в ударном механизме ..... 512

Шандыбина И.М., Макаров А.М., Кухтик М.П., Азарян Д.К., Мелашенко О.И., Твердохлебов С.А., Шагальдян С.С., Романенко М.Д. Разработка универсального весового дозатора с автоматическим управлением ..... 516

#### Сборочн-сварочные работы. Пайка

Иванов А.А., Кретинин О.В. Сборка кабин и кузовов автомобилей на основе технологии контактной сварки ..... 522

Председатель редакционного совета  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

##### МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.  
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.  
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.  
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф. И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.  
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.  
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.  
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.

#### Региональные редсоветы

##### ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН  
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

##### ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН

##### ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.  
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.  
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

##### КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

##### КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

##### КОМСОМОЛЬСКО-АМУРСКИЙ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.  
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.  
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

##### ОРЕНБУРГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.  
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.  
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

##### ПЕРМЬ

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.  
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

##### РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
А.П. СЫЧЕВ

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

##### РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.  
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.  
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

##### САМАРА

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.  
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

##### САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

##### ТОМСК

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.  
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

##### ТУЛА

А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.  
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

##### ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

##### Беларусь

##### МИНСК

В.Л. БАСИНОК, д.т.н.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

##### ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.  
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

##### ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

П. ЛЕБОВСКИ, д.т.н.  
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРЕ.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953  
от 09.12.2015 г.

THE MONTHLY  
JOURNAL  
FOR SCIENTISTS  
AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING



## IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2020 Vol. 21  
11 (244)

### CONTENTS

#### *Economy and the organization of assembly*

Aristova N.I. Minimizing the cost of products manufactured by the assembly line . 483

#### *Manufacturability of a construction*

Dubovik E.A. Assembly of LSTK domestic automotive car wash . . . . . 488

#### *Friction & lubrication in machines and mechanisms*

Kolokatov A.M. Recommendations for selecting the characteristics of diamond bars when honing cylinder liners of internal combustion engines . . . . . 492

Shishkarev M.P. Synthesis and analysis of adaptive friction coupling with negative-zero feedback . . . . . 499

Samusenko V.D., Zavidovskii I.A., Streletskii O.A., Buyanovskii I.A., Khrushchov M.M., Shcherbakov Yu.I. Thin coatings with tetrahedral amorphous carbon structure and their behavior in boundary lubrication conditions . . . . . 506

#### *Industrial and design engineer's aid*

Zhitnikov Yu.Z., Loshkarev A.A. The rationale for the final angle tightening wrenches impact taking into account energy losses in the firing mechanism . . . . . 512

Shandybina I.M., Makarov A.M., Kukhtik M.P., Azarjan D.K., Melashhenko O.I., Tverdokhlebov S.A., Shagal'djan S.S., Romanenko M.D. Development a general-service weighting batcher with automatic control . . . . . 516

#### *Assembly and welding works. Soldering*

Ivanov A.A., Kretinin O.V. Assembly of cabs and car bodies based on contact welding technology . . . . . 522

Chair of Editorial Advisory Board —  
Member of Russian Academy of Science  
V.I. KOLESNIKOV

#### Editors

##### MOSCOW

A.S. VASIL'EV  
(Chief editor)  
V.V. BARDUSHKIN  
I.A. BUYANOVSKY  
M.V. VARTANOV  
S.M. ZAKHAROV  
I.N. ZININA

Yu.L. IVANOV  
A.V. IGNATOV  
A.I. KUMENKO  
I.A. LUBININ  
B.V. SHANDROV  
A.G. KHOLODKOVA

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL  
V.I. LYSAK

##### IZHEVSK

I.V. ABRAMOV  
V.G. OSETROV  
B.A. YAKIMOVICH

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN  
A.M. SHPILEV

##### NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

##### OREL

Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV

##### ORENBURG

A.N. POLYAKOV  
A.I. SERDUK  
A.P. FOT

##### PERM

S.M. BELOBORODOV  
V.F. MAKAROV

##### ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN  
I.V. KOLESNIKOV  
A.P. SYCHEV

##### RYBINSK

V.F. BEZIAZYCHNYI  
V.V. NEPOMILUEV  
A.N. SEMENOV

##### SAMARA

Yu.A. VASHUKOV  
M.A. EVDOKIMOV

##### ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBABEV

##### TOMSK

A.V. KOLUBAEV  
V.E. PANIN

##### TULA

A.A. MALIKOV  
V.V. PREYS

##### KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

##### Belarus

##### MINSK

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### GOMEL

V.E. STARZHINSKI

##### Ukraine

##### KIEV

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### DONETSK

A.N. MIKHAILOV

##### Poland

P. LEBKOVSKI  
E. LUNARSKII

#### Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

Journal is distributed on subscription, which can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — 84967) or directly in editorial of the journal.

Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

The reference to the *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal* during reprint of the materials is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.  
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

**Н.И. Аристова**, канд. техн. наук (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН)  
E-mail: avtprom@ipu.ru

## Минимизация стоимости продукции, выпускаемой сборочной линией

*Значимый критерий функционирования сборочной линии — минимизация стоимости выпускаемых изделий, для достижения которой в настоящее время используют подходы, применяющие компьютерное моделирование и иерархический принцип сборки изделия, а также учитывающие вероятностный характер выполнения сборочных операций. Приведен обзор научных исследований, направленных на решение этих задач. Предложен подход, позволяющий оценивать эффективность производства при самовоспроизведении средств автоматизации по критерию минимизации стоимости выпускаемых изделий.*

*A significant criterion for the functioning of an assembly line is to minimize the cost of manufactured products, for the achievement of which approaches are currently used that apply computer modeling and the hierarchical principle of product assembly, the approach, as well as taking into account the probabilistic nature of the assembly operations. An overview of scientific research aimed at solving these problems is given. An approach has been proposed that makes it possible to assess the efficiency of production in the self-reproduction of automation tools by the criterion of minimizing the cost of manufactured products.*

**Ключевые слова:** сборочная линия, моделирование, иерархия, вероятность, самовоспроизведение роботов, минимизация стоимости выпускаемых изделий.

**Keywords:** assembly line, modeling, hierarchy, probability, self-reproduction of robots, minimization of the cost of manufactured products.

Разработка сборочной линии — сложный процесс, в рамках которого необходимо решить ряд задач для достижения максимальной производственной эффективности, такие как количественный и качественный выбор оборудования, балансировка сборочной линии, моделирование сборочных процессов, решение логистических задач, связанных с хранением и перемещением комплектующих и собираемых узлов, а также эргономические вопросы организации рабочих мест.

Цель автоматизации сборочных участков в первую очередь — минимизация стоимости выпускаемой продукции и повышение ее качества. Рассмотрим основные направления исследований, ориентированные на достижение этой цели.

### Моделирование сборочного процесса

Для повышения эффективности производственного процесса и выявления потенциальных проблем в процессе сборки исполь-

зуют моделирование, особенно при изготовлении крупногабаритных сложных изделий. Моделирование сборки вносит свой вклад в сокращение производственных затрат, времени и стоимости, а также в значительное повышение качества продукции. В результате выполнения технологического процесса может возникнуть небольшая погрешность между размером и формой заготовки и ее техническими характеристиками. Таким образом, соответствие отдельных деталей не гарантирует сборку всего изделия в целом: в сборке могут накапливаться небольшие погрешности, что на каком-то этапе приведет к недопустимому отклонению.

Моделирование сборки — одна из технологий автоматизированного анализа изделий, позволяющая визуально представить процесс формирования модели сборки, в том числе определять последовательность и проследить логистику движения деталей. Модель процесса сборки способна предсказать потенциальные проблемы во время физической сборки, такие



как недостаточное число инструментов и невозможность доступа к деталям.

В конце прошлого столетия были предложены методы для генерации и анализа наборов всех возможных последовательностей сборки. Для автоматизации этих методов разработаны программные средства, реализующие алгоритмы на базе технологий искусственного интеллекта, требующие значительных вычислительных ресурсов. Применение данного подхода в течение некоторого ограниченного времени позволяло получить практически оптимальное осуществимое решение [1].

В настоящее время современные алгоритмы для решения проблемы сборки успешно реализуют с определенными допущениями и ограничениями. При таком подходе модель строится с учетом наборов ограничений (предикатов) для проверки поведения генерируемой последовательности сборки. Эти алгоритмы используют предикатные тесты сборки в качестве слоя фильтров для устранения невыполнимых последовательностей сборки. Существует четыре основных ограничения сборки:

предикат связи (возможность соединения деталей при сборке);

предикат геометрической выполнимости (отсутствие геометрических противоречий при соединении деталей);

предикат стабильности (используется для проверки устойчивости соединения, деталь не потеряет контакт со всеми сопрягаемыми деталями на всех последующих этапах сборки);

предикат механической выполнимости (описывает применимость физических разъемов, таких как винты, гайки и болты, заклепки, соединительные штифты, которые могут собираться/разбираться только по одному указанному направлению).

Данный подход носит вероятностный характер и не гарантирует получения наилучшего результата [2].

Среди современных разработок отметим системы сборки, основанные на дополненной реальности. Однако, как показали проведенные исследования, в связи с ограничениями, характерными для технологий дополненной реальности, такие системы пригодны только для некоторых простых сборочных применений. Эти методы анализируют геометрию и взаимодействие между собираемыми компонентами на основе опыта человека.

Модель обеспечения качества сборки (QAMA) основана на анализе основных проблем процесса механической сборки и факторов, влияющих на качество продукции [3]. Подход базируется на: модели процесса сборки, модели выполнения технологических операций и модели данных о качестве. Последняя модель собирает данные во время процесса сборки и определяет структуру данных для поддержки модели обеспечения качества сборки. На основе моделей разработана Internet-система обеспечения качества в механической сборке (QAS/MA).

Для повышения точности и качества сборки обрабатываемых изделий предложена модель прогнозирования точности механической сборки, основанная на уравнении пространства состояний [4]. Для определения ключевого фактора, влияющего на качество продукции, используется нечеткий метод анализа иерархии. Для различных вариантов сборки с помощью уравнения пространства состояний строится динамическая модель механической сборочной системы, позволяющая предсказать влияние характеристик станка на сборочный процесс и точность машинной сборки в заданных пределах.

Вероятностно-статистический подход к расчету качества сборки позволяет получать оценки для благоприятного сочетания предельных размеров составляющих деталей [5]. Полученные математические модели без проведения численных экспериментов прогнозируют результат сборки при использовании метода индивидуального подбора деталей.

### **Иерархический подход в организации сборочного процесса**

Остановимся подробнее на методах повышения качества собираемого изделия, основанных на моделировании в сочетании с иерархическим подходом.

Как правило, сложный продукт часто состоит из большого числа деталей. Набор исходных деталей не всегда является оптимальным с позиции сборочного процесса. Для устранения этого недостатка предложен подход к нахождению иерархической классификации деталей на основе разборки изделия. Идея метода заключается в выполнении процесса разборки изделия, итогом которого получается новая иерархическая структура деталей. На заключи-



тельном этапе выполняется сборка изделия уже с использованием деталей из новой иерархии.

Для перенастройки на новую иерархическую структуру деталей, т.е. на этапе поиска и генерации новой структуры сборки, используют алгоритм интеллектуальной муравьиной колонии с учетом ограничений, накладываемых геометрическими особенностями деталей — ограничения выравнивания по осям или по плоскости [6]. Затем привлекают опыт человека для достижения осуществимого и реалистичного процесса сборки с учетом информации о необходимых монтажных приспособлениях и инструментах.

В работе [7] построены модели трех процессов: разборки, грубой сборки и финишной сборки. При переходе от модели к модели учитывают ограничения, которые в дальнейшем позволят выполнить физическую сборку изделия. В модели процесса сборки для описания физических ограничений между деталями и компонентами используют операционную семантику<sup>1</sup>. Модель процесса сборки строится на базе дерева задач разборки и деталей, полученных в процессе разборки. На основе предложенного механизма моделирования разрабатывается система сборки прототипа AMTProcesser.

В работе [8] исследованы вопросы создания смешанной сборочной линии, пригодной одновременно для сборки и разборки изделий с повторным производством: детали из разборки бывших в употреблении изделий могут быть использованы для создания "новых" изделий. Проблема изучается с помощью теории массового обслуживания и моделирования. Исследуется влияние дополнительной информации о детали, полученной в ходе разборки, для процесса повторной сборки.

Сборочный процесс является стохастическим, т.е. все сборочные операции выполняются правильно с определенной вероятностью. Поэтому при реализации иерархического принципа сборки изделия важный этап — контрольные операции, которые выполняются на каждом уровне иерархии. Без контрольных операций принцип иерархии теряет смысл.

<sup>1</sup> Операционная семантика — категория формальной семантики языка программирования, в которой определенные желаемые свойства программы, такие как корректность или безопасность, проверяются путем создания доказательств из логических утверждений о ее выполнении и процедурах.

## Вероятность правильного выполнения технологических операций

Сборочная операция — одна из трудоемких составляющих технологических процессов производства приборов и машин, качество которой существенно влияет на надежность и долговечность работы изделия. На выходе сборочной линии должно появиться годное законченное изделие, которое собирают в соответствии со спецификацией. Своевременное обнаружение и устранение ошибок на сборочном этапе — важный фактор качества продукта. В 1987 г. G. Boothroyd предложил ставшую классической методологию Design for assembly (DFA), направленную на снижение затрат и вероятности появления ошибок при сборке. В дальнейшем было разработано множество моделей, усовершенствующих оригинальную методологию в области повышения точности сборки и снижения затрат (например, S. Shoval, 2017).

При статистическом контроле качества проверяют не все изделия изготовленной партии, а только выборочные экземпляры. По результатам контроля судят о качестве партии в целом [9]. Метод Six Sigma — распространенный инструмент, используемый для улучшения качества выпускаемой продукции (M.J. Harry, 1989 г.). Он выявляет и устраняет причины сбоев в процессе производства, используя четкую последовательность действий с конкретными целевыми значениями. Эти два известных метода предполагают, что все дефекты являются результатом нормального распределения, которые можно наблюдать и исправлять. Однако многие сбои в процессе сборки можно определить только с точки зрения вероятности возникновения различных типов ошибок, таких как пропущенные операции сборки, ошибки при обработке, ошибки при наладке инструментов и станков, пропущенные детали, бракованные детали и т.д.

В 1993 г. были описаны типы дефектов, их источники и введены переменные для оценки относительной важности каждого источника. Понятие фактора сложности сборки может быть выражено количественными показателями (например, число компонентов и операций сборки), а также качественными показателями (например, уровень сложности компонентов и сборки). Количественные показатели можно измерить однозначно, качественные показатели субъективны и разнообразны.



При расчете вероятности того, что процесс сборки будет успешным, учитывают следующие переменные:

- уровень контроля качества сборочных операций;
- ожидаемое время сборки технологической операции  $i$ ;
- ожидаемое время сборки при выполнении эталонной сборки;
- чувствительность сборки к дефектам ( $k > 1$ );
- число технологических операций;
- вероятность того, что операция  $i$  выполнена с ошибкой.

Вероятность успешной сборки выражает влияние соответствующих факторов на сложность сборки и предоставляет инструмент для сравнения проектных альтернатив. Однако это определение сложности не учитывает влияние последовательности задач, связанных со сборочными операциями.

S. Shoval в своих работах в 2017 и 2019 гг. предлагает определение сложности сборки, основанное на сети сборочных операций и их взаимозависимостей, которые определяют число возможных доработок. Здесь процессы сборки различаются по влиянию ошибки в одной технологической операции на всю сборочную единицу. В простых сборках ошибка на одном этапе требует переделывания только этой задачи и не требует переделывания предыдущих задач. Ошибка в сложном процессе сборки требует либо утилизации полуфабрикатов сборки, либо разборки некоторых компонентов и их повторной сборки. Согласно этому определению, сложность сборки определяется взаимозависимостью задач сборки. Учитывая наличие и доступность широкого спектра датчиков и методов контроля качества, каждая задача в процессе сборки может быть точно отслежена и зарегистрирована независимо. В результате анализа результатов контроля качества каждой задачи процесс сборки может быть своевременно скорректирован.

Зависимости процесса сборки могут быть представлены в виде диаграммы состояний, в которой состояния — технологические операции сборки, а соединяющие их кривые — переходы между ними. С каждым переходом связана вероятность  $p_{ij}$ :

$p_{(i, i+1)}$  — вероятность успешного завершения технологической операции  $i$  и перехода к следующей операции в последовательности  $(i + 1)$ ;

$p_{(i, i)}$  — вероятность повторения той же операции после ошибки;

$p_{i, j} \forall j < i$  — вероятность возвращения к технологической операции  $j$  после ошибки в  $i$  (индекс сложности  $k_i = i - j$  показывает число технологических операций, которые должны повториться в случае отказа на шаге  $i$ ).

Технологическая операция может иметь несколько индексов сложности, так как могут быть вероятности для возвращения к различным предыдущим технологическим операциям в зависимости от конкретного вида ошибки. То есть рассматривается наихудший сценарий, при котором все технологические операции являются взаимозависимыми, каждая из них имеет максимально возможный индекс сложности сборки, так что ошибка на одном сборочном шаге приводит к необходимости пересборки всех предыдущих технологических операций.

В дальнейших работах этого автора предложено сложное изделие разделить на модули, включающие однородные технологические операции, которые характеризуются одинаковыми затратами и вероятностью правильного выполнения всех операций сборки. Делается допущение, что вероятность и стоимость постоянны и не зависят от числа попыток. В этом случае рассчитывается ожидаемая стоимость выполнения  $n$  технологических операций сборки для однородной системы (одинаковые зависимости задач и затраты). Аналогичная формулировка может быть распространена на время сборки, и в этом случае стоимость заменяется однородным временем выполнения индивидуальных технологических операций.

Позднее S. Shoval с тех же позиций исследует гетерогенные сборочные процессы.

#### **Оценка эффективности производства при самовоспроизведении средств автоматизации**

Все рассмотренные пути минимизации стоимости выпускаемой продукции не являются новыми задачами. Впервые каждая из них была сформулирована в первой половине XX века и даже ранее. Но значительное число исследований, посвященных этим темам, говорят об актуальности решения указанных задач с помощью новых технологий и алгоритмов.

В настоящее время сотрудники ИПУ РАН исследуют проблему минимизации стоимости выпускаемых изделий за счет выбора стратегии



автоматизации производственных процессов с широким набором видов технологических операций (ТО), выполняемых автоматами и человеком. Для ее решения предложен метод математического описания на примере сборочного производства, не зависящий от вида технологических операций, и метод построения алгоритмов для поиска оптимальной (минимальной) стоимости выпускаемых изделий для различных параметров производства [10].

Отдельное теоретическое и практическое значение имеет использование предложенного метода для описания процесса самовоспроизведения роботов. Под самовоспроизведением здесь подразумевается автоматическое изготовление средств производства, например роботов, и использование их в дальнейшем в производственном процессе на любом промышленном предприятии. В современной промышленности производство средств автоматизации автоматизировано. Таким образом, в промышленности уже существует самовоспроизведение средств автоматизации.

Рассмотрен производственный процесс, на выходе которого может быть создано любое машиностроительное изделие. Отдельно рассмотрены производства, характеризующиеся неполным (частичным) самовоспроизведением автоматов, т.е. когда автомат выполняет ТО при изготовлении таких же автоматов и при этом в производственном процессе участвует человек, а также полное самовоспроизведение автоматов, когда в производственном процессе автоматов не участвует человек. В случае самовоспроизведения (полного и частичного) имеет место обратная связь, когда созданное автоматами средство автоматизации используется в производственном процессе. Проанализировано влияние этой обратной связи на стоимость и параметры изготавливаемых автоматов.

**Основная цель исследования** — снижение стоимости выпускаемых изделий в машиностроении за счет оценивания эффективности использования каждого автомата при выполнении каждой требуемой на предприятии ТО и формирование стратегии автоматизации производства по выпуску конкретной продукции. Предложенный подход учитывает иерархию при организации сборочного процесса, вероятности правильного выполнения технологических операций. Все алгоритмы проверены путем математического моделирования.

Среди важнейших задач, которые решаются с помощью предложенного подхода, отметим

распределение работ между человеком и автоматом или между различными автоматами, приводящее к минимизации стоимости выпускаемой продукции. Подход применим для:

- действующего промышленного предприятия, имеющего парк механического автоматического оборудования;
- при проектировании новой производственной линии или модернизации действующей;
- при формировании технического задания на изготовление автомата под нужды конкретного предприятия.

Преимущество предложенного подхода — решение поставленной задачи практически любой размерности. При этом алгоритм учитывает структуру процесса изготовления, что позволяет избежать полного перебора возможных вариантов решений.

### Библиографический список

1. **Homem de Mello L.S., Sanderson A.C.** A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991. Vol. 7. No. 2. P. 228—240.
2. **Bahubalendruni R., Bibhuti B.B., Kumar M., Nayak R.** Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // *Assembly Automation*. 2015. Vol. 35. Iss. 4. P. 309—316.
3. **Tang Xiaoqing, Wang B., Wang S.** Quality assurance model in mechanical assembly // *Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 51. P. 1121—1138.
4. **Jian M., Deji C., Liqiang Z.** Mechanical assembly quality prediction method based on state space model // *Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. Iss. 1—4. P. 107—116.
5. **Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Гусарова Н.И.** Вероятностно-статистическая модель процесса индивидуального подбора деталей // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2015. № 1. С. 8—13.
6. **ShiQi Li., Yi L., JunFeng W., HongMei Z.** An intelligent interactive approach for assembly process planning based on hierarchical classification of parts // *Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 1903—1914.
7. **Xiaojun L., Zhonghua N., Jinfeng L., Cheng C.** Assembly process modeling mechanism based on the product hierarchy // *Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 82. Iss. 1—4. P. 391—405.
8. **Ketzenberg M.E., Souza G.C., Guide V.D.R.** Mixed assembly and disassembly operations for remanufacturing // *Production and Operations Management*. 2003. Vol. 12. Iss. 3. P. 320—335.
9. **Саввина Е.А., Преис В.В.** Имитационное моделирование процедур статистического регулирования технологического процесса автоматизированной сборки многоэлементных изделий // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2013. № 12. С. 34—38.
10. **Чадеев В.М., Аристова Н.И.** Самовоспроизведение механических роботов // *М.: СИНТЕГ*. 2012. 309 с.

**Е.А. Дубовик**

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: dubovik1982@list.ru

## Сборка из ЛСТК отечественной автомобильной мойки

*Рассмотрена сборка из ЛСТК отечественной автомобильной мойки. Проанализированы используемые методы и технологии моечных работ автомобилей в России и зарубежных странах предприятий автомобильного сервиса.*

*The of assembly from LSTK of domestic car washes is considered. The methods and technologies of car washing in Russia and Foreign countries of automobile service enterprises are analyzed.*

**Ключевые слова:** автомобиль, автосервис, ЛСТК, моечные работы.

**Keywords:** car, car service, LSTK, washing works.

Загрязнения, попадающие на поверхности автомобиля, приводят к необратимым изменениям химических и физических свойств его лакокрасочных покрытий. Степень воздействия этих веществ под влиянием деформаций и вибраций энергетической установки (двигателя), шасси и самого кузова резко возрастает. В результате на поверхности образуются микротрещины, раковины, выбоины, сколы и т.д., что вызывает коррозию находящегося под покрытием металла.

Для защиты лакокрасочных покрытий на наиболее подверженные коррозии детали наносят различные защитные составы. Но главный способ защиты — мойка и последующая (при необходимости) периодическая полировка кузова. Ручная мойка — процесс трудоемкий, поэтому его стараются механизировать — применять высокопроизводительное моечное технологическое оборудование, внедрять инновационные методы, технологии и т.д.

Такие решения доступны, как правило, только крупным станциям технического обслуживания автомобилей (СТОА) и специализированным мойкам. Они применяют не только струйный метод с большим напором воды, но и более совершенные методы, такие как гидроабразивный (струйный с добавлением абразива),

влажное протирание и их комбинации. Мелкие мойки ограничиваются струйным методом.

Всем этим методам присущ один недостаток: большое водопотребление. Поэтому в последние годы все большее распространение получают мойки так называемого замкнутого цикла, когда до 90 % воды используется повторно. Но для малых предприятий автосервиса такая система слишком дорога. Добавление моющих средств в воду и слив очень сильно влияет на экологическую ситуацию. Законодательно такие действия пока не регулируются.

За рубежом процессы мойки автомобилей организованы иначе, например, в странах Западной Европы все построено на очень жестких законодательных требованиях, которые совершенно не зависят от того, к кому они предъявляются — большим, средним или малым предприятиям.

Немецкая фирма "Обаг" разработала установку мод. 1/4/70/6 для мойки автомобилей, работающую без водопотребления. Ее принцип действия основан на следующем. В обычный моечный комплекс, передвигающийся на роликах по рельсам, вмонтировано три электродных излучателя, питаемых от сети напряжением 220 В. Эти излучатели посылают электромагнитные микроволны, под действием которых





в находящихся на поверхности автомобиля веществах (пыли, грязи) возникает вибрация, "отрывающая" их от облученной поверхности. Мощность, потребляемая такой установкой, составляет около 2 кВт, цикл мойки не превышает 5 с. Единственным недостатком этого технологического процесса является выделение теплоты: за 5 с поверхности кузова нагреваются до 313 К (40 °С). Однако такое тепловыделение не оказывает сильного негативного воздействия ни на лакокрасочные материалы, ни, естественно, на расположенный под ними металл [1].

Итальянская фирма "Иала" создала бесконтактную и высокопроизводительную моечную установку. Реализуемый с ее помощью технологический процесс основан на законе "полярности знаков": в воду, используемую для мойки, вводят коагулянт (серноокислый алюминий, известь и др.), который при соединении с солями воды образует хлопья, адсорбирующие частицы загрязнений. При этом мойка выполняется в три этапа, на первом поверхность автомобиля бомбардируют отрицательно заряженными мелкими капельками коагулянта, а на втором — положительно заряженными. В результате все взвешенные на предыдущем этапе вещества окончательно удаляются с поверхности кузова. Завершающая стадия (третий этап) технологического процесса: обдув подогретым воздухом [1].

В Германии запатентован способ мойки, основанный на электропроводности различных элементов конструкции кузова. Струя моющего раствора используется в качестве проводника, благодаря чему электрический ток, проходя по ней, значительно ускоряет и улучшает очистку поверхности. Для этого очищаемый элемент и сопло распылителя моющего реагента (раствора) соединяют с двумя полюсами источника постоянного тока, в качестве которого используют электрогенератор типа "лиандр", создающий электроимпульсы небольшой частоты. Для увеличения электропроводности струи в моющий раствор вводят добавки и плавно изменяют силу тока с помощью реостата, включенного в электрическую цепь системы сопло—струя—очищаемый элемент. Эффект мойки увеличивается также в результате периодического изменения полярности и, следовательно, направления тока в струе [1].

В Германии применяют несколько методов водоекономной очистки поверхности автомоби-

ля "моющими полотнищами". В одном случае моечная установка содержит качающуюся раму с проемом, через которую проходит автомобиль, пересекая закрепленные на ней "мокрые полотнища", каждое из которых состоит из гибких лент. Во втором случае рама устройства состоит из разнесенных в поперечном направлении дугообразных частей, каждая из которых располагается в плоскости, параллельной траектории перемещения автомобиля, а полотнища проходят между дугообразными частями рамы и располагаются на некотором расстоянии друг от друга вдоль траектории перемещения автомобиля. В третьем случае устройство состоит из рамы и механизма привода, смонтированного на ней электродвигателя. На ней же установлены круглые держатели, в которых закреплены группы моечных полотен, которые соединяются между собой при въезде автомобиля на мойку, образуя из каждой группы полотен единое полотно. Электродвигатель вращает эти полотна в противоположных направлениях, ленточные элементы случайно сцепляются между собой, превращаясь в своеобразную мочалку, хорошо очищающую загрязненные поверхности автомобиля [1].

Установка для протирки вымытых поверхностей автомобиля после мойки представляет собой ротор, на котором подвешены упругие элементы (ленты), выполненные из водопоглощающего материала. При его вращении ленты касаются влажной поверхности и удаляют с нее остатки воды. Устройство снабжено роликами для отжима мокрых лент [1].

Решение проблемы мойки для российских автосервисов возможно за счет быстровозводимых автомоек, обладающих очевидными достоинствами: мобильностью конструкции; минимальными сроками изготовления; невысокой стоимостью; возможностью выбора размеров.

К таким автомойкам относят мойки, изготовленные из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) (рис. 1). При строительстве учитываются скорость и надежность возводимого объекта. Инновационная технология использования ЛСТК решает ряд вопросов при монтаже промышленных и гражданских зданий. ЛСТК производят из холоднокатаной рулонной стали с толщиной листа не более 4 мм. Материал покрыт слоем цинка, защищающим его от коррозии. Быстровозводимые автомойки из ЛСТК являются альтернативой капитально



**Рис. 1. Оцинкованный профиль ЛСТК без просечек (гладкий)**

возводимому объекту. На рис. 2 (на стр. 2 обложки) изображены автомобильные автомойки из ЛСТК на один и два тупиковых поста для легковых автомобилей.

Конструкцию можно приобрести готовым комплектом для сборки или заказать в организации возведение "под ключ".

Сборка автомобильной мойки из ЛСТК включает следующие стадии:

- работа над проектом (месторасположение, размеры, строительные материалы, система вентиляции, особенности утепления);
- определение места строительства автомойки;
- монтаж фундамента (тип основания зависит от характеристики почвы, нагрузки конструкции);
- работа по сборке здания (металлические элементы делают на производстве, а затем готовый комплект доставляют на строительную площадку) (рис. 3 на стр. 2 обложки);
- подключение к коммуникациям;
- установка технологического оборудования (подготовка к вводу в эксплуатацию);
- утепление автомойки из ЛСТК (для комфортного температурного режима внутри помещения монтируют гидроизоляцию: минеральную вату; монолитный пенобетон; каменную вату; пенополистеролбетон; стекловату).

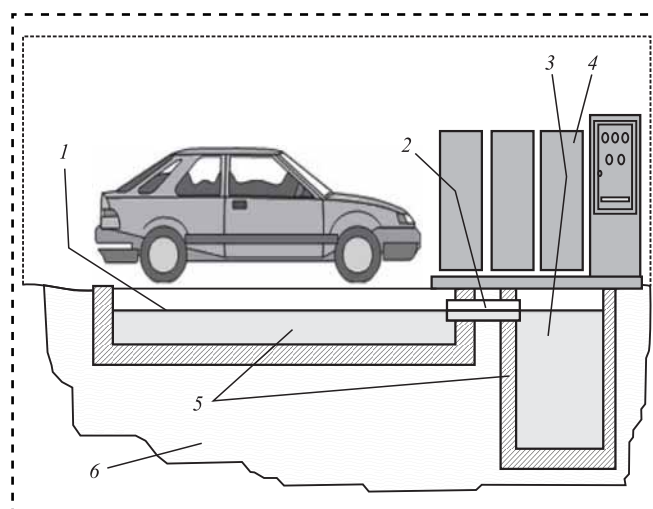
В основном для строительства автомойки используют металлические сэндвич-панели: ширина — 1,19 м; длина — 2...12 м; толщина — 50; 80; 100; 120; 150; 180; 200; 250; 300; 350 мм; масса 1 м<sup>2</sup> — 34 кг; коэффициент теплопроводности — 0,02...0,048 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Структура панели многослойная — вариант "пирога". Металлический лист прикреплен

к несущему каркасу. Для отвода избытка влаги используется пароизоляционная мембрана. Утеплитель — минеральная вата (материал может использоваться повторно). Термопрокладка — принцип работы термоса. Профили для облицовки стен энергоэффективны и широко используются в строительной отрасли.

Одно из инновационных мероприятий, направленных на совершенствование технической оснащенности моечных работ автомобилей, — создание и внедрение мобильных моечных постов. Так, компания "Мобил мойка", входящая в холдинг "Мобил групп", занимающаяся продвижением и решением любых вопросов, касающихся оказания автосервисных услуг (работ), создала уже завоевавшую популярность в российском автосервисе технологию сооружения быстровозводимой безфундаментной металлоконструкции автомоечного здания из сборно-разборных панелей, которая не требует обеспечения инженерными коммуникациями, работает по принципу рециркуляции воды. Автономные автомобильные мойки позволяют обойтись без капитального строительства, без привлечения какой-либо тяжелой строительной техники, силами двух-трех рабочих и сохраняют все плюсы стационарной мойки.

Применяемая в таких мойках технология очистки автомобилей от загрязнений тоже довольно проста (рис. 4). Вода, использованная для мойки, после емкости для отстаивания 1 через верхний перелив 2, поступает в нефте-



**Рис. 4. Мобильная мойка компании "Мобил Групп":**  
 1 — сборный лоток; 2 — верхний перелив (труба);  
 3 — нефтеотделитель; 4 — трехступенчатый фильтр;  
 5 — бетонное основание; 6 — песчаная подушка



отделитель 3, где освобождается от основной части нефтепродуктов. Далее через второй верхний перелив 5, который погружен на 2/3 глубины нефтеотделителя, она поступает в отделение "осветления" и перекачивается насосом в линию, состоящую из трех ступеней фильтров 4. Очистившись, вода возвращается в моечный аппарат для повторного использования (на рисунке не показан) [2].

Нефтепродукты, всплывшие в нефтеразделителе, обезживаются за счет длительного отстаивания, после чего их вывозят на утилизацию, частицы других загрязнений собираются в фильтрах и в тех же емкостях для отстаивания.

Российский автосервис в отношении развития технологий мойки делает пока лишь первые шаги — внедряет замкнутый водооборот. Но нужны и следующие шаги — полный отказ от воды, т.е. полное исключение воды из процессов мойки.

Критерии качества отечественной автомобильной ЛСТК для мойки можно оценить с помощью интегрального показателя достаточности, под которым понимают линейную комбинацию оценок по отдельным критериям (мобильность, цена, надежность и др.) с вектором коэффициентов [3].

Алгоритм поиска интегрального показателя реализован на ЭВМ ЕС-1841 в виде экспертной программы "Выбор". Разработанная программа позволяет решать задачи многокритериального выбора или ранжирования конечного множества различных вариантов критериев качества отечественной автомобильной ЛСТК-мойки. Возможно ее применение для анализа влияния: количества и вида критериев; уровня предъявляемых требований к критериям отечествен-

ной автомобильной ЛСТК-мойки на результаты ранжирования вариантов из заданной конечной выборки на любом из этапов выработки и принятия решения.

В случае расхождения результатов итогового ранжирования возможно выявление внутренних противоречий в мнениях отдельных экспертов на основании анализа результатов программного расчета весовых коэффициентов и сравнения их с весовыми коэффициентами, предлагаемыми экспертами, что позволит избежать субъективных ошибок в принятии решения. Применение программы целесообразно с точки зрения контроля выполнения требований на разработку вариантов критериев качества отечественной автомобильной ЛСТК-мойки и выбора из числа конкурирующих вариантов наиболее рационального с точки зрения интегрального удовлетворения предъявляемым требованиям. С помощью программы возможно обоснование принимаемого решения по выбору средств критериев качества отечественной автомобильной ЛСТК-мойки с точки зрения выделения требуемых денежных, материальных, временных и других ресурсов.

#### Библиографический список

1. **Сарбаев В.И., Селиванов С.С., Коноплев В.И.** Механизация производственных процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей: учеб. пособие. М.: МГИУ, 2003. 284 с.
2. **Дубовик Е.А.** Конкурентоспособность методов и технологий моечных работ предприятий автосервиса // Автомобильная промышленность № 4. 2016. С. 26—27.
3. **Мучник И.Б., Ослон А.А.** Методы построения интегрального показателя в задаче обработки данных // Автоматика и Телемеханика. № 10. 1984. С. 5—22.



**А.М. Колокатов**, канд. техн. наук

(Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева)

E-mail: akolokatov@mail.ru

## Рекомендации по выбору характеристик алмазных брусков при хонинговании гильз цилиндров ДВС

*Проанализированы характеристики алмазных брусков при хонинговании гильз цилиндров ДВС и даны общие рекомендации по их выбору и режимам обработки.*

*The characteristics of diamond bars when honing engine cylinder liners are analyzed and general recommendations are given for their selection and processing modes.*

**Ключевые слова:** хонингование, алмазные бруски, цилиндр, гильза.

**Keywords:** honing, diamond bars, cylinder, sleeve.

Восстановление изношенных деталей — важнейший резерв сокращения потребления запасных частей и снижения себестоимости ремонта машин, так как себестоимость восстановленных деталей составляет в среднем 50...60 % от стоимости новых запасных частей.

При восстановлении многих ответственных деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин широко распространено хонингование. В настоящее время алмазный инструмент на операции хонингования применяют на всех двигателестроительных заводах.

В 1950—1960 гг. были опубликованы первые работы по крупнозернистому абразивному хонингованию, которое в ряде случаев позволяло заменить такие операции, как расточка и шлифование. Однако данный процесс не нашел широкого применения вследствие низкой стойкости брусков. В 1960—1970 гг. хонингование брусками из обычных абразивных металлов вытеснило хонингование брусками из синтетических алмазов. Дальнейшим развитием процесса алмазного хонингования явилось создание брусков из дробленых поликристаллических алмазов зернистостью 315/250...800/630.

Крупнозернистые алмазные бруски стали рационально применять при хонинговании со съемом больших припусков на диаметр вместо

операции расточки при восстановлении гильз цилиндров.

Ниже приведены результаты исследования алмазного хонингования со съемом больших припусков брусками из дробленых поликристаллических алмазов АРВ1 для восстановления гильз цилиндров автотракторных двигателей. Такая операция характеризуется съемом больших припусков порядка 0,3...0,4 мм на диаметр. В дальнейшем эту операцию будем называть обдирочным хонингованием.

Восстановление гильз цилиндров с изменением размеров проводят способом ремонтных размеров (РР) — наиболее распространенным и экономичным при ремонте авиационных, судовых и автотракторных двигателей. Способ РР предусматривает обработку гильз цилиндров под один из РР и постановку поршней и колец увеличенного (ремонтного) диаметра.

Ремонт гильз способом РР включает операцию расточки гильз с последующей чистовой обработкой хонингованием. Операцию расточки гильз выполняют на вертикально-расточных станках модели 2А697, 2В697 или на алмазно-расточных станках модели 278Н, 2А78, 2А78Н и др. Часто при расточке гильз цилиндров со вставками в зоне перехода от вставки к основному металлу нарушается геометрия поверх-



ности вследствие большого выхвата резцом металла гильзы после вставки из-за пониженной ее твердости по сравнению со вставкой. После расточки гильзы цилиндра подвергается двух-трех кратному алмазному хонингованию. На операции предварительного алмазного хонингования применяют бруски с алмазами марки АС4, АС6 зернистостью 100/80...63/50 на связке М1, М73 с 50...100%-ной концентрацией алмазов. На операции окончательного хонингования — АСМ 40/28...20/14 М2-01 100 %.

Актуально совершенствование способа РР ремонта гильз в направлении повышения производительности и точности обработки.

Процесс алмазного хонингования крупнозернистыми брусками с алмазами АС20, АРК4 и АРВ1 зернистостью 315/250...630/500 со съемом припусков порядка 0,1...0,4 мм обеспечивает повышение производительности и экономичности по сравнению с тонким растачиванием и развертыванием.

Поскольку поликристаллические алмазные бруски АРВ1 по производительности не уступают синтетическим брускам АС20 и АСС, а стоимость их значительно ниже, изучили возможность их применения на операциях обдирочного хонингования при обработке гильз цилиндров двигателей. Поэтому в исследованиях использованы бруски с алмазами АРВ1.

**Цель работы** — исследовать процессы алмазного хонингования гильз цилиндра ДВС, изучить вопросы выбора рациональных характеристик алмазных брусков и режимов обработки и дать соответствующие рекомендации.

Для исследования процесса алмазного обдирочного хонингования использованы гильзы цилиндров двигателя ЗИЛ-508, изготовленные из серого чугуна марки СЧ 20 по ГОСТ 1412—85 твердостью 170...229 НВ и образцы из чугунных заготовок (серый чугун СЧ 20) твердостью 170...229 НВ, химический состав которых аналогичен химическому составу гильзы цилиндра.

Исследования проведены на вертикально-хонинговальном станке модели ЗГ833. Основные паспортные данные станка: частота вращения шпинделя — 150, 280, 400 мин<sup>-1</sup>, скорость возвратно-поступательного движения — 8, 11,5, 18 м/мин.

В качестве технологической оснастки применяли: при хонинговании образцов — механическое приспособление для жесткого крепления и хонинговальная головка диаметром 40 мм,

при хонинговании гильз цилиндров ЗИЛ-508 — механическое (эксцентрикового типа) и диафрагменное приспособления и одношарнирные шестибрусковые хонинговальные головки.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовали смесь из 85 % керосина (ГОСТ 33193—2014) и 15 % масла "Индустриальное-20" (И-20А) (ГОСТ 20799—88), а в заводских условиях — СОЖ, применяемую заводом. Перед началом экспериментов алмазные бруски обрабатывались согласно ГОСТ 25594—83.

Производительность металлосъема оценивали количеством снятого металла в граммах одним квадратным сантиметром рабочей поверхности бруска за единицу времени:

$$Q = Q_m / (FT_0),$$

где  $Q$  — производительность металлосъема, г/(см<sup>2</sup>·мин);

$Q_m$  — масса снятого металла за время  $T_0$ , г;

$F$  — рабочая площадь бруска, см<sup>2</sup>;

$T_0$  — машинное время хонингования, мин.

Удельный расход алмазов хонинговальных брусков  $q_x$  по ГОСТ 14706—78 — относительный расход алмазов, оценивали количеством алмазов, приходящихся на снятие одного грамма металла:

$$q_x = \frac{q_a}{Q_m},$$

где  $q_a$  — расход алмазов в комплекте хонинговальных брусков, мг;

$Q_m$  — масса снятого металла, г.

Расход алмазов хонинговальных брусков определяли взвешиванием комплекта брусков до и после хонингования на аналитических весах типа ВЛА-200М с точностью 0,1 мг. Перед взвешиванием бруски тщательно промывали в бензине Б70 и сушили при температуре 60...80 °С в течение 30...40 мин. Расход алмазов хонинговальных брусков  $q_a$  определяли по формуле:

$$q_a = \frac{\Delta P}{\gamma_{ac} \cdot 10^3} \frac{P_k K}{10^2} \cdot 200,$$

где  $\Delta P$  — расход алмазоносного слоя комплекта брусков, мг;

$\gamma_{ac}$  — плотность алмазоносного слоя, г/см<sup>3</sup>;

$P_k$  — количество карат в 1 см<sup>3</sup> алмазоносного слоя при 100%-ной концентрации алмаза,  $P_k = 4,4$  кар/см<sup>3</sup>;

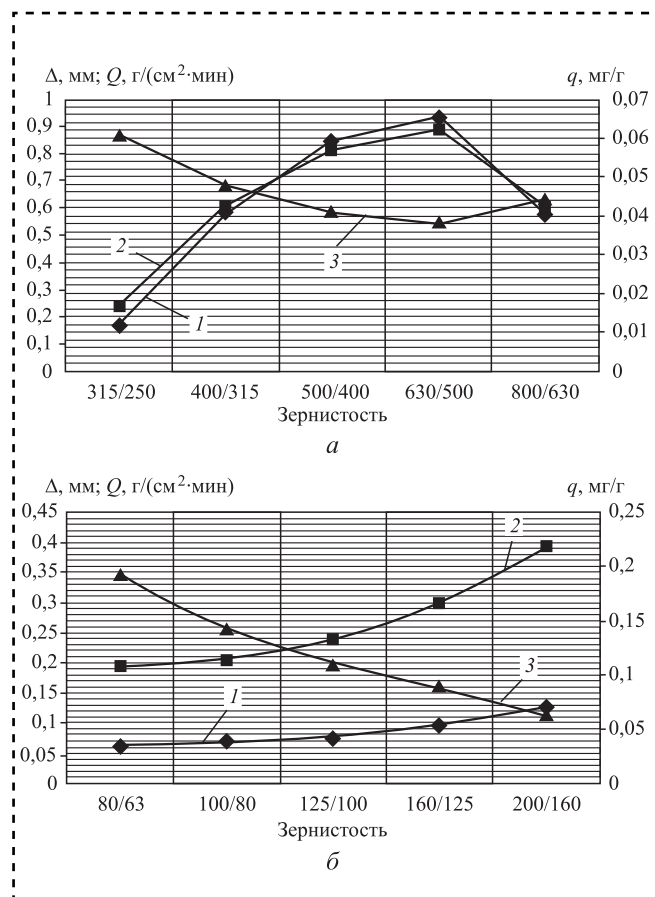
$K$  — концентрация алмазов в алмазоносном слое, %.



Исследования по выбору характеристик брусков при хонинговании сначала провели на образцах с внутренним диаметром 44,5 мм, длиной 100 мм и толщиной стенки 10 мм, изготовленных из серых чугунов СЧ 20 (170...220 НВ) и СЧ 20 (HRC  $\geq$  40) по ГОСТ 1412–85. Все образцы предварительно хонинговали под один размер с параметром шероховатости поверхности  $Ra = 0,25...0,20$  мкм. Режим обработки: окружная скорость — 22 м/мин ( $n = 155 \text{ мин}^{-1}$ ), скорость возвратно-поступательного движения — 8 м/мин, давление брусков — 0,6 МПа.

При исследовании влияния зернистости брусков при обдирочном алмазном хонинговании применяли бруски с алмазами марки АРВ1 зернистостью 315/250, 400/315, 500/400, 630/500 и 800/630 на связке МК1 при 50%-ной концентрации алмазов. Результаты обдирочного хонингования серого чугуна СЧ 20 (170...220 НВ) при времени хонингования 3 мин и серого чугуна СЧ 20 (HRC  $\geq$  40) при времени хонингования 1 мин приведены в табл. 1 и на рис. 1. В начале экспериментов время обдирочного хонингования 3 мин. Однако при таком времени снимался очень большой слой металла. Поэтому в дальнейшем время при хонинговании снизили до 1 мин.

С увеличением зернистости брусков производительность металлосъема увеличивалась. В исследованном диапазоне зернистостей при хонинговании серого чугуна СЧ 20 (170...229 НВ) производительность металлосъема



**Рис. 1.** Показатели процесса обдирочного алмазного хонингования образцов из серого чугуна СЧ 20 (170...220 НВ) при времени хонингования 3 мин (а) и СЧ 20 (HRC  $\geq$  40) при времени хонингования 1 мин (б) в зависимости от зернистости алмазов АРВ1:

1 — толщина снимаемого слоя  $\Delta$ , мм; 2 — производительность  $Q$ , г/(см<sup>2</sup>·мин); 3 — износ  $q$ , мг/г

Таблица 1

Показатели процесса обдирочного хонингования образцов в зависимости от зернистости алмазов АРВ1

Обрабатываемый материал	Зернистость алмазов	Толщина снимаемого слоя $\Delta$ , мм	Производительность $Q$ , г/(см <sup>2</sup> ·мин)	Износ $q$ , мг/г
СЧ 20 (170...220 НВ)	315/250	0,166	0,2364	0,061
	400/315	0,579	0,6066	0,048
	500/400	0,845	0,8125	0,041
	630/500	0,938	0,8942	0,038
	800/630	0,582	0,6067	0,044
СЧ 20 (HRC $\geq$ 40)	315/250	0,071	0,2219	0,130
	400/315	0,099	0,3019	0,093
	500/400	0,126	0,3584	0,074
	630/500	0,185	0,4965	0,058
	800/630	0,255	0,7133	0,051



возрастала с 0,2364 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,8942 г/(см<sup>2</sup>·мин) для алмазов АРВ1 630/500, т.е. в 3,8 раза, а для алмазов АРВ1 800/630 уменьшалась до 0,6066 г/(см<sup>2</sup>·мин), т.е. в 1,5 раза по сравнению с алмазами АРВ1 630/500. В исследованном диапазоне зернистостей снимаемый слой на диаметр увеличился с 0,166 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,938 мм для алмазов АРВ1 630/500, т.е. в 5,6 раза, а для алмазов АРВ1 800/630 уменьшился в 1,6 раза по сравнению с алмазами АРВ1 630/500. Такое падение производительности брусков с алмазами АРВ1 800/630, видимо, происходит за счет непрочности связки МК1 и выкрашивания крупных зерен алмазов.

Удельный расход алмазов уменьшился с 0,061 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,038 мг/г для алмазов АРВ1 630/500, т.е. в 1,6 раза. Удельный расход алмазов АРВ1 800/630 равен 0,044 мг/г, т.е. в 1,2 раза увеличился по сравнению с алмазами АРВ1 630/500. С увеличением зернистости алмазных брусков шероховатость обработанной поверхности возрастает: АРВ1 315/250...400/315 —  $R_z$  10...20,  $R_a$  2,5...5, АРВ1 630/500 —  $R_z$  20...40,  $R_a$  5...10, 800/630 —  $R_z$  40...80,  $R_a$  10...20.

При хонинговании чугуна СЧ 20 ( $HRC \geq 40$ ) производительность металлосъема возросла с 0,2219 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,7133 г/(см<sup>2</sup>·мин) для алмазов АРВ1 800/630, т.е. в 3,2 раза. При этом снимаемый слой на диаметр увеличился с 0,071 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,255 мм для алмазов АРВ1 800/630, т.е. в 3,6 раза. Удельный расход алмазов уменьшился с 0,13 для алмазов АРВ1 315/250 до 0,051 мг/г для алмазов АРВ1 800/630, т.е. в 2,5 раза.

Поскольку процесс хонингования брусками разных характеристик осуществляется на одном станке и одной и той же технологической оснастке, то оценку экономической эффективности можно вести по сумме затрат на зарплату станочника и на инструмент. Аналогично была определена сумма затрат для брусков различной зернистости при хонинговании чугуна СЧ 20 ( $HRC \geq 40$ ): для АРВ1 315/250 — 0,0785 руб., для АРВ1 400/315 — 0,0630 руб., для АРВ1 500/400 — 0,0579 руб., для АРВ1 630/500 — 0,0492 руб., АРВ1 800/630 — 0,0432 руб.

Таким образом, наиболее экономичными при хонинговании серого чугуна оказались алмазные бруски с алмазами АРВ1 630/500, а при

хонинговании закаленного чугуна — бруски АРВ1 800/630. Учитывая то, что при хонинговании сырого чугуна параметр шероховатости поверхности  $R_z$  брусков с алмазами 400/315 в 2 раза меньше, чем брусков с алмазами 630/500, рекомендованы для обдирочного хонингования чугуна СЧ 20 (170...229 НВ) бруски с алмазами АРВ1 зернистостью 400/315...500/400, а для обдирочного хонингования чугуна СЧ 20 ( $HRC \geq 40$ ) — бруски с алмазами АРВ1 зернистостью 630/500... 800/630.

При исследованиях связок использованы алмазные бруски АРВ1 зернистостью 400/315 при 50%-ной концентрации алмазов с металлическими связками М17, М73 и металлокерамическими связками МК1 и МК2. Время обработки — 3 мин (табл. 2, рис. 2 на стр. 3 обложки).

Производительность брусков на металлических связках выше, чем на металлокерамических, и у брусков на связке М73 достигает наибольшего значения —  $Q = 0,8391$  г/(см<sup>2</sup>·мин) при минимальном удельном расходе алмазов —  $q = 0,0040$  мг/г.

Как показали предварительные эксперименты, процесс обдирочного алмазного хонингования гильз ЗИЛ-508 на связках М17 и М73 (в отличие от связок МК) при давлении 0,4 МПа был затруднен вследствие недостаточной мощности станка ЗГ833 из-за возникающих больших осевых и окружных сил при обдирочном хонинговании с брусками на металлических связках. По данным Львовского завода алмазных инструментов, изготавливающего хонинговальные бруски на металлокерамических связках, связка МК1 является нетехнологичной в производстве. Поэтому при обдирочном алмазном хонинговании серого чугуна СЧ 20 (170...220 НВ) на станках типа ЗГ833 рекомендуются бруски на металлокерамической связке МК2.

Таблица 2

Показатели процесса обдирочного хонингования образцов из СЧ 20 (170...229 НВ) в зависимости от связки алмазных брусков

Связка брусков	Толщина снимаемого слоя $\Delta$ , мм	Производительность $Q$ , г/(см <sup>2</sup> ·мин)	Износ $q$ , мг/г
МК2	0,753	0,7882	0,024
МК1	0,579	0,6066	0,044
М73	0,822	0,8391	0,004
М17	0,779	0,8016	0,006

### Процесс получистового алмазного хонингования

Для исследований взяты бруски АРВ1 с алмазами зернистостью 200/160, 160/125, 125/100, 100/80 и 80/63 на связке МК2 при 100%-ной концентрации алмазов. Обрабатывали образцы после обдирочного хонингования брусками АРВ1 400/315 на связке МК2 с 50%-ной концентрацией алмазов. Среднее значение параметра шероховатости поверхности образцов  $Rz = 18$  мкм. Эксперименты проведены при режиме обработки: окружная скорость 22 м/мин ( $n = 155 \text{ мин}^{-1}$ ), скорость возвратно-поступательного движения 8 м/мин, давление брусков 0,6 МПа, продолжительность обработки 1 мин (табл. 3, рис. 3).

С увеличением зернистости брусков производительность металлосъема увеличивается. В исследованном диапазоне зернистостей-

Таблица 3

Показатели процесса получистового хонингования образцов из чугуна СЧ 20 в зависимости от зернистости алмазов АРВ1

Зернистость алмазов	Толщина снимаемого слоя $\Delta$ , мм	Производительность $Q$ , г/(см <sup>2</sup> ·мин)	Износ $q$ , мг/г
200/160	0,127	0,3933	0,062
16/125	0,096	0,2978	0,090
125/100	0,076	0,2381	0,110
100/80	0,069	0,2036	0,141
80/63	0,064	0,1938	0,192

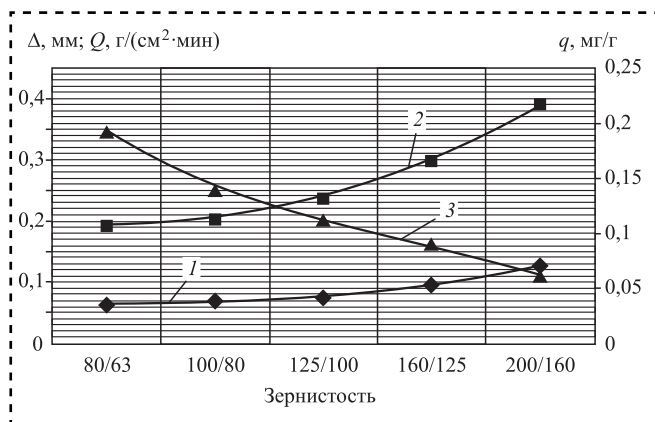


Рис. 3. Показатели процесса получистового алмазного хонингования образцов из чугуна СЧ 20 (170...229 НВ) в зависимости от зернистости алмазных брусков при времени хонингования 1 мин:

1 — толщина снимаемого слоя  $\Delta$ , мм; 2 — производительность  $Q$ , г/(см<sup>2</sup>·мин); 3 — износ  $q$ , мг/г

производительность металлосъема увеличилась с 0,1938 для алмазов зернистости 80/63 до 0,3933 г/(см<sup>2</sup>·мин) для алмазов зернистости 200/160, т.е. в 2 раза. С увеличением зернистости удельный расход алмазов в исследованном диапазоне зернистостей уменьшился с 0,192 для алмазов 80/63 до 0,062 мг/г для алмазов 200/160, т.е. в 3,1 раза. С увеличением зернистости параметры шероховатости обработанной поверхности: 80/63...125/100 —  $Rz$  6,3...10,  $Ra$  1,25...2,5, 160/125...200/160 —  $Rz$  10...20,  $Ra$  2,5...5.

За критерий выбора оптимальной зернистости брусков при получистовом (втором) хонинговании принимали шероховатость, получаемую после окончательного (третьего) хонингования, т.е. удовлетворение обработанной поверхности требованиям технических условий по шероховатости поверхности после окончательного хонингования. Поэтому выбор зернистости брусков проведен после окончательного хонингования.

Подтверждена возможность использования на операции получистового хонингования гильз цилиндров брусков повышенной зернистости АРВ1 160/125 МК2 100 % благодаря использованию на окончательном хонинговании брусков на связке МК3.

### Процесс окончательного алмазного хонингования

При исследовании показателей процесса окончательного хонингования применяли бруски АСМ с алмазами зернистостью 28/20 на связке М1 при 100%-ной концентрации алмазов. В качестве образцов использованы втулки из СЧ 20 после обдирочного хонингования брусками АРВ1 400/315 МК2 50 % и обработанные на получистовом хонинговании брусками АРВ1 200/160, 160/125, 125/100, 100/80, 80/63 со временем обработки  $T = 1$  мин и параметром шероховатости  $Ra = 1,46...4,98$  мкм. Принят следующий режим обработки: окружная скорость — 22 м/мин ( $n = 155 \text{ мин}^{-1}$ ), скорость возвратно-поступательного движения — 8 м/мин, давление брусков — 0,6 МПа, время обработки — 30 с (табл. 4, рис. 4).

Производительность металлосъема брусков с алмазами АСМ 28/20 образцов после обработки их алмазами АРВ1 80/63...200/160 увеличивается с 0,0666 до 0,1523 г/(см<sup>2</sup>·мин), т.е. в 2,8 раза, а удельный расход алмазов уменьшается с 0,5489 до 0,2311 мг/г, т.е. в 2,4 раза.



Таблица 4

Показатели процесса окончательного хонингования образцов из чугуна СЧ 20 брусками АСМ 28/20 МК3 100 % в зависимости от зернистости алмазов на получистовом хонинговании

Зернистость алмазов	Толщина снимаемого слоя $\Delta$ , мм	Производительность $Q$ , г/(см <sup>2</sup> ·мин)	Износ $q$ , мг/г
200/160	0,0245	0,1523	0,2311
160/125	0,0150	0,0927	0,2430
125/100	0,0126	0,0798	0,2868
100/80	0,0118	0,0736	0,4047
80/63	0,0110	0,0666	0,5489

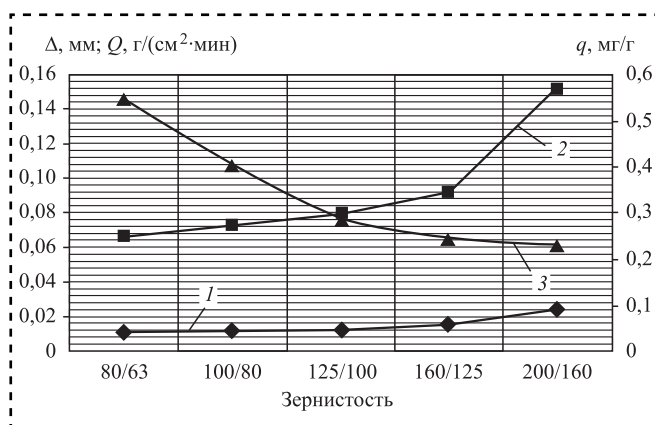


Рис. 4. Показатели процесса окончательного алмазного хонингования брусками АСМ28/20М1 100 % образцов из чугуна СЧ 20 (170...229 НВ) после получистового хонингования брусками АРВ1 зернистостью 80/63...200/160: 1 — толщина снимаемого слоя  $\Delta$ , мм; 2 — производительность  $Q$ , г/(см<sup>2</sup>·мин); 3 — износ  $q$ , мг/г

Образцы с параметром шероховатости  $Ra = 2,01...2,46$  мкм (получистовая обработка АРВ1 100/80...125/100) после окончательного хонингования имели одинаковый параметр шероховатости,  $Ra = 0,238$  мкм. Однако у брусков АРВ1 100/80 удельный износ в 1,4 раза больше, чем у брусков АРВ1 125/100, поэтому их также не следует использовать на получистовом хонинговании. Бруски АРВ1 200/160 также не пригодны для получистового хонингования (после окончательного хонингования параметр шероховатости — 0,53 мкм).

Новые связки МК3 и МВ4 позволяют повысить производительность процесса окончательного хонингования. Поэтому была исследована режущая способность брусков АСМ 28/20 на связках М1, М73, МК3 и МВ4 на образцах из серого чугуна СЧ 20 (170...220 НВ) и СЧ 20 ( $HRC > 40$ ) после получистового хонингования брусками АРВ1 160/125 МК2 100 %. Режим обработки: окружная скорость — 22 м/мин, скорость возвратно-поступательного движения — 8 м/мин, давление — 0,6 МПа, время обработки — 30 с (табл. 5, рис. 5 на стр. 3 обложки).

Бруски АСМ 28/20 МК3 имеют наибольшую производительность и наименьшую шероховатость. Повышенный износ данных брусков объясняется введением в состав связки абразивного материала — карбида кремния зеленого, который делает связку МК3 более хрупкой, чем другие связки. При этом, благодаря хрупкости связки, зерна алмазов быстрее обновляются и процесс резания этих брусков происходит интенсивнее. Операция окончательного

Таблица 5

Показатели процесса окончательного хонингования образцов из серого чугуна брусками с алмазами АСМ зернистостью 28/20 и со 100%-ной концентрацией алмазов в зависимости от связки брусков

Обрабатываемый материал	Связка брусков	Толщина снимаемого слоя $\Delta$ , мм	Производительность $Q$ , г/(см <sup>2</sup> ·мин)	Износ $q$ , мг/г	Параметр шероховатости $Ra$ , мкм
СЧ 20 (170...220 НВ)	М1	0,015	0,0927	0,243	0,310
	М73	0,017	0,1051	0,285	0,283
	МК3	0,023	0,1422	0,481	0,251
	МВ4	0,018	0,1113	0,457	0,265
СЧ 20 ( $HRC \geq 40$ )	М1	0,0081	0,0515	1,165	0,240
	М73	0,0092	0,0585	1,025	0,287
	МК3	0,0127	0,0808	1,646	0,240
	МВ4	0,0100	0,0636	1,254	0,261



хонингования в первую очередь должна обеспечить требуемую шероховатость поверхности и расход алмазов на этой операции минимален из-за малых припусков, поэтому рекомендованы для этой операции бруски АСМ 28/20 на связке МК3, которые обладают повышенной режущей способностью и позволяют использовать на операции получистового хонингования бруски с повышенной зернистостью.

### Заключение

Процесс алмазного хонингования крупнозернистыми брусками с алмазами АС20, АРК4 и АРВ1 зернистостью 315/250...630/500 со съемом припусков порядка 0,10...0,30 мм обеспечивает повышение производительности и экономичности по сравнению с растачиванием и развертыванием.

На операции обдирочного алмазного хонингования серых чугунов, которая заменяет операцию расточки, рекомендуются: для серых чугунов (170...241 НВ) — бруски с алмазами АРВ1 зернистостью 400/315...500/400 на связке МК2 с 50%-ной концентрацией алмазов; для закаленных чугунов ( $HRC \geq 40$ ) — бруски с алмазами АРВ1 зернистостью 500/400...800/630

на связке МК2 с 50%-ной концентрацией алмазов.

На операции окончательного хонингования гильз и цилиндров (170...241 НВ и  $HRC \geq 40$ ) рекомендуются алмазные бруски на связке МК3, которые позволяют использовать на операции получистового хонингования бруски с повышенной зернистостью — 160/125, в то время как на ремонтных заводах используются бруски зернистостью 80/63...100/80.

Оптимальные значения режимов резания:

при обдирочном хонинговании —  $p = 0,8...1,0$  МПа,  $v_0 = 40...50$  м/мин,  $v_n = 10...12$  м/мин,  $T_0 = 2,0...3,0$  мин;

при получистовом хонинговании —  $p = 0,8$  МПа,  $v_0 = 40...50$  м/мин,  $v_n = 10...12$  м/мин,  $T_0 = 0,5...1,0$  мин;

при окончательном хонинговании —  $p = 0,4...0,6$  МПа,  $v_0 = 30...40$  м/мин,  $v_n = 10...12$  м/мин,  $T_0 = 0,3...0,5$  мин.

### Библиографический список

1. Колокатов А.М. Восстановление гильз цилиндров автотракторных двигателей алмазным обдирочным и плосковершинным хонингованием в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 273 с.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет.
- С любого номера и на любой срок.
- Без почтовых наценок.

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



М.П. Шишкарёв, д-р техн. наук

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: shishkarevm@mail.ru

## Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты с отрицательно-нулевой обратной связью

Показано, что максимальная точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отрицательно-нулевой обратной связью достигается при монотонном возрастании вращающего момента в интервале изменения коэффициента трения, возникновении распорной силы от вращающего момента фрикционной группы, охваченной отрицательной обратной связью, при минимальном коэффициенте трения и выключенной отрицательной обратной связи при максимальном коэффициенте трения.

It is shown that the maximum accuracy of the adaptive friction coupling with negative-zero feedback is achieved when the torque increases monotonously in the range of changes in the coefficient of friction, the occurrence of a spacer force from the torque of the friction group covered by the negative feedback at the minimum value of the coefficient of friction and the negative feedback is turned off at the maximum value of the coefficient of friction.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, синтез, анализ, обратная связь, отрицательно-нулевая, точность срабатывания.

**Keywords:** adaptive friction coupling, synthesis, analysis, feedback, negative-zero, response accuracy.

### Введение

В настоящее время отрицательно-нулевую обратную связь применяют в адаптивных фрикционных муфтах (АФМ) по схеме подачи на сумматор входного сигнала (распорной силы), возбуждаемого вращающимися моментами фрикционных групп, одна из которых охвачена отрицательной обратной связью, вторая — не охвачена [1, 2]. Такое перестроение структурно-функциональной схемы АФМ позволяет повысить точность ее срабатывания в некоторых пределах, ограниченных определенным максимальным коэффициентом усиления (КУ) управляющего устройства (УУ) муфты.

Ограничение точности срабатывания АФМ, построенной по указанной схеме, как и по схемам, построенным по типу одноконтурной отрицательной обратной связи [3], обусловлено тем, что форма изменения входного сигнала фрикционной группы практически адекватна форме изменения ее выходного сигнала. С ростом коэффициента трения увеличение распорной силы носит нелинейный характер и замедляется при максимальных значениях коэффициента трения.

Один из путей повышения точности срабатывания АФМ — подача на вход фрикционной группы сигнала, который линейно зависит от коэффициента трения (рис. 1).

Согласно схеме муфта имеет две фрикционные группы ГФ1 и ГФ2, которые передают нагрузку по параллельным силовым потокам. Фрикционная группа ГФ1 охвачена отрицательной обратной связью при помощи УУ, выходной сигнал  $F_p$  которого поступает на вход сумматора С.

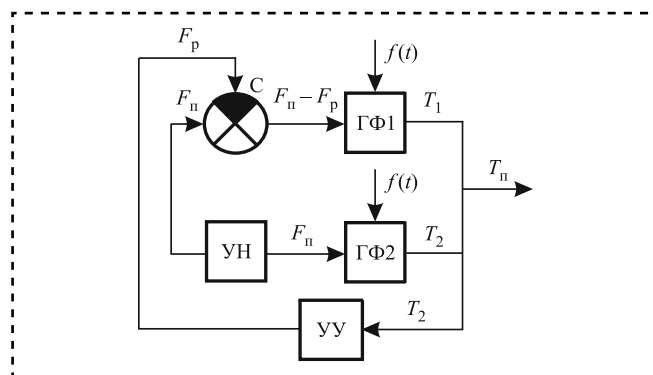


Рис. 1. Структурно-функциональная схема АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью

Входным сигналом УУ является вращающий момент  $T_2$  фрикционной группы ГФ2, которая не охвачена обратной связью (так называемая нулевая обратная связь). На выходе сумматора С формируется сигнал вида  $F_{\text{п}} - F_{\text{р}}$ , представляющий собой алгебраическую сумму задающего воздействия  $F_{\text{п}}$  нажимного узла УН и управляющего воздействия  $F_{\text{р}}$  УУ. Входным сигналом фрикционной группы ГФ2 является задающее воздействие  $F_{\text{п}}$ .

При параллельной схеме передачи нагрузки полный вращающий момент АФМ равен сумме вращающих моментов  $T_1$  и  $T_2$  соответственно фрикционных групп ГФ1 и ГФ2.

Входной (по отношению к фрикционной группе ГФ1) сигнал  $F_{\text{п}} - F_{\text{р}}$  переменный по величине и зависит от возмущающего воздействия  $f(t)$  (коэффициент трения  $f$  в функции времени  $t$ ), изменяющегося произвольным образом [4]. Управляющее воздействие  $F_{\text{р}}$  линейно зависит от возмущающего воздействия  $f(t)$  и не зависит от выходного регулируемого параметра  $T_1$ .

Принципиальная схема АФМ, разработанная в соответствии со структурно-функциональной схемой, представленной на рис. 1, показана на рис. 2, а. Полумуфты 1 и 2 связаны между собой двумя фрикционными группами. Первая фрикционная группа состоит из дисков трения 3 и 4, собранных в пакет, и опирается на упорный диск 5 посредством упорного подшипника 6. Вторая фрикционная группа включает в себя диски трения 7 и 8, также собранные в пакет, который замкнут на упорный диск 9 при помощи пружины 10. Сила натяжения пружины 10 передается на пакет дисков 7 и 8 через упорный подшипник 11.

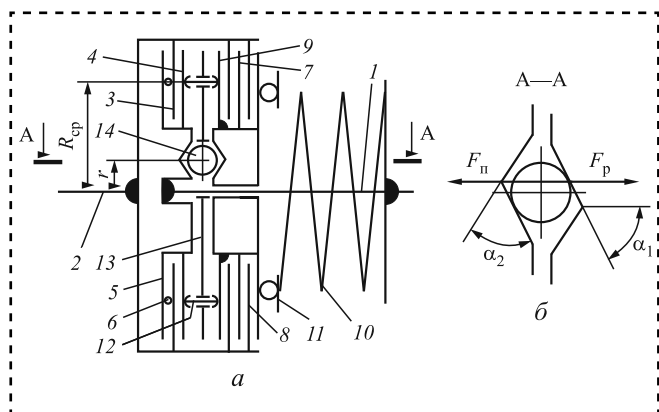


Рис. 2. Принципиальная схема АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью

Силовое замыкание пакета дисков 3 и 4 осуществляется пружиной 10, сила натяжения которой передается посредством толкателей 12. Толкатели размещены в гнездах промежуточного диска 13, смонтированного на ступице полумуфты 1.

УУ муфты состоит из тел качения (шариков) 14, которые размещены в гнездах ступицы полумуфты 1 равномерно по окружности и одновременно входят в гнезда со скошенными боковыми стенками, выполненными на взаимно-обращенных торцевых поверхностях ступиц одного из дисков 3 и упорного диска 9 (рис. 2, б). Ступицы дисков установлены на ступице полумуфты 1 с возможностью свободного поворота относительно нее.

Передача вращательного движения, например, от полумуфты 1 к полумуфте 2, осуществляется посредством тел качения 14 на диски 3, 7 и 9, затем за счет сил трения — на диски 4, 8 и далее — на полумуфту 2. При передаче нагрузки между телами качения 14 и контактирующими с ними элементами муфты возникает распорная сила  $F_{\text{р}}$ , вектор которой направлен противоположно вектору силы натяжения  $F_{\text{п}}$  пружины 10 и ослабляющая действие силы  $F_{\text{п}}$  на пакет фрикционных дисков 3 и 4 (через упорный диск 9 и толкатели 12).

На пакет фрикционных дисков 7 и 8 распорная сила не оказывает никакого влияния, если выполняется неравенство вида  $F_{\text{п}} > F_{\text{р}}$ .

Для принципиальной схемы, представленной на рис. 2, а, значение КУ при взаимодействии тел качения 14 со стенками гнезд упорного диска 9 должно быть больше значения КУ при взаимодействии со стенками гнезд диска 3:

$$T_1 = z_1 R_{\text{ср}} f (F_{\text{п}} - F_{\text{р}}), \quad (1)$$

где  $z_1$  — число пар поверхностей трения фрикционной группы, состоящей из дисков 3 и 4;

$R_{\text{ср}}$  — средний радиус поверхностей трения дисков 3 и 4.

Вращающий момент фрикционной группы, состоящей из дисков 7 и 8, вычислим по формуле:

$$T_2 = z_2 F_{\text{п}} R_{\text{ср}} f, \quad (2)$$

где  $z_2$  — число пар поверхностей трения фрикционной группы, состоящей из дисков 7 и 8.

Средние радиусы поверхностей трения дисков 3 и 4, 7 и 8 приняты одинаковыми.



Поскольку распорная сила  $F_p$  возникает за счет вращающего момента, передаваемого второй фрикционной группой, запишем:

$$F_p = \frac{T_2}{r} \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (3)$$

где  $r$  — радиус окружности, на которой расположены тела качения  $14$ ;

$\alpha_1$  — угол скоса боковой стенки гнезда упорного диска  $9$ .

Подставляя правую часть соотношения (2) в выражение (3) и затем полученное соотношение — в формулы (1) и (2), получаем:

$$T_{\Pi} = F_{\Pi} R_{\text{cp}} f (z_1 + z_2 - z_1 z_2 C_1 f), \quad (4)$$

где  $C_1$  — КУ обратной связи,  $C_1 = \frac{R_{\text{cp}}}{r} \operatorname{tg} \alpha_1$ .

Исследуем найденную функцию (4), для чего продифференцируем ее один раз по переменной  $f$ :

$$(T_{\Pi})'_f = z_1 + z_2 - 2z_1 z_2 C_1 f.$$

Приравнявая нулю производную, находим решение данного уравнения:

$$f_k = \frac{z_1 + z_2}{2z_1 z_2 C_1}, \quad (5)$$

где  $f_k$  — критический коэффициент трения.

Вторая производная функции (4) отрицательная, поэтому при значении коэффициента трения, равном  $f_k$ , функция имеет максимум.

Из формулы (5) следует, что коэффициент трения  $f_k$  зависит от КУ, поэтому теоретически возможны три формы нагрузочной характеристики  $T_{\Pi}(f)$ .

1. Кривая, монотонно возрастающая в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  (где  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  — минимальный и максимальный коэффициенты трения соответственно). Данному условию соответствует КУ:

$$C_1 = \frac{z_1 + z_2}{2z_1 z_2 f_{\max}}. \quad (6)$$

В этом случае максимум функции (4) соответствует верхнему граничному значению коэффициента трения из указанного интервала.

Функция (4) будет также возрастающей в указанном интервале, если значения КУ удовлетворяют неравенству  $C_1 < C'_1$ .

2. Монотонно убывающая кривая в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ . В данном случае максимум функции (4) соответствует нижнему граничному значению коэффициента трения из указанного интервала, а КУ равен:

$$C'_1 = \frac{z_1 + z_2}{2z_1 z_2 f_{\min}}. \quad (7)$$

Функция (4) будет убывающей также в том случае, если  $C_1 > C'_1$ .

3. Кривая функции  $T_{\Pi}(f)$ , возрастающая на одной части указанного интервала и падающая — на другой.

В данном случае нас будет интересовать, прежде всего, вариант, когда выполняется равенство  $T_{\Pi}(f_{\min}) = T_{\Pi}(f_{\max})$ . Наибольшую точность срабатывания АФМ, обладающие максимумом вращающего момента внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , имеют именно при указанном условии [5].

Данное условие выполняется при КУ, вычисленном по формуле:

$$C_1 = \frac{(z_1 + z_2)m}{z_1 z_2 (m+1)f_{\max}}, \quad (8)$$

где  $m = f_{\max}/f_{\min}$  — коэффициент относительной ширины интервала изменения коэффициента трения.

Подставляя правую часть формулы (8) в соотношение (5), получаем:

$$f_k = \frac{(m+1)f_{\max}}{2m} = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}. \quad (9)$$

Следовательно, критическое значение коэффициента трения равно полусумме максимального и минимального значений коэффициента трения и не зависит от конструктивных параметров АФМ.

Коэффициент точности АФМ в данном случае определяется как отношение вращающего момента при  $f = f_k$  к вращающему моменту при любом граничном значении коэффициента трения  $f_{\min}$  или  $f_{\max}$  [6]. Учитывая соотношения (4), (8) и (9), получаем:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\Pi}(f_k)}{T_{\Pi}(f_{\min})} = \frac{T_{\Pi}(f_k)}{T_{\Pi}(f_{\max})} = \frac{(m+1)^2}{4m}, \quad (10)$$

где  $T_{\Pi}(f_k)$  — вращающий момент, соответствующий коэффициенту трения  $f_k$ ;

$T_{\Pi}(f_{\min})$  — вращающий момент, соответствующий коэффициенту трения  $f_{\min}$ ;

$T_{\Pi}(f_{\max})$  — вращающий момент, соответствующий коэффициенту трения  $f_{\max}$ .

Формула (10) показывает, что, в отличие от существующих типов АФМ, точность срабатывания исследуемой муфты при рассматриваемой форме нагрузочной характеристики  $T_{\Pi}(f)$  не зависит от конструктивных параметров муфты и определяется только коэффициентом относительной ширины интервала изменения коэффициента трения.

Нулевая обратная связь, характерная для рассмотренных форм нагрузочной характеристики, сохраняется до тех пор, пока выполняется условие  $F_{\Pi} \geq F_p$  [7]. В случае невыполнения данного условия вторая фрикционная группа будет охвачена положительной обратной связью, а силовое замыкание пакета фрикционных дисков 3 и 4 прекращается, как и при  $F_{\Pi} = F_p$ .

Режим действия положительной обратной связи в АФМ данного типа нежелателен, так как приводит к резкому увеличению вращающего момента и снижению точности срабатывания.

Определим признак выполнения поставленного условия с привлечением формул (2) и (3):

$$C_1^* \leq \frac{1}{z_2 f_{\max}}. \quad (11)$$

При остальных значениях коэффициента трения  $f < f_{\max}$  соотношение (11) выполняется.

Найденное ограничение значения КУ  $C_1^*$  позволяет оценить возможность реального получения трех форм нагрузочной характеристики. Для этого сопоставим значения КУ по соотношениям (6)—(8) и (11), учитывая при этом, что КУ  $C_1^*$  должен быть, по меньшей мере, равен остальным указанным значениям КУ. В результате сопоставления получаем:

— для достижения монотонного возрастания функции (4) в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  должно выполняться условие:

$$z_2 \leq z_1; \quad (12)$$

— для достижения монотонного убывания функции (4):

$$z_2 \leq \frac{z_1(2-m)}{m}; \quad (13)$$

— для получения максимума функции (4) внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$  при условии ра-

венства друг другу вращающих моментов АФМ при граничных значениях этого интервала:

$$z_2 \leq \frac{z_1}{m}. \quad (14)$$

Из соотношений (12)—(14) реально выполняемыми являются соотношения (12) и (14). Соотношение (13) выполняется только при условии  $m < 2$ , т.е. при весьма узком интервале изменения значений коэффициента трения.

С учетом найденных ограничений соответствующие КУ равны:

$$C_1' = \frac{1}{z_1 f_{\max}} = \frac{1}{z_2 f_{\max}}; \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{m}{z_1 f_{\max}}. \quad (16)$$

Сопоставление формул (11) и (15) показывает, что  $C_1' = C_{1\max}^*$  при  $z_1 = z_2$  (где  $C_{1\max}^*$  — максимальное значение КУ  $C_1^*$ ).

При монотонном возрастании функции (4) в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  коэффициент точности определяем по формуле:

$$K_T = \frac{z_2 m^2}{(z_1 + z_2)m - z_1}. \quad (17)$$

При  $z_1 = z_2$  формула (17) принимает следующий вид:

$$K_T = \frac{m^2}{2m - 1}. \quad (18)$$

Сопоставление коэффициентов точности  $K_T$  по формулам (10) и (18) (в предположении, что первое значение коэффициента точности меньше второго) приводит к неравенству вида

$$3m^2 < 2m^3 + 1,$$

которое выполняется при  $m > 1$ . Следовательно, точность срабатывания АФМ при наличии максимума функции (4) внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$  выше, чем при ее монотонном возрастании в указанном интервале, если  $z_1 = z_2$ .

Как показывает анализ формулы (4), с учетом формул (15) и (16), при одинаковом суммарном числе пар трения фрикционных групп АФМ, номинальная нагрузочная способность муфты при монотонно возрастающей функции (4) выше вследствие меньшего в  $m/2$  раз значения КУ.

В связи с этим исследуем влияние параметра  $z_2$  на точность срабатывания АФМ (в форму-





ле (17)). Первая производная по переменной  $z_2$  равна:

$$(K_T)_{z_2}' = z_1(m-1),$$

и при  $m > 1$  положительная. В соответствии с соотношением (12) монотонный характер функции (4) сохраняется при уменьшении параметра  $z_2$  от значения  $z_2 = z_1$ , поэтому точность срабатывания муфты будет повышаться по мере уменьшения параметра  $z_2$ .

В качестве предельного значения принимаем  $z_2 = 1$ , если  $z_1 < m$  (в противном случае функция (4), согласно соотношению (14), утрачивает монотонный характер в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$ ).

Учитывая соотношение (6), получаем:

$$K_T = \frac{T_{\Pi}(f_{\max})}{T_{\Pi}(f_{\min})} = \frac{m^2}{2(2m-1)}. \quad (19)$$

Сопоставление коэффициентов точности  $K_T$  по соотношениям (18) и (19) показывает, что точность срабатывания АФМ при значении параметра  $z_2 = 1$  в два раза выше, чем при  $z_1 = z_2$ .

Сопоставление коэффициентов точности  $K_T$  по соотношениям (10) и (19) (в предположении, что коэффициент точности согласно соотношению (10) больше) приводит к неравенству вида:

$$3m^2 - 1 > 0,$$

которое выполняется при любом реальном значении коэффициента  $m$ . Следовательно, принятая принципиальная схема АФМ обладает наибольшей точностью срабатывания при  $z_2 = 1$  и монотонном возрастании функции (4) в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

Ограниченная точность срабатывания АФМ с рассмотренной структурно-функциональной схемой объясняется невысоким значением вращающего момента, который муфта передает при  $f = f_{\min}$ , поскольку действующая в этот момент времени распорная сила УУ достаточно велика [8]. Для ее уменьшения необходимо обеспечить формирование распорной силы за счет левого УУ (см. рис. 2, б). В этом случае формула для определения вращающего момента  $T_1$  имеет следующий вид:

$$T_1 = z_1 R_{cp} f (F_{\Pi} - F_{p1}), \quad (20)$$

где  $F_{p1}$  — распорная сила, возникающая за счет действия левого УУ:

$$F_{p1} = \frac{T_1}{r} \operatorname{tg} \alpha_2, \quad (21)$$

$\alpha_2$  — угол скоса боковых стенок гнезд упорного диска 5.

Подставляя правую часть соотношения (21) в формулу (20), получаем уравнение первой степени с одним неизвестным членом  $T_1$ , решение которого имеет следующий вид:

$$T_1 = z_1 F_{\Pi} R_{cp} \frac{f}{1 + z_1 C_2 f}, \quad (22)$$

где  $C_2$  — КУ обратной связи;  $C_2 = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha_2$ .

Используя полученный результат в виде соотношения (22) в выражении (21), запишем формулу для определения распорной силы  $F_{p1}$ :

$$F_{p1} = z_1 F_{\Pi} C_2 \frac{f}{1 + z_1 C_2 f}. \quad (23)$$

Левая часть УУ будет оказывать действие на пакет фрикционных дисков 3 и 4 (см. рис. 2, а) до тех пор, пока справедливо соотношение вида  $F_p \leq F_{p1}$ . Данное утверждение является правомочным, поскольку скорость изменения значений вращающих моментов  $T_1$  и  $T_2$  в функции коэффициента трения  $f$ , в соответствии с формулами (2) и (22), неодинакова: вращающий момент  $T_2$  увеличивается быстрее, чем вращающий момент  $T_1$ .

Поскольку значение коэффициента точности определяется отношением максимального вращающего момента АФМ в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  к минимальному вращающему моменту [9], целесообразно указанное соотношение распорных сил  $F_p$  и  $F_{p1}$  только при  $f = f_{\min}$ , если функция  $T_{\Pi}(f)$  будет возрастающей в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  или  $f_{\min} \dots f_k$ . Для этого КУ  $C_1$  должно удовлетворять соотношению (6) или (8).

Видоизмененная структурно-функциональная схема АФМ приведена на рис. 3. Ее отличие от структурно-функциональной схемы, показанной на рис. 1, состоит в том, что входным сигналом УУ при  $f = f_{\min}$  является вращающий момент  $T_1$  фрикционной группы ГФ1 или вращающий момент  $T_2$ , а при  $f > f_{\min}$  — вращающий момент  $T_2$  фрикционной группы ГФ2.

Приравнивая друг другу правые части соотношений (3) (с учетом соотношений (2) и (23)), при  $f = f_{\min}$  получаем:



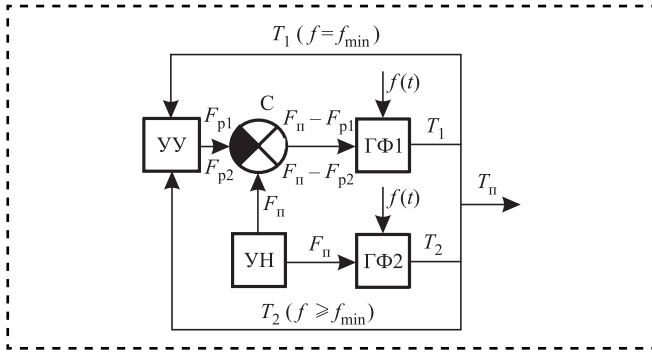


Рис. 3. Модернизированная структурно-функциональная схема АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью

$$C_2 = \frac{z_2 C_1}{z_1 - z_1 z_2 C_1 f_{\min}}. \quad (24)$$

Формула (24) показывает соотношение между значениями левой и правой частей УУ, при котором выполняется равенство  $F_p = F_{p1}$ .

Вращающий момент АФМ при  $f = f_{\min}$  равен:

$$T'_n = F_n R_{cp} f_{\min} \frac{z_1 + z_2 + z_1 z_2 C_2 f_{\min}}{1 + z_1 C_2 f_{\min}}. \quad (25)$$

Наибольшая точность срабатывания АФМ в рассматриваемом случае обеспечивается, если при  $f = f_{\max}$  вращающий момент фрикционной группы ГФ1 будет равен нулю. Данное условие выполняется при КУ, равном:

$$C_1 = \frac{1}{z_2 f_{\max}}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (24), получаем:

$$C_2 = \frac{1}{z_1 (f_{\max} - f_{\min})}. \quad (26)$$

Формулу для вычисления коэффициента точности АФМ в рассматриваемом случае с учетом соотношений (2), (25) и (26) запишем в следующем виде:

$$K_T = \frac{z_2 f_{\max} \times}{f_{\min} (f_{\max} - f_{\min}) \times} \rightarrow \frac{\times (1 + f_{\max} - f_{\min})}{\times [z_1 + z_2 + z_2 f_{\min} / (f_{\max} - f_{\min})]}. \quad (27)$$

Для исследования влияния параметра  $z_2$  на коэффициент точности запишем формулу (27) в следующем виде:

$$K_T = \frac{z_2 f_{\max} (1 + f_{\max} - f_{\min})}{f_{\min} [z_1 (f_{\max} - f_{\min}) + z_2 f_{\max}]},$$

и продифференцируем полученную функцию по переменной  $z_2$ . Получаем (без учета постоянных членов):

$$(K_T)'_{z_2} = z_1 (f_{\max} - f_{\min}) > 0.$$

Таким образом, коэффициент точности  $K_T$  увеличивается по мере роста параметра  $z_2$ , что адекватно уменьшению точности срабатывания АФМ. Наоборот, увеличение параметра  $z_1$  приводит к уменьшению  $K_T$  и, следовательно, к повышению точности срабатывания муфты.

Поскольку для выполнения условия  $F_p = F_{p1}$  при разных значениях параметров  $z_1$  и  $z_2$  можно назначать соответствующие КУ  $C_1$  и  $C_2$ , регулируя их соответствующими величинами углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Принципиального ограничения параметра  $z_1$  для большинства типов АФМ не существует (кроме соображений конструктивно-компоновочного характера) [10]. Точность срабатывания АФМ можно изменять за счет варьирования параметров  $z_1$  и  $z_2$ . При этом должно выполняться соотношение (12).

При наличии максимума нагрузочной характеристики АФМ в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  и равенстве друг другу вращающих моментов на границах указанного интервала при КУ, определяемом по соотношению (8), коэффициент точности вычисляются по формуле (10).

Вычисления, проведенные по формулам (10), (18), (19) и (27), дали следующие результаты:

— при действии УУ ГФ2 и наличии максимума функции (4) внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$  —  $K_T = 2,53$ ;

— при первоначальной структурно-функциональной схеме АФМ и монотонно возрастающем характере функции (4) в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  при  $z_1 = z_2$  —  $K_T = 4,27$ ;

— при монотонно возрастающей нагрузочной характеристике АФМ —  $K_T = 2,13$ ;

— при разделении периодов времени действия УУ и монотонно возрастающем вращающем моменте АФМ в интервале  $f_{\min} \dots f_{\max}$  —  $K_T = 1,74$  (при  $z_1 = 10$ ) и  $K_T = 1,13$  (при  $z_1 = 16$ ).

Вычисления проведены при следующих исходных данных:  $f_{\min} = 0,1$ ;  $f_{\max} = 0,8$ ;  $z_2 = 1$ ;  $m = 8$ . При указанных исходных данных значения КУ составили:  $C_1 = 1,25$ ;  $C_2 = 0,14$  (при  $z_1 = 10$ ) и  $C_2 = 0,09$  (при  $z_1 = 16$ ).



Возможность реализации трех форм нагрузочной характеристики АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и двумя отдельными фрикционными группами позволяет расширить возможности при расчетах, выборе оптимальных параметров и проектировании муфты для достижения наилучших технических характеристик, соответствующих условиям ее эксплуатации.

В отличие от вариантов АФМ второго поколения с отдельным силовым замыканием и с двухконтурной отрицательной обратной связью наибольшая точность срабатывания АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и двумя отдельными фрикционными группами достигается при монотонном возрастании вращающего момента в интервале изменения коэффициента трения [9, 10].

Особенность АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и двумя отдельными фрикционными группами — влияние на точность срабатывания числа пар трения обеих фрикционных групп.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и двумя отдельными фрикционными группами, в частности, при выборе формы нагрузочной характеристики для определения точности срабатывания, соответствующей условиям эксплуатации.

### Выводы

АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и двумя отдельными фрикционными группами, одна из которых охвачена отрицательной обратной связью, а другая не охвачена, в зависимости от КУ может иметь три различные формы нагрузочной характеристики — в виде падающей кривой, в виде монотонно возрастающей кривой или в виде кривой с точкой максимума вращающего момента внутри интервала  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

Максимальная точность срабатывания АФМ достигается при монотонном возрастании вращающего момента в интервале изменения коэффициента трения, возникновении распорной силы от вращающего момента фрикционной группы, охваченной отрицательной обратной связью, при минимальном значении коэффициента трения и выключенной отрицательной

обратной связью при максимальном значении коэффициента трения.

На точность срабатывания АФМ влияет число пар трения обеих фрикционных групп. Точность срабатывания муфты возрастает с увеличением числа пар трения фрикционной группы, охваченной отрицательной обратной связью, и при уменьшении числа пар трения фрикционной группы с нулевой обратной связью.

### Библиографический список

1. **Шишкарёв М.П.** Исследование базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. статей 8-й Междунар. научно-практической конф. в рамках 18-й Международной агропромышленной выставки "Интерагромаш-2015". 2015. С. 162—167.
2. **Шишкарёв М.П.** Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 "Компьютерная поддержка производственных процессов" / под общ. ред. В.С. Балакирева. Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. С. 72—76.
3. **Шишкарёв М.П.** Вопросы теории адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Известия вузов. Машиностроение. 1994. № 4—6. С. 43—47.
4. **Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык.** Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 9. С. 42—45.
5. **Шишкарёв М.П.** Теоретические основы применения двухконтурной отрицательной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестник машиностроения. 2005. № 8. С. 19—21.
6. **Шишкарёв М.П.** Функциональные связи между характеристиками предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 5. С. 8—10.
7. **Шишкарёв М.П.** Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Известия вузов. Машиностроение. 2001. № 2—3. С. 17—23.
8. **Шишкарёв М.П.** Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 13—15.
9. **Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю.** Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием // Вестник ДГТУ. 2014. Т. 14. № 1 (76). С. 200—203.
10. **Шишкарёв М.П.** Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Вестник машиностроения. 2006. № 6. С. 7—10.



**В.Д. Самусенко**, канд. техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН),  
**И.А. Завидовский**, **О.А. Стрелецкий**, канд. физ.-мат. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова),  
**И.А. Буяновский**, д-р техн. наук, **М.М. Хрущов**, канд. физ.-мат. наук, **Ю.И. Щербаков**  
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)  
E-mail: ia.zavidovskii@physics.msu.ru, michel\_x@mail.ru

## Тонкие покрытия со структурой тетраэдрического аморфного углерода и их поведение в условиях граничной смазки\*

*Представлены результаты исследования особенностей структурного состояния и трибологического поведения испытанных в условиях граничной смазки тонких покрытий тетраэдрического аморфного углерода, полученных методом ионно-плазменного импульсно-дугового распыления графита.*

*The results of an investigation of the structural peculiarities of the thin ta-C coatings obtained by the method of impulse arc sputtering of graphite and of their tribological tests in boundary lubrication conditions are presented.*

**Ключевые слова:** *sp*-углерод, аморфный углерод, импульсно-дуговое распыление графита, спектроскопия комбинационного рассеяния, электронная дифракция, трение и износ, граничная смазка.

**Keywords:** *sp*-carbon, amorphous carbon, impulse arc sputtering of graphite, Raman spectroscopy, electron diffraction, friction and wear, boundary lubrication.

### Введение

Тонкие пленки и покрытия, состоящие из аморфного углерода с преобладающей долей  $sp^2$ -связей (*a*-C) и  $sp^3$ -связей (*ta*-C) применяют в качестве защитных, износостойких и антифрикционных покрытий, элементов наномеханических систем, оптических покрытий и т.д. Изменяя параметры получения углеродных пленок, можно управлять степенью гибридизации углеродных  $sp$ -связей и, соответственно, составом углеродных фаз в покрытиях, что позволяет в значительной мере влиять на их конечные функциональные свойства [1–5].

Активные исследования углеродных покрытий проводятся на кафедре физической электроники МГУ [6]. В работе [7] показано наличие в углеродных покрытиях, синтезированных различными методами (плазмохимическим осаждением, химическим методом и импульсно-плазменным распылением), общих особенностей, связанных с наличием двух типов структурных составляющих: оболочки

со структурой типа транс-полиацетиленовой и алмазоподобного или графитового ядра [8–10]. Можно предположить, что различное сочетание этих двух структурных типов приведет к существенным изменениям функциональных, в том числе трибологических свойств углеродных покрытий. Углеродные покрытия с преобладанием фазы с цепочечной структурой могут оказывать ориентирующее действие на молекулы жидких кристаллов и смазочных сред [11]. В трибологии подобные углеродные покрытия получили название "покрытий-ориентантов" [12]. Исследования поведения подобных покрытий в условиях граничной смазки начали в ИМАШ РАН уже довольно давно, но вопрос о том, как влияет на трибологическое поведение изменение соотношения долей алмазоподобной и обладающей цепочечной структурой фаз никогда ранее не рассматривался. Между тем известно, что варьирование технологических условий плазменно-дугового напыления (степени ионизации, содержания газообразного углеводорода или азота в атмосфере напыления и т.д.) может оказывать существенное влияние на содержание  $sp^1$ -фазы с линейными

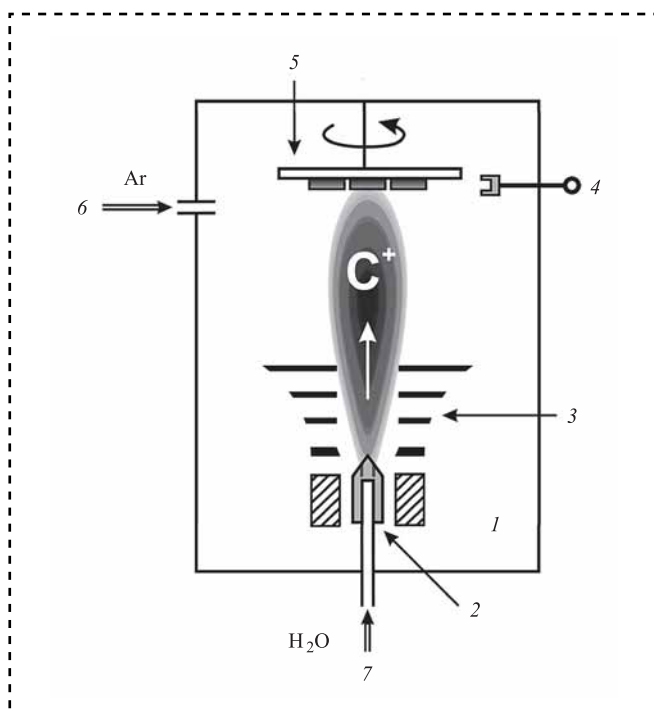
\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-010011).

углеродными цепочками в структуре покрытий *ta-C* [7, 14, 15]. Проведение подобных исследований может представить значительный интерес, однако предварительно следует установить, насколько имеющаяся плазменно-дуговая технология получения покрытий *ta-C* подходит для нанесения покрытий трибологического назначения, и отработать методику таких испытаний.

**Цель работы** — получение модельного покрытия со структурой *ta-C* методом вакуумного плазменно-дугового распыления, проведение его испытаний на граничное трение в базовом масле (ПАО-4) и подготовка на основе их анализа рекомендаций по методике напыления и режиму трибологических испытаний.

### Методы нанесения и исследования покрытий и полученные результаты

Тонкие углеродные покрытия со структурой типа *ta-C* получали методом ионно-плазменного импульсно-дугового распыления графита (рис. 1). Метод позволяет, регулируя параметры осаждения, такие как остаточное давление



**Рис. 1.** Схема установки импульсно-дугового вакуумного напыления, использованной для получения углеродных покрытий:

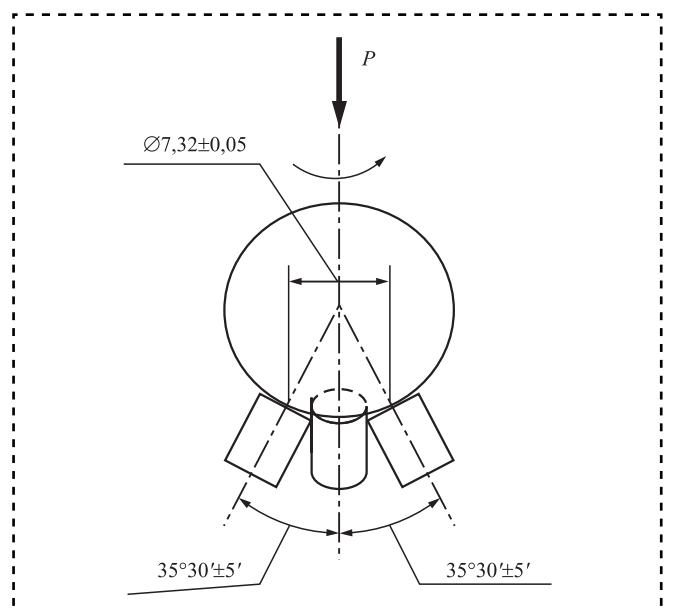
1 — вакуумная камера; 2 — графитовый катод; 3 — импульсно-плазменный источник; 4 — загрузчик; 5 — подложкодержатель; 6 — напуск рабочего газа; 7 — водяное охлаждение

и состав рабочего газа, изменять в широком спектре свойства покрытий, управляя их морфологией и фазовым составом.

Импульсно-дуговое распыление графитового катода проходило в вакуумной камере с предварительной безмасляной откачкой до остаточного давления  $10^{-4}$  торр. Процесс напыления в атмосфере Ar вели при мощности разряда 1 кВт и рабочем давлении в камере  $10^{-3}$  торр. Температура поверхности подложек в процессе нанесения не превышала  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Перед началом процесса подложки предварительно очищали травлением ионами Ag с энергией 1 кэВ. Толщина получаемых покрытий составляла 1 мкм.

Структуру и фазовый состав углеродной фазы покрытий исследовали методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) на спектрометре Horiba HR 800 с длиной волны гелий-неонового лазера 632,8 нм и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) покрытий (в последнем случае напыление проводили на монокристаллический скол каменной соли).

Трибологические испытания выполняли на модернизированной лабораторной установке КТ-2 по схеме "вращающийся шар — три торца роликов" (рис. 2) [16]. В качестве образцов для испытаний использовали стандартные шарики диаметром 12,7 мм из стали ШХ15 и ролики  $5\times 8$  мм из той же стали, на торцовую поверхность которых наносили исследуемые



**Рис. 2.** Схема контакта образцов в узле трения машины КТ-2 при испытаниях по схеме "вращающийся шар — три торца роликов"



покрытия. Шпиндель машины с зажатым шариком прижимается к поверхностям роликов, сложенных равнобедренным треугольником, которые установлены в оправке в плоскости, перпендикулярной к оси шпинделя, с нагрузкой  $P = 108$  Н. Частота вращения шпинделя с шаром —  $1 \text{ мин}^{-1}$ . Продолжительность испытания каждого комплекта образцов — 60 мин. В процессе исследования измеряли момент трения, оцениваемый по углу закручивания торсионного динамометра. Результаты испытаний представлены в виде зависимостей средних значений коэффициента трения, полученных по результатам трех повторных испытаний, от времени. Испытания на трение проводили без смазочной среды, и используя смазку полиальфа-олефиновым базовым маслом ПАО-4 с вязкостью  $\nu_{100} = 4 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

На картинах электронной дифракции изученных покрытий присутствуют широкие диффузные гало, отвечающие межплоскостным расстояниям 0,21 и 0,115 нм (рис. 3). Такие линии характерны для аморфных углеродных материалов [17]. Их наличие говорит о присутствии в покрытии ближнего порядка с расположением атомов, близким к наблюдаемому в кристаллической решетке алмаза, для структуры которого характерно присутствие рефлексов, связанных с дифракцией от плоскостей (111) и (220) с межплоскостными расстояниями, равными  $d_{(111)} = 2,06 \text{ \AA}$  и  $d_{(220)} = 1,26 \text{ \AA}$ , соответственно. В то же время линии при 3,35  $\text{Å}$ ,

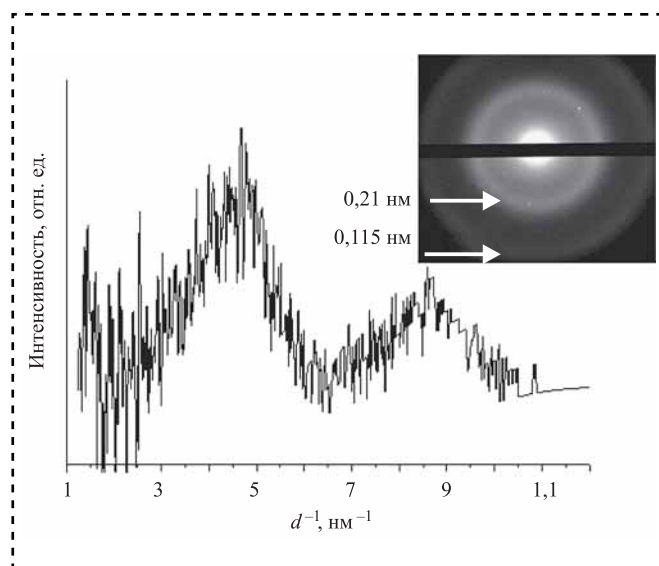


Рис. 3. Интенсивность диффузных максимумов электрограммы (представлена на вставке) покрытия *ta-C*

соответствующей отражению от плоскости (002) графита и являющейся основной отличительной чертой  $sp^2$ -структуры графитного типа, на рис. 3 не наблюдается. Все это свидетельствует о преобладающем тетраэдрическом (*ta-C*) типе аморфного состояния углеродной фазы.

Спектр КР покрытия, полученного распылением в атмосфере аргона, представлен на рис. 4. Наблюдается широкий G-пик вблизи  $1520 \text{ см}^{-1}$ , характерный для аморфных углеродных структур типа *ta-C* [18]. Таким образом, спектр КР обусловлен, главным образом, рассеянием на  $sp^2$ -гибридизованных атомах. Если для поликристаллических углеродных структур удастся разделить D- и G-линии спектра, то для аморфных они сливаются в одну, как это показано на рис. 4. В силу этого количественные интерпретации для аморфных структур с его помощью затруднительны. Можно лишь заключить, что дальний порядок в структуре покрытий отсутствует.

Результаты исследования данного покрытия методом спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ) [15], в котором для оценки доли  $sp^2/sp^3$ -фаз был использован метод, представленный в работе [19], показали, что доля  $sp^3$ -фазы составляет около 80 %. Это согласуется с результатами аналогичных оценок, выполненных на основе анализа данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) пленок, полученных вакуумным плазменно-дуговым распылением

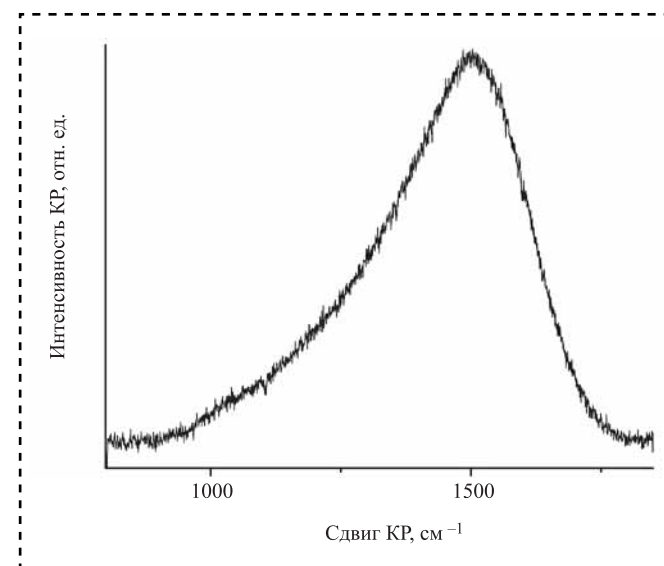
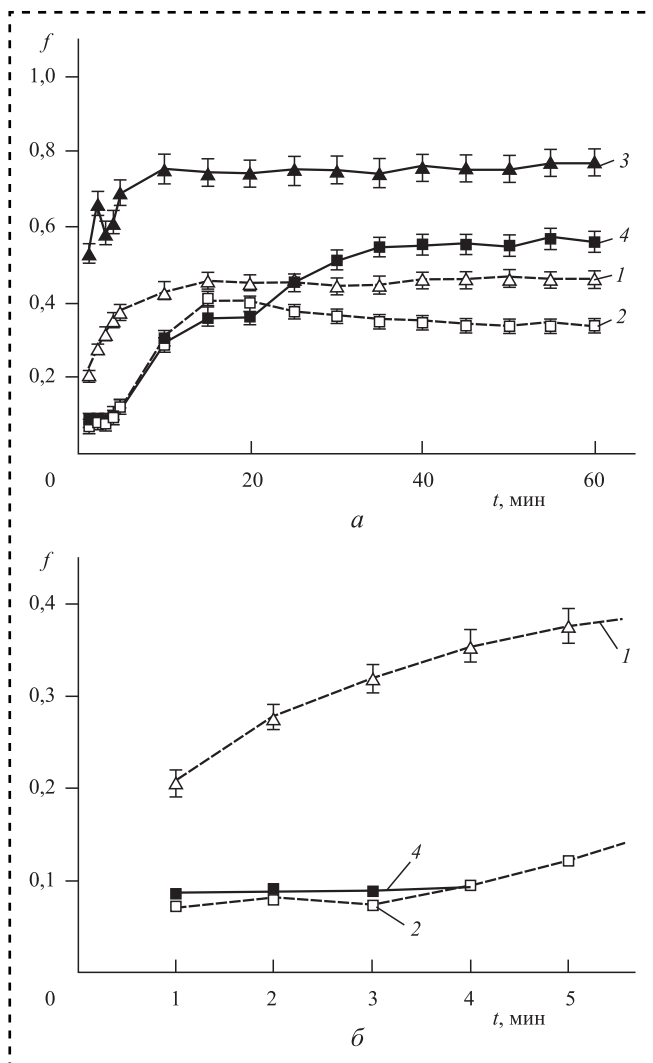


Рис. 4. Экспериментальный спектр КР исследованного покрытия *ta-C*



графитового катода в аргоне [20]. Они состоят из аморфной смеси областей с  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизацией атомов углерода, в которой доля  $sp^3$ -фазы составляет порядка 80...90 %.

Результаты трибологических испытаний покрытий без смазки и со смазкой ПАО-4 приведены на рис. 5. Для сравнения представлены также результаты испытаний образцов без покрытия. Коэффициент трения стальной поверхности без покрытия максимален при несмазанном контакте ( $f > 0,7$ ). При смазке поверхности ролика ПАО-4  $f$  снижается практически в два



**Рис. 5.** Зависимости коэффициента трения от длительности испытаний, полученные при испытаниях на машине трения КТ-2 по схеме "вращающийся шар — три торца роликов" образцов из стали ШХ15:

1 — одноименное сочетание; 2 — на рабочую поверхность ролика нанесено покрытие  $ta-C$  толщиной 1 мкм; 3 — трение без смазки; 4 — со смазкой ПАО-4; а — полный цикл испытаний; б — поведение коэффициента трения в первые 5 мин испытаний (представлено в увеличенном масштабе)

раза, но все еще достаточно высок. Нанесение покрытия  $ta-C$  меняет ситуацию существенным образом, особенно в начальном периоде испытаний (рис. 5, б), когда коэффициент трения пары "ШХ15 —  $ta-C$ /ШХ15" не превышает 0,1.

Коэффициент трения покрытия  $ta-C$  на торце стального ролика, измеренный на первом обороте шпинделя, составлял примерно 0,086 (при испытании без смазки) и 0,07 (при граничной смазке ПАО-4) и держался на этом уровне в течение первых четырех оборотов, затем начинал расти. При испытании со смазкой рост  $f$  носит монотонный характер, плавно повышается до примерно 0,4 на 15-й мин испытаний, а затем стабилизируется на уровне около 0,35, что несколько ниже, чем установившееся значение коэффициента трения для стальной поверхности, испытанной с ПАО-4 (рис. 5, а). Это, видимо, указывает на то, что поверхность с покрытием в результате его частичного разрушения становится более "металлической".

В случае образца с покрытием  $ta-C$ , испытываемого без смазки, начальное низкое значение коэффициента трения также сохраняется в течение некоторого времени, а затем начинает расти. До 15—20-й мин испытаний характер изменения  $f$  практически такой же, как у образца с покрытием, испытываемого со смазкой ПАО-4, однако затем трение вновь начинает расти, к 40-й мин достигая 0,56. Возможное объяснение такого поведения состоит в том, что поверхность пятна контакта к этому моменту в целом освобождается от покрытия, и трение происходит по поверхности стальной основы.

Низкий коэффициент трения в начале испытаний говорит о том, что само алмазоподобное покрытие имеет высокие антифрикционные свойства. В процессе испытаний несущая способность пленки  $ta-C$  снижается, и начинается обусловленный контактным взаимодействием процесс ее разрушения и отслаивания.

Микрофотографии пятен износа подтверждают сделанные предположения (рис. 6). Поверхность покрытий, испытанных без смазки, оказывается сильно повреждена по сравнению с покрытиями, испытанными в режиме граничной смазки, степень поврежденности которых существенно меньше, хотя и в этом случае на поверхности пятна контакта наблюдаются следы сильного износа и происходит локальное отслаивание участков покрытия, обусловленное высоким уровнем и/или их недостаточно высо-

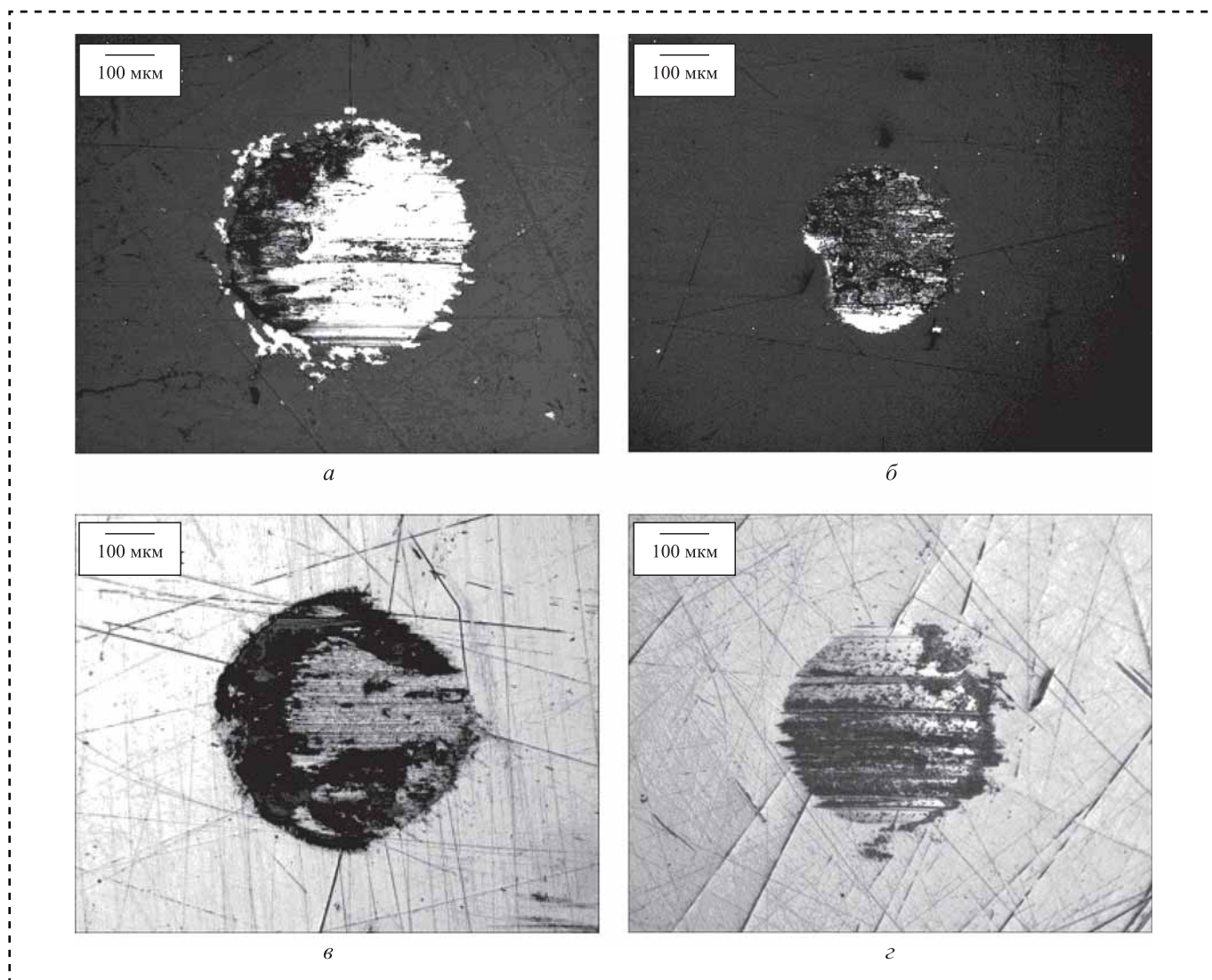


Рис. 6. Вид пятен износа, образовавшихся на поверхности стальных роликов с покрытием  $ta-C$  ( $a, b$ ) и без него ( $v, z$ ):  $a, v$  — при трении без смазки;  $b, z$  — со смазкой ПАО-4

кой адгезионной прочностью. Оценка уровня контактных давлений при испытаниях на машине КТ-2 показывает, что при вертикальном усилии  $P = 108$  Н нормальная нагрузка на пятне контакта, расположенном на торце стального ролика, составляет 44 Н, что соответствует герцевскому контактному давлению 1,7 ГПа. При столь высоких контактных давлениях возникают серьезные повреждения контактных поверхностей, особенно в условиях сухого трения.

Таким образом, снизив нагрузку в ходе испытаний, можно уменьшить контактные напряжения, тем самым, увеличив продолжительность периода работоспособности покрытий, проводя их испытания в менее "жестких" условиях. Увеличить работоспособность покрытий можно

также, улучшая их адгезию к материалу подложки путем нанесения промежуточных слоев. Еще одна возможность в конкретном случае алмазоподобных покрытий — их легирование [21].

### Выводы

1. Методом вакуумного плазменно-дугового распыления графитовой мишени в среде аргона получены алмазоподобные углеродные покрытия.

2. Комплексное исследование их структурного состояния показало, что они обладают структурой тетраэдрического аморфного углерода ( $ta-C$ , доля  $sp^3$ -фазы составляет порядка 80 %).



3. В результате проведенных трибологических испытаний в режиме сухого и граничного (ПАО-4) трения установлено, что коэффициент трения в процессе испытаний существенно меняется. В начале испытаний покрытие обладает высокими антифрикционными свойствами ( $f < 0,1$ , независимо от наличия или отсутствия смазочной среды), характерными для структуры  $ta-C$  [3], а затем по мере нарушения целостности и изнашивания слоя покрытия коэффициент трения повышается до установившихся значений, близких наблюдаемым для стальных поверхностей при их смазанном или несмазанном контакте соответственно.

4. Проведен анализ возможных способов увеличить длительность периода работоспособности полученных покрытий.

### Библиографический список

1. **Evolution** of  $sp^2$  bonding with deposition temperature in tetrahedral amorphous carbon studied by Raman spectroscopy / M. Chhowalla et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. No. 11. P. 1419–1421.
2. **Wear** and corrosion properties of diamond like carbon (DLC) coating on stainless steel, CoCrMo and  $Ti_6Al_4V$  substrates / T.F. Zhang, Q.Y. Deng et al. // Surf. Coat. Technol. 2015. Vol. 273. P. 12–19.
3. **Семенов А.П.** Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83–102.
4. **Microelectromechanical** Systems and Devices / T.S. Santra, T.K. Bhattacharyya, P. Patel et al. London: InTech Open. 2012. 480 p.
5. **Grill A.** Electrical and optical properties of diamond-like carbon // Thin Solid Films. 1999. Vol. 355–356. P. 189–193.
6. **Успехи** в синтезе и исследовании свойств карбина — третьей аллотропной модификации углерода / В.Г. Бабаев и др. // Поверхность. 2005. № 6. С. 100–112.
7. **Структурные** особенности углеродных материалов, синтезированных различными методами / О.А. Стрелецкий и др. // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 10. С. 2044–2049.
8. **Поли(нафталингидрокарбин):** синтез, изучение и применение для получения тонких алмазных пленок / Б.М. Булычев и др. // Изв. РАН. Сер. хим. 2010. Т. 9. С. 1678–1682.
9. **Oriented** carbyne layers / Yu.P. Kudryavtsev et al. // Carbon. 1992. Vol. 30. P. 213–221.
10. **Высокоориентированные** пленки  $sp^1$ -углерода / В.Г. Бабаев и др. // Поверхность. 2004. № 3. С. 16–27.
11. **Взаимодействие** эпитропных жидких кристаллов с поверхностью линейно-цепочечного углерода / В.А. Левченко и др. // Поверхность. 2005. № 10. С. 52–59.
12. **Углеродные** алмазоподобные покрытия деталей смазанных узлов трения / И.А. Буяновский и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 11. С. 14–26.
13. **Ориентационная** упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И.А. Буяновский и др. // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 4. С. 375–381.
14. **Влияние** энергии ионной стимуляции на удельное электросопротивление углеродных пленок, полученных методом импульсно-плазменного осаждения в атмосфере азота / И.А. Завидовский и др. // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. № 11. С. 2244–2248.
15. **Удельное** электросопротивление тонких углеродных пленок с различной долей  $sp$ -связей / И.А. Завидовский и др. // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 1. С. 149–154.
16. **Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербатов Ю.И.** Модернизация узла трения машины КТ-2 для оценки антифрикционных характеристик тонких покрытий при трении в режиме граничной смазки // Заводская лаборатория: Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 12. С. 65–68.
17. **Liu Y., Meletis E.I.** Evidence of graphitization of diamond-like carbon films during sliding wear // J. Mater. Sci. 1997. Vol. 32. P. 3491–3495.
18. **Ferrari A.C., Robertson J.** Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2004. Vol. 362. P. 2477–2512.
19. **Density**,  $sp^3$  fraction, and cross-sectional structure of amorphous carbon films determined by X-ray reflectivity and electron energy-loss spectroscopy / A.C. Ferrari et al. // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62. P. 11089–11103.
20. **Плазменный** синтез и РФЭС-аттестация тонкопленочных углеродных покрытий с заданной  $sp$ -гибридизацией / А.Ф. Зацепин и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 1. С. 94–98.
21. **Хрущов М.М.** Легированные алмазоподобные покрытия триботехнического назначения / под ред. Г.В. Москвитина // Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин. М.: ЛЕНАНД. 2013. С. 78–113.



**Ю.З. Житников**, д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),  
**А.А. Лошкарев** (АО "ВНИИ "Сигнал", г. Ковров)  
E-mail: kgta\_tms@mail.ru

## Обоснование угла окончательной затяжки резьбовых соединений гайковертами ударного действия с учетом потерь энергии в ударном механизме

*На основе математического описания процесса ударной затяжки резьбовых соединений с учетом комбинированного метода обеспечения и контроля точности затяжки обоснован угол окончательной затяжки с учетом потерь энергии в ударном механизме.*

*Based on the mathematical description of the process of impact tightening of threaded connections subject to combined method of maintenance and control accuracy torque angle is justified a final tightening with the energy loss in the shock mechanism.*

**Ключевые слова:** ударный гайковерт, предельные режимы работы, упругая деформация, кулачки бойка и наковальни, угол окончательной затяжки резьбовых соединений.

**Keywords:** impact wrench, limit operating modes, elastic deformation, hammer and anvil cams, angle of final tightening of threaded connections.

**В** гайковертах ударного действия, используемых в производстве для сборки одиночных резьбовых соединений, обеспечение и контроль затяжки осуществляется по моменту остановки вращения шпинделя, т.е. по моменту ударного импульса, передаваемого от бойка к наковальне, а следовательно, от точности и стабильности угловой скорости вращения бойка.

Погрешность затяжки данными гайковертами резьбовых соединений составляет 25...50 % от номинального значения. Такая точность затяжки в современном производстве неприемлема.

В одношпindelных гайковертах ударного действия за счет введения электромеханической системы обеспечения и контроля высокой точности затяжки резьбовых соединений с учетом комбинированного метода погрешность затяжки составляет не более 15 % от номинального значения момента [1, 7].

Комбинированный метод предусматривает:  
— на первом этапе (предварительная затяжка моментом 5...10 % от номинального значения) обеспечение и контроль затяжки — по моменту;

— на втором этапе (окончательная затяжка) обеспечение и контроль момента затяжки — по углу поворота резьбовой детали.

Точно определить угол окончательной затяжки сложно. Его находят либо экспериментально, либо по упрощенным формулам [7], но неточность угла при настройке на требуемый момент дает дополнительную погрешность затяжки резьбовых соединений.

Обоснуем угол окончательной затяжки резьбовых соединений с учетом потерь энергии при ударном взаимодействии кулачков бойка и наковальни.

Процесс ударного взаимодействия цилиндрических поверхностей кулачков бойка и наковальни можно описать на основе дифференциального уравнения вращательного движения в проекции на ось вращения [2]:

$$J_z \ddot{\phi} = \sum M_{J_z}^e, \quad (1)$$

где  $J_z$  — приведенный момент инерции вращающихся частей гайковерта от оси двигателя до оси вращения резьбовой детали;





$\ddot{\phi}$  — проекция углового ускорения на ось вращения;

$\sum M_{J_z}^e$  — проекция суммарного момента действующих сил относительно оси вращения.

Относительно оси вращения шпинделя действуют моменты:

$M_{уд}$  — момент силы от удара бойка о наковальню;

$M_{пр}$  — момент сопротивления вращению от предварительной затяжки резьбового соединения;

$M_{\phi}^c$  — момент силы вязкого трения в зависимости от угла поворота при окончательной затяжке резьбового соединения;

$M_{\phi}^c$  — момент силы вязкого трения в зависимости от скорости вращения при окончательной затяжке.

С учетом действующих сил дифференциальное уравнение примет вид:

$$J_z \ddot{\phi} = M_{уд} - M_{пр} - M_{\phi}^c - M_{\phi}^c. \quad (2)$$

Момент силы от удара взаимодействующих кулачков бойка и наковальни найдем на основе теоремы об изменении кинетической энергии [2]:

$$T_1 = T_0 = \sum A_J^e + \sum A_J^i, \quad (3)$$

где  $T_1, T_0$  — кинетическая энергия механической системы в конце и начале ударного взаимодействия;

$\sum A_J^e; \sum A_J^i$  — сумма работ внешних и внутренних сил.

Кинетическая энергия механической системы при вращении бойка до удара равна [2]:

$$T_0 = \frac{J_6 \omega_6^2}{2}, \quad (4)$$

где  $J_6$  — приведенный момент инерции элементов гайковерта от оси двигателя до оси бойка;

$\omega_6$  — угловая скорость вращения бойка в момент удара.

Сумму работ внутренних сил при упругом ударе взаимодействующих поверхностей бойка и наковален запишем:

$$\sum A_J^i = M_{см} \phi_{см}, \quad (5)$$

где  $M_{см}$  — момент силы от упругого смятия поверхностей бойка и наковальни;

$\phi_{см}$  — угол поворота бойка при упругом смятии поверхностей кулачков.

Силу упругого смятия взаимодействующих поверхностей находим из выражения [9]:

$$\sigma_{см} = \frac{F_{см}}{S_{см}} \leq [\sigma_{см}], \quad (6)$$

где  $\sigma_{см}, [\sigma_{см}]$  — действительное и допустимое напряжения;

$F_{см}$  — сила смятия;

$S_{см}$  — площадь смятия;

При взаимодействии цилиндрических поверхностей площадь смятия:

$$S_{см} = 2al, \quad (7)$$

где  $a$  — полуось контакта взаимодействующих поверхностей кулачков;

$l$  — длина взаимодействия кулачков.

С учетом равенства радиусов поверхностей кулачков полуось пятна контакта находим из выражения:

$$a = \sqrt{\frac{1,322 [\sigma_{см}] r (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}}, \quad (8)$$

где  $r$  — радиус цилиндрической поверхности кулачков бойка и наковальни;

$E_1, E_2$  — модули упругости материалов кулачков.

Угол поворота бойка при упругом ударе кулачков:

$$\phi_{см} = \frac{dy}{R}, \quad (9)$$

где  $R$  — средний радиус положения взаимодействующих поверхностей кулачков относительно оси;

$dy$  — величина упругой деформации [4]:

$$dy = r - \sqrt{r^2 - \frac{1,322 [\sigma_{см}] r (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}}. \quad (10)$$

С учетом выражений (6), (8)—(10) работу внутренних сил при упругой деформации кулачков можно представить:

$$A_J^i = [\sigma_{см}] 2lR \sqrt{\frac{1,322 [\sigma_{см}] r (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \times \frac{r - \sqrt{r^2 - \frac{1,322 [\sigma_{см}] r (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}}}{R}. \quad (11)$$





Сумма работ внешних сил, при условии, что учитывается только сила удара, а остальными силами из-за их малости можно пренебречь:

$$\sum A_j^i = M^{y9} \varphi, \quad (12)$$

где  $\varphi$  — угол поворота наковальни при ударе.

Подставим в выражение (3) кинетической энергии механической системы выражения (4), (11), (12) и после преобразования найдем момент удара при взаимодействии кулачков:

$$M^{y9} = \left[ \frac{J_6 \omega_6^2}{2} - [\sigma_{cm}] 2l \sqrt{\frac{1,322[\sigma_{cm}]r(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \right] \times \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{1,322[\sigma_{cm}]r(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \right) \frac{1}{\varphi}. \quad (13)$$

Момент предварительной затяжки резьбовых соединений:

$$M_{пр} = 0,1M_3, \quad (14)$$

где  $M_3$  — номинальное значение момента затяжки резьбового соединения.

Момент силы вязкого трения при затяжке в зависимости от угла поворота резьбовой детали и угловой скорости поворота резьбовой детали:

$$M_{\varphi}^c = b_1 \varphi; \quad (15)$$

$$M_{\dot{\varphi}}^c = b_2 \dot{\varphi}, \quad (16)$$

где  $b_1, b_2$  — коэффициенты вязкого трения в зависимости от угла поворота резьбовой детали и средней угловой скорости поворота резьбовой детали при затяжке.

Подставим в дифференциальное уравнение (2) выражения (13)—(16):

$$\ddot{\varphi} + \frac{b_2}{J_z} \dot{\varphi} + \frac{b_1}{J_z} \varphi - \frac{1}{J_z} \times \left[ \frac{J_6 \omega_6^2}{2} [\sigma_{cm}] 2l \sqrt{\frac{1,322[\sigma_{cm}]r(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \right] \times \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{1,322[\sigma_{cm}]r(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \right) \frac{1}{\varphi} = -\frac{0,1M_3}{J_z}. \quad (17)$$

Обозначим: коэффициент при  $\ddot{\varphi}$  —  $2n$ ; коэффициент при  $\dot{\varphi}$  —  $k^2$ ; коэффициент при  $\frac{1}{\varphi}$  —  $A$ ; выражение в правой части уравнения при  $\frac{1}{J_z}$  —  $B$ .

С учетом обозначений дифференциальное уравнение (17) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi - A\frac{1}{\varphi} = -\frac{1}{J_z}B. \quad (18)$$

Решение нелинейного дифференциального уравнения (18) можно найти численным методом при нулевых начальных условиях.

Дифференциальное уравнение окончательной затяжки резьбового соединения при первом ударе кулачков бойка и наковальни:

$$\ddot{\varphi}_1 + 2n\dot{\varphi}_1 + k^2\varphi_1 - A\frac{1}{\varphi_1} = -\frac{1}{J_z}B. \quad (19)$$

В результате решения этого уравнения находим угол поворота резьбовой детали при первом ударе окончательной затяжки.

Тогда при следующем ударе увеличится момент предварительной затяжки:

$$M_{пр2} = M_{пр} + M_{\varphi_1}, \quad (20)$$

где  $M_{\varphi_1}$  — увеличение момента за счет затяжки на угол  $\varphi_1$  [8],

$$M_{\varphi_1} = Q_1 r = \frac{\varphi_1 F_6 E_6 P}{2\pi l_6}, \quad (21)$$

где  $Q_1$  — увеличение осевой силы затяжки;

$F_6$  — площадь поперечного сечения резьбовой детали;

$E_6$  — модуль упругости материала резьбовой детали;

$P$  — шаг резьбы;

$l_6$  — длина растягиваемой части резьбовой детали.

Тогда дифференциальное уравнение затяжки резьбового соединения при втором ударе примет вид:

$$\ddot{\varphi}_2 + 2n\dot{\varphi}_2 + k^2\varphi_2 - A\frac{1}{\varphi_2} = -\frac{1}{J_z}(B + M_{\varphi_1}). \quad (22)$$



По аналогии дифференциальное уравнение затяжки при третьем ударе:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_3 + 2n\dot{\varphi}_3 + k^2\varphi_3 - A\frac{1}{\varphi_3} = \\ = -\frac{1}{J_z}(B + M_{\varphi_1} + M_{\varphi_2}), \end{aligned} \quad (23)$$

где  $M_{\varphi_2}$  — увеличение момента предварительной затяжки.

Для  $n$  удара дифференциальное уравнение запишем:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_n + 2n\dot{\varphi}_n + k^2\varphi_n - A\frac{1}{\varphi_n} = \\ = -\frac{1}{J_z}(B + M_{\varphi_1} + \dots + M_{\varphi_n}). \end{aligned} \quad (24)$$

Требуемое значение момента затяжки [8]:

$$M_3 = (B + M_{\varphi_1} + \dots + M_{\varphi_n}). \quad (25)$$

Находим требуемый угол окончательной затяжки резьбовых соединений:

$$\varphi_3 = \sum_{i=1}^n \varphi_i. \quad (26)$$

Следовательно, обоснованы математические выражения для определения требуемого угла окончательной затяжки гайковертами ударного действия с учетом потерь энергии в ударном механизме.

Экспериментальная проверка показала, что расхождение расчетных и экспериментальных значений углов составляет 12...14 %.

### Библиографический список

1. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 656 с.
2. **Бутенин Н.В., Луц Я.Л., Меркин Д.Г.** Курс теоретической механики. В 2 т. М.: Наука, 1979. 543 с.
3. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросов А.Е., Золотарева О.В.** Режимы вращения бойка при испытаниях и штатной работе одношпиндельных гайковертов ударного действия // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. Т. 19 № 7. С. 325—327.
4. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Динамика движения элементов механизмов при упругом и упругопластическом ударах о неподвижные и подвижные тела. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2014. 80 с.
5. **Демидов С.Н.** Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.
6. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.** Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
7. **Пат. 2480323** Российская Федерация, МПК<sup>8</sup> В25В21/02. Ударный гайковерт / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, Ю.Н. Матросова; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 4.
8. **Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В.** Затяжка и стопорение резьбовых соединений. М.: Машиностроение, 1985. 244 с.
9. **Феодосьев В.И.** Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.





И.М. Шандыбина, А.М. Макаров, М.П. Кухтик, канд-ты техн. наук,  
Д.К. Азарян, О.И. Мелашенко, С.А. Твердохлебов, С.С. Шагальдян, М.Д. Романенко  
(Волгоградский государственный технический университет)  
E-mail: amm34@mail.ru

## Разработка универсального весового дозатора с автоматическим управлением

*Разработан универсальный весовой дозатор с автоматическим управлением, который относится к области упаковочного оборудования и предназначен для взвешивания и дозирования пищевой или непищевой сыпучей продукции. Изучены существующие конструкции и проведен патентный поиск аналогов. Составлена кинематическая схема механизма и разработана конструкция дозирующего узла, структурная схема и алгоритм работы системы автоматического управления дозатором. Проведено моделирование и исследование конструкции устройства. Математически обоснован выбор оптимальных размеров устройства.*

*A general-service weighting batcher with automatic control, which is related to the field of packaging equipment and is intended for weighing and dosing of food or non-food bulk production, has been developed. The existing constructions have been studied and patent search of analogues has been carried out. The kinematic scheme of the mechanism has been drawn out on the basis of analysis of study subject analogues. The construction of the dosing unit, block diagram and operation algorithm of automatic control system of the batcher have been developed. Modeling and research of the device construction have been carried out. Choice of optimal dimensions of the device has been grounded mathematically.*

**Ключевые слова:** весовой дозатор, автоматическое управление, фасовка.

**Keywords:** weighting batcher, automatic control, prepacking.

### Введение

На современном этапе развития пищевой промышленности одна из основных проблем — повышение эффективности работы устройств автоматизированного дозирования и фасовки за счет увеличения точности фасовки.

Как показал проведенный патентный поиск, начиная с 1986 г. в конструкции дозирующих устройств не вносились глобальные конструктивные изменения [1—6].

Анализ существующих конструкций дозаторов с автоматическим управлением показал, что до настоящего времени главной целью российских разработчиков было повышение производительности, однако при этом снижалась точность дозирования фасовочных механизмов. Особенно наглядно это проявляется при фасовке в мелкую тару овощной продукции типа картофель.

При разработке конструкции универсального весового дозатора с автоматическим управлением актуальной задачей является удовлетворение критерию оптимальности — одновременное

увеличение эффективности производства и повышение точности фасовки [7, 8].

При разработке дозирующего устройства были поставлены и решены следующие задачи:

- изучение существующих конструкций;
- проведение патентного поиска аналогов;
- создание кинематической схемы механизма на основе анализа аналогов объекта исследования;
- разработка конструкции дозирующего узла;
- моделирование конструкции устройства;
- математическое обоснование выбора оптимальных размеров механизма;
- проведение экспериментальных исследований.

### Устройство и принцип действия весового дозатора

Проведенный анализ существующих конструкций и патентный обзор выявили наиболее близкие аналоги к предлагаемой конструкции для дозирования и расфасовки сыпучих

материалов [1–3]. Эти устройства состоят из таких узлов, как бункер с загрузочной воронкой, вибропитатель, снабженный приводной заслонкой, весовой узел. Весовой узел содержит весовую емкость с тензодатчиком, соединенным с приводом заслонки вибропитателя через управляющий блок обратной связи.

Основной недостаток аналогов — невозможность фасовки крупных предметов с высокой скоростью и производительностью. За прототип при разработке устройства взят комбинационный дозатор, содержащий вибропитатель, выполненный в виде системы радиальных вибротростков, предназначенных для подачи продукта в расположенные по окружности весовые модули, содержащие накопительные корзины, оборудованные тензодатчиками [5].

Прототип предназначен для работы только с сыпучими среднефракционными продуктами, т.е. он не способен дозировать мелкие и большие продукты, такие как картофель, морковь, яблоки и т.д.

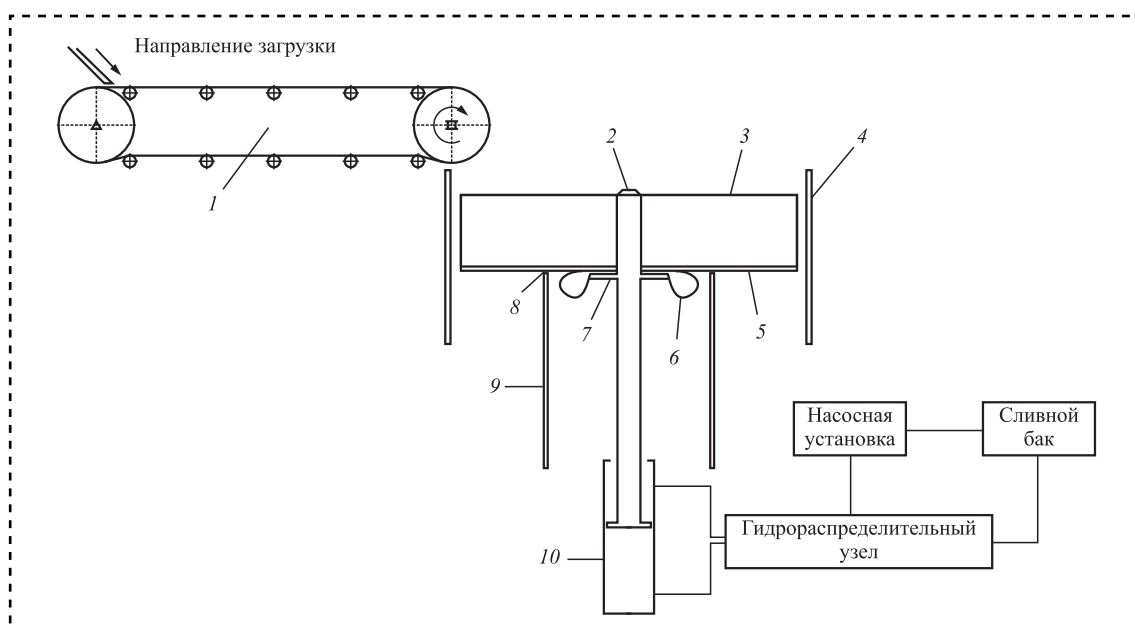
На основе анализа аналогов объекта исследования разработана кинематическая схема механизма (рис. 1).

На рис. 2 на стр. 4 обложки представлена 3D-модель разработанного универсального весового дозатора, в конструкции которого этот недостаток устранен [9, 10].

Дозатор состоит из корпуса 1 (на рис. 2 задняя стенка не показана), находящегося на несущей раме 2, блока управления 3, привода 4, штока 5, жестко соединенного с открывающим диском 6, ребер 7, подвижного диска 8, снабженного демпфирующим покрытием 9 (например, пищевая резина или силикон), разделенного на сектора, образующие восемь радиальных лотков 10, которые с помощью гибкого зацепления 11 связаны с открывающим диском 6. Грузоприемная рамка 12 через шарниры 13 соединена с подвижным диском 8 и приводится в движение с помощью вибродвигателя 14, при этом образуется угол для выгрузки продукта между поверхностью радиальных лотков 10 и осью горизонта. Датчик веса 15 установлен под каждым радиальным лотком 10 подвижного диска 8, а направляющие ребра 16 позволяют целенаправленно попасть продукту в тару. Привод 4 жестко соединен со штоком 5.

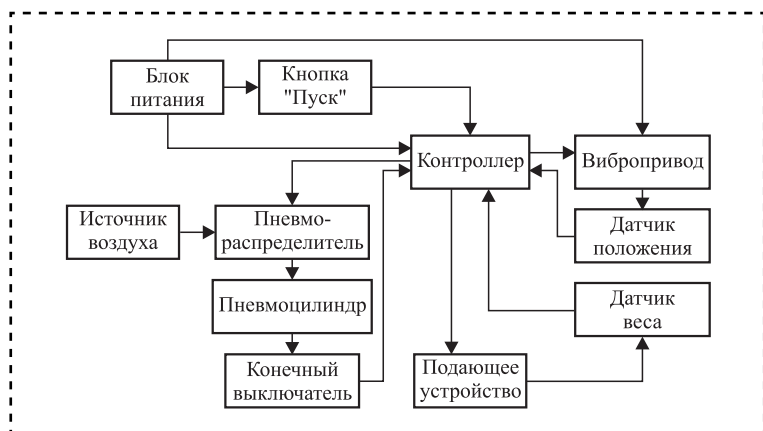
На рис. 3 представлена структурная схема системы автоматического управления дозатором.

Принцип действия весового универсального дозатора с автоматическим управлением заключается в следующем. Команда на начало загрузки поступает от внешнего управляющего устройства, например АСУ ТП, или от кнопки на выносном пульте управления. По мере достижения заданной массы датчик 15 посылает



**Рис. 1. Кинематическая схема механизма:**

1 — погрузочная лента; 2 — шток; 3 — подвижные стенки; 4 — стенки корпуса; 5 — "лепестки"; 6 — гибкое зацепление; 7 — открывающий диск; 8 — шарниры; 9 — вибрирующие опоры; 10 — гидропривод



**Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления дозатором**

сигнал на блок управления 3, который формирует команду на отключение механизмов загрузки.

Для равномерного распределения продукта по поверхности подвижного диска 8 блок управления 3 подает сигнал для включения вибродвигателя 14. После равномерного распределения продукта привод 4 поднимает шток 5 вместе с ребрами 7, тем самым разделяя всю массу на равные части. Поднимаясь вместе со штоком 5, открывающий диск 6 толкает радиальные лотки 10 подвижного диска 8, которые поворачиваются на шарнирах 13, создавая угол для выгрузки продукта.

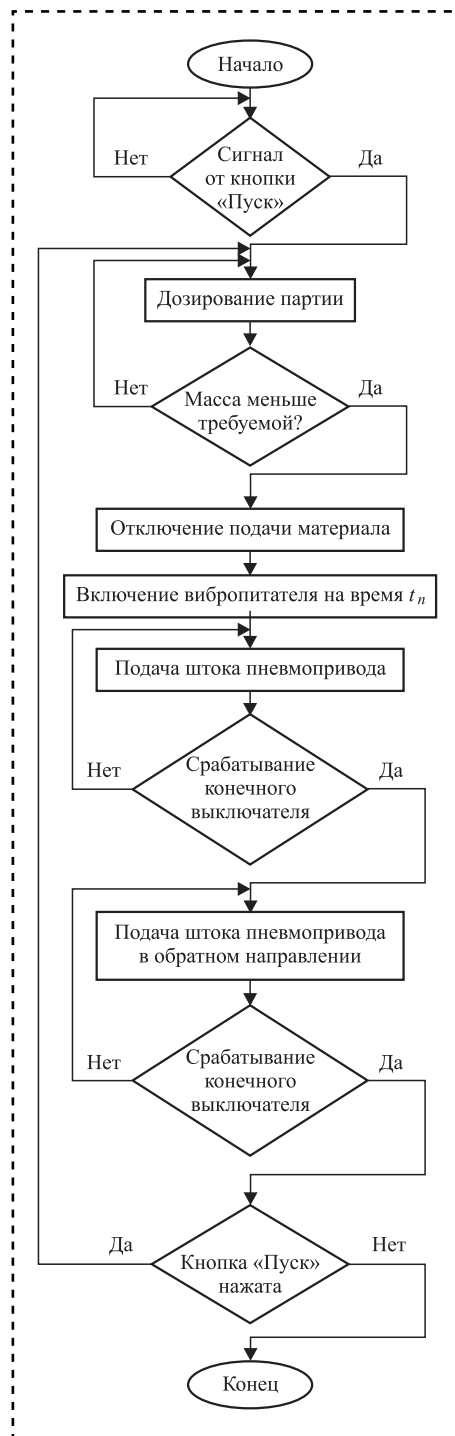
Для возвращения в исходное положение штока 5 и ребер 7 блок управления 3 формирует команду приводу 4, который опускает шток 5 и радиальные лотки 10 подвижного диска 8 с помощью гибкого зацепления 11. Новая загрузка начинается по сигналу от блока управления 3.

На рис. 4 представлен алгоритм работы системы автоматического управления дозатором.

Для реализации автоматической системы управления на основе сравнительного анализа подобраны необходимые комплектующие и написана управляющая программа для программируемого логического контроллера (ПЛК).

Привод дозатора реализован в двух вариантах. В первом случае в качестве привода может быть использован пневмоцилиндр двухстороннего действия, приводимый в движение источником сжатого воздуха и управляемый ПЛК через электропневмораспределитель. Преимущество этого типа привода — высокое быстродействие и высокий момент при перемещении, дозировании и распределении продукта. Во втором случае

может быть использован электропривод линейного действия (актуатор), управляемый ПЛК напрямую или через преобразователь. Преимущество данного варианта реализации — отсутствие необходимости наличия источника сжатого воздуха



**Рис. 4. Алгоритм работы системы автоматического управления дозатором**





и меньшая себестоимость эксплуатации дозирующего оборудования.

Технический результат предлагаемой конструкции — повышение точности дозирования мелких доз продукции. Он достигается тем, что весовой универсальный дозатор с автоматическим управлением состоит из несущей рамы, датчика веса, механизма выгрузки с приводом, блока управления, грузоприемной рамки, вибродвигателя, штока, гибкого зацепления, восьми радиальных лотков в виде секторов, расположенных на подвижном диске и установленных на шарнирах, причем подвижный диск снабжен демпфирующим покрытием.

С помощью вибродвигателя продукт равномерно распределяется по поверхности подвижного диска за счет вибрации и точность дозирования мелких доз продукции повышается. Деление равномерно распределенного продукта на одинаковые дозы обеспечивается подъемом подвесного диска штоком.

Наличие в конструкции гибкого зацепления способствует равномерному распределению продукта на поверхности подвижного диска в результате вибрации и, таким образом, повышает точность дозирования мелких доз продукции.

Установка восьми радиальных лотков в виде секторов, расположенных на подвижном диске и поворачивающихся на шарнирах, позволяет образовывать угол для выгрузки продукта между поверхностью радиального лотка и осью горизонта для того, чтобы, скатываясь по наклонной поверхности вдоль направляющих ребер, весь продукт целенаправленно попадал в тару.

Наличие в конструкции восьми радиальных лотков является оптимальным и обусловлено тем, что при задании большего числа радиальных лотков между их вертикально расположенными направляющими ребрами образуются острые углы, которые не позволяют заполнить объем радиального лотка, создавая в них нерабочую зону и снижая точность дозирования мелких доз, а при задании числа радиальных лотков меньше восьми снижается производительность по фасованным пакетам.

Снабжение подвижного диска демпфирующим покрытием позволяет увеличить время хранения фасованной продукции, так как у нее не будет образовываться при ударе о подвижный диск помятой и отбитой поверхно-

сти. В свою очередь демпфирующее покрытие уменьшит ударные нагрузки на датчик массы, что в целом увеличит срок службы установки и приведет к повышению точности дозирования мелких доз продукции.

Работа универсального весового дозатора с автоматическим управлением происходит в несколько этапов.

Первый этап. Устройство готово к загрузке: стенки вместе со штоком находятся на одном уровне с лепестками, создавая ровную площадку. После этого включаются вибрирующие опоры, распределяющие продукт по всей поверхности (рис. 5, *а* на стр. 4 обложки).

Второй этап. С помощью привода выдвигается шток со стенками, которые разделяют продукт на восемь равных частей (рис. 5, *б* на стр. 4 обложки).

Третий этап. Лепестки поднимаются относительно опорных элементов с помощью диска, прикрепленного к штоку, между стенкой корпуса и лепестками образуются зазоры, в которые продукт сыпается, попадая в восемь специальных контейнеров (рис. 5, *в* на стр. 4 обложки).

Технические характеристики устройства получены в ходе проведения расчетов и ситуационного моделирования.

Размеры элементов устройства:

- радиус подвижного диска 0,37 м;
- длина штока 0,8 м.

Предполагаемая производительность разработанного механизма составит около 3 т/ч, т.е. за 1 ч будет расфасовано примерно 1000 мешков готовой продукции.

Планируемая эффективность проекта возможна за счет:

- улучшения эксплуатационных свойств дозирующих устройств из-за предотвращения заклинивания;
- увеличения скорости дозирования;
- обеспечения равномерного распределения продукта по лоткам;
- повышения удобства при эксплуатации.

#### **Расчет оптимальных размеров подвижного диска**

Размер устройства может варьироваться в зависимости от того, какой продукт необходимо расфасовать. В качестве частного примера приведем расчет оптимальных размеров подвижного диска для фасовки картофеля.

Для того чтобы спроектировать этот механизм, проведен анализ объекта исследования (картофеля). Выборка объемом 100 единиц картофеля взвешена с точностью до грамма. Выполнен статистический анализ: выборка разбита на 9 интервалов и построена гистограмма распределения (рис. 6).

Найдены среднее арифметическое и выборочная дисперсия. На рис. 7 приведен полигон эмпирических значений 1 и теоретическое распределение 2, построенное на его основе. Выборка распределена по нормальному закону.

Используя критерий согласия Пирсона, выяснили, что выборка действительно распределена по нормальному закону с вероятностью 95 %. Масса средней картофелины составляет 192 г. Следовательно, можно использовать среднее арифметическое значение для дальнейшего проектирования.

Экспериментально определили, что в окружность  $r = 0,3$  м помещается 51 картофелина. Найдём, сколько картофелин в 24 000 г:

$$N = M/m_{\text{ср}} = 24\,000/192 = 125 \text{ шт.},$$

где  $m_{\text{ср}}$  — масса средней картофелины.

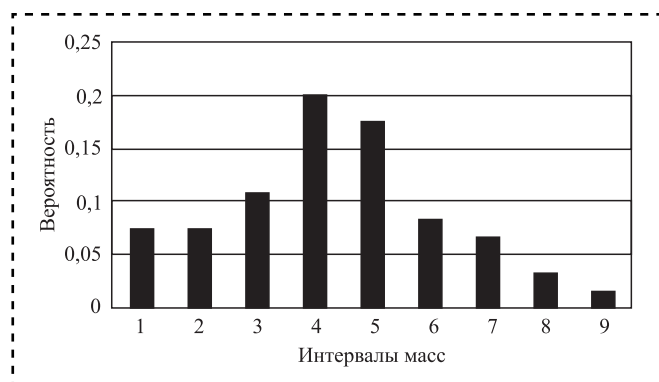


Рис. 6. Гистограмма распределения

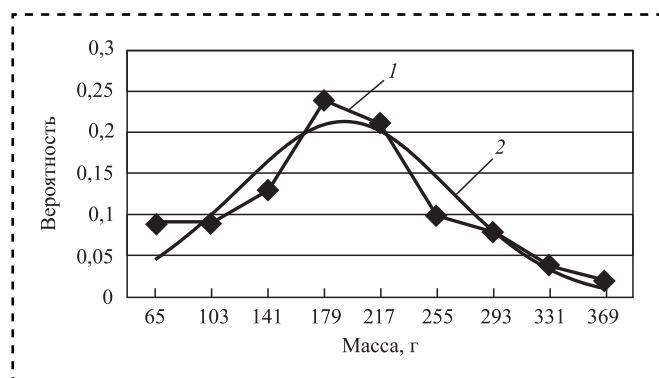


Рис. 7. Сравнение экспериментальных (1) и теоретических (2) значений

Определим радиус тары  $R_1$  (подвижного диска), необходимый для того, чтобы уложить 24 000 г картофеля в один слой:

$$R_1 = r \cdot 125/51 = 0,3 \cdot 125/51 = 0,735 \text{ м.}$$

Так как картофель будет уложен в два слоя, то

$$R_2 = R_1/2 = 0,735/2 \approx 0,37 \text{ м,}$$

где  $R_2$  — радиус тары (подвижного диска), в которой картофель уложен в два слоя.

## Выводы

Разработанное устройство пригодно для выполнения поставленных задач. Его применение позволит значительно повысить качество и точность фасовки.

Разработанный механизм отличается простотой конструкции и универсальностью. Это позволяет при минимальных затратах на доработку устройства использовать его для фасовки и упаковки предметов, которые по своей форме и конфигурации приближены к объекту исследования. Такое перепрофилирование разработанного автоматизированного дозатора позволит значительно расширить область его применения.

Потребителями результата проекта могут быть машиностроительные предприятия, занимающиеся разработкой, производством и эксплуатацией устройств, используемых для дозирования, фасовки и упаковки пищевых и непищевых продуктов. Проведенные виртуальные и натурные испытания опытного образца на базе кафедр "Автоматизация производственных процессов" и "Детали машин и подъемно-транспортные устройства" ВолгГТУ показали работоспособность дозатора.

## Библиографический список

1. А.с. 259688 СССР, МПК G01F11/24. Устройство для дозирования порошковых материалов / Г.В. Ратушенко, В.А. Генель, В.А. Семенов, О.В. Тарнавский, В.Н. Лужецкий; заявитель Центральная научно-исследовательская лаборатория реактивов. № 1249409/23-26; заявл. 13.06.1968; опубл. 12.12.1969.
2. А.с. 1706916 СССР, МПК B65B1/32. Устройство для дозирования и расфасовки сыпучих материалов / В.И. Шерстобитов, В.Н. Бычковский; заявитель производственное объединение "Компрессор". № 4766986/13; заявл. 11.12.1989; опубл. 23.01.1992.



3. Пат. 2435145 РФ, МПК G01G13/00. Взвешивающее устройство / Х.И. Хансен; патентообладатель Кабинплант Интернациональ А/С. № 2007136491/28; заявл. 03.03.2006; опубл. 27.11.2011.

4. Пат. 2163357 РФ, МПК G01G13/28. Весовой дозатор с автоматическим управлением / А.И. Белонов, Я.М. Хайкинсон; заявитель и патентообладатель ООО "Мировые технологии". № 99110794/28; заявл. 21.05.1999; опубл. 20.02.2001.

5. Пат. 60714 РФ, МПК G01F11/24. Весовой комбинационный дозатор / А.В. Гребенщиков; патентообладатель ООО ПКФ "Мульти-Пак". № 2006132184/22; заявл. 06.09.2006; опубл. 27.01.2007.

6. Пат. 96957 РФ, МПК G01G13/00. Весовой дозатор дискретного действия с автоматическим управлением / В.А. Меньшиков, В.К. Акимов, А.П. Воробьев; патентообладатель ООО "Авитек-Плюс". № 2010105301/22; заявл. 15.02.2010; опубл. 20.08.2010.

7. Мелашенко О.И., Твердохлебов С.А., Шагальдян С.С. Универсальное устройство для весового дозирования пищевых и непищевых продуктов // XXIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. / редкол.: А.В. Нарвоцкий (отв. ред.) [и др.]; Комитет образования, науки

и молодежной политики Волгоградской обл., Совет ректоров вузов Волгоградской обл., Волгоградский гос. техн. ун-т. Волгоград, 2019. С. 69.

8. Мелашенко О.И., Твердохлебов С.А., Шагальдян С.С., Шандыбина И.М. Весовой дозатор с автоматическим управлением для фасовки продуктов овальной формы // Юбилейная XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: сб. тр. конф. / отв. ред.: Н.А. Татусь; Российская Академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, РФФИ, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). М., 2019. С. 628–631.

9. П. м. 195251 РФ, МПК G01G13/00. Дозатор весовой универсальный с автоматическим управлением / Д.К. Азарян, О.И. Мелашенко, С.А. Твердохлебов и др.; патентообладатель ВолгГТУ. № 2019122480; заявл. 17.07.2019; опубл. 21.01.2020.

10. П. м. 186286 РФ, МПК G01G13/00. Дозатор весовой универсальный с автоматическим управлением / Д.К. Азарян, О.И. Мелашенко, С.А. Твердохлебов и др.; патентообладатель ВолгГТУ. № 2018131739; заявл. 03.09.2018; опубл. 15.01.2019.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



## СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

# СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 658.527.011

DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-11-522-527

А.А. Иванов, О.В. Кретинин, д-ра техн. наук  
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)  
E-mail: kretinin@list.ru

## Сборка кабин и кузовов автомобилей на основе технологии контактной сварки

*Рассмотрены технологии контактной сварки при организационной форме подвижной сборки на основе тактового конвейера с автоматизированными рабочими местами и автоматическими сборочными постами.  
The technologies of contact welding in the predominant organizational form of mobile assembly based on a clock conveyor with automated workstations and automatic assembly stations are considered.*

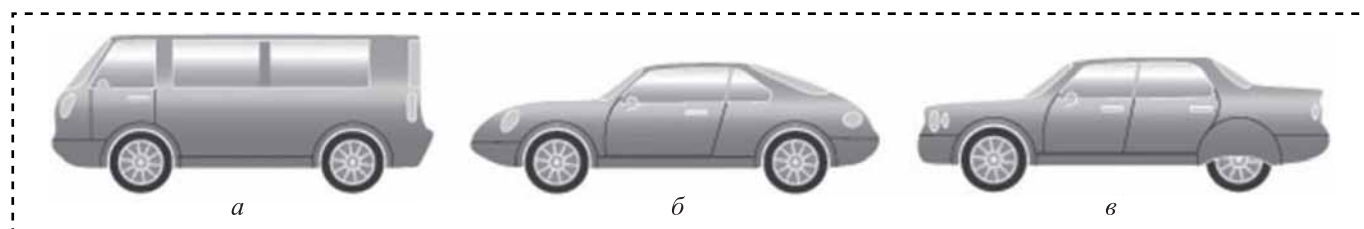
**Ключевые слова:** подвижная сборка, тактовый конвейер, автоматизированное рабочее место, автоматический сборочный пост.

**Keywords:** mobile assembly, clock conveyor, automated workplace, automatic assembly post.

Сборка кузовов и кабин автомобилей осуществляется сваркой узлов из тонколистовой стали (0,6 мм). К кузовам относятся емкости легковых автомобилей и автобусов, например пассажирских "ГАЗелей" (рис. 1). Для водителей

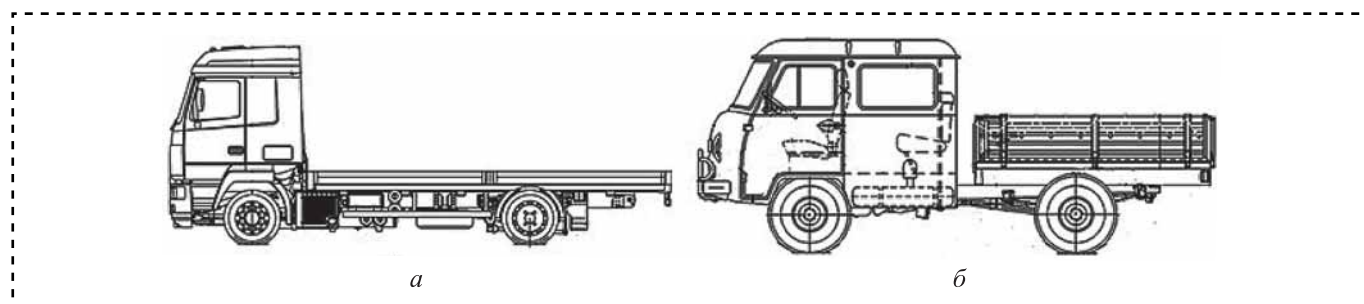
грузовых автомобилей предусматривают кабину одно- или двухрядную со спальным местом для второго водителя (рис. 2).

В настоящее время в массовом производстве сборку в основном ведут на основе технологии



**Рис. 1. Типы кузовов:**

*a* — пассажирская "ГАЗель"; *б* — легковой автомобиль с 2-объемным кузовом; *в* — легковой автомобиль с 3-объемным кузовом (отдельные емкости для двигателя, людей и груза)



**Рис. 2. Типы кабин грузовых автомобилей:**

*a* — однорядная; *б* — двухрядная





контактной сварки, при этом преобладает организационная форма подвижной сборки на основе тактового конвейера с автоматизированными рабочими местами (АРМ) и автоматическими сборочными постами (АСП). На АРМ выполняются ручные операции по загрузке деталей кузова в магазины-накопители сборочной линии (СЛ) и некоторые операции ручной сварки в труднодоступных местах кузова.

Автоматические сборочные посты СЛ могут быть двух типов: на базе перепрограммируемого сварочного робота (СвР) и на базе специализированной многоэлектродной сварочной машины (МСМ). На СЛ смешанного типа используют комбинации АСП (с МСМ и СвР). МСМ более производительны и экономически оправданы при годовой программе выпуска 150...300 тыс. автомобилей и малом числе модификаций кузовов (2—3). АСП на базе СвР является гибкой ячейкой, включающей от одного до четырех роботов фирмы KUKA Roboter (Германия). Наличие гибких АСП на СЛ позволяет работать как в режиме "хаотической" сборки, когда на конвейере собираются все плановые модификации кузовов, так и в режиме последовательной сборки (сборка партии кузовов одной модификации, затем другой и т.д.).

Структурно производство кабин и кузовов представляет собой сборочные цеха, включающие комплект линий узловой сборки и линии финишной сборки кузова. Типовой технологический процесс сборки-сварки кузова состоит из следующих операций:

- 1) загрузка деталей узла в сварочный кондуктор;
- 2) совмещение и фиксация деталей в кондукторе (формирование геометрии узла);
- 3) прихватка деталей в целях сохранения геометрии узла при транспортировке;
- 4) транспортировка узла на операцию сварки;
- 5) установка и фиксация узла;
- 6) сварка узла;
- 7) доварка в трудно доступных местах;
- 8) съем готового изделия с кондуктора.

Рассмотрим наиболее характерные структуры участков и линий сборки кабин и кузовов основных моделей отечественных автомобилей на базе технологии контактной сварки. Структура линий сборки-сварки семейства цельно-металлических кузовов "ГАЗелей" и "Соболей" базируется на типовых сварочных ячейках с набором унифицированных узлов. Типовые ячей-

ки линий сборки-сварки кузовов автомобилей ГАЗ включают: сварочный робот, спутниковый вертикально-замкнутый конвейер, транспортно-загрузочный подвесной манипулятор, поворотный стол с тележкой и поворотный стол-спутник (рис. 3).

Роботизированный пост автоматизированной линии сборки-сварки кузовов легковых автомобилей показан на рис. 4.

Основные характеристики сварочного робота (типы 161/60, ПР601/60, IR600 и т.д.): число степеней подвижности — 6; рабочая зона — сфера радиусом 1,5...3,5 м; грузоподъемность — 60 кг; скорость линейного перемещения — до 1,5 м/с; метод программирования — обучение.

Грузоподъемность конвейера — 1 т, точность позиционирования  $\pm 0,5$  мм, габаритные размеры спутника —  $5 \times 2$  м. Время выстоя  $t_b$  конвейера (и, следовательно, время такта  $t_r$ ) устанавливаются в зависимости от числа точек сварки  $n$  и тактового времени  $t_{т.св}$  на одну сварочную точку:

$$t_b = nt_{т.св}$$

Номенклатура линий сборочного цеха:

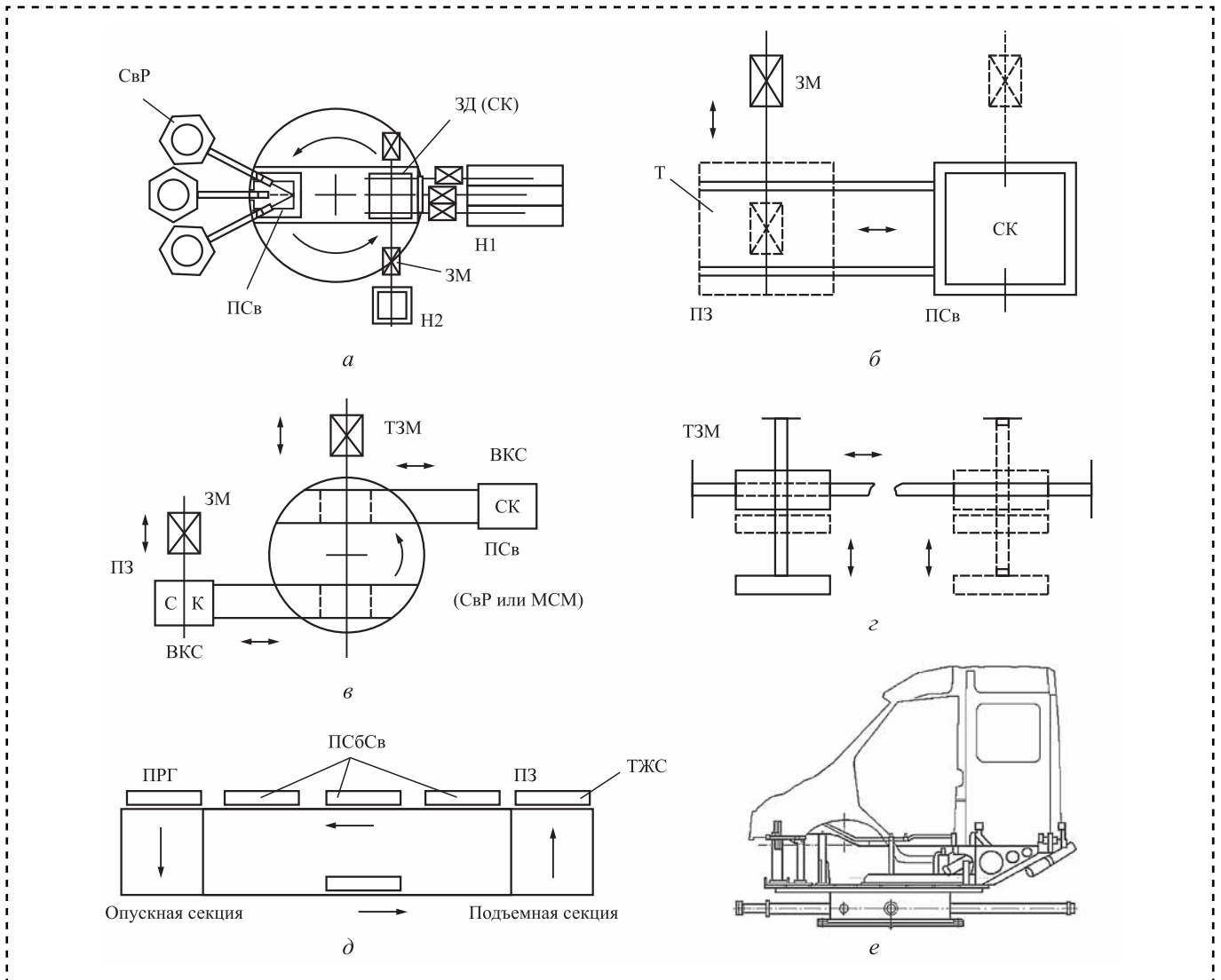
- СЛ левой боковины (18 роботов ПР601);
- СЛ правой боковины (16 роботов ПР601);
- СЛ основания "Соболь";
- СЛ крыши "Соболь";
- СЛ кузова "Соболь" (две параллельных линии);
- СЛ переднего пола "ГАЗель" (рис. 5);
- СЛ основания "ГАЗель" (из 19 позиций 6 механизированных);
- СЛ крыши "ГАЗель";
- СЛ кузова "ГАЗель".

Производительность линий — 15 изделий/ч при коэффициенте использования линии  $\eta = 0,8$ .

Структура линий сборки-сварки кузовов семейства легковых автомобилей ГАЗ в принципе аналогична структуре линий сборки кузовов "ГАЗелей". В цехе сборки кузовов функционирует СЛ сборки-сварки основания, состоящая из трех ветвей: первая ветвь — сборка переднего пола; вторая ветвь — сборка заднего пола; третья ветвь — сборка основания в целом (рис. 6). Производительность линии — 29 оснований/ч.

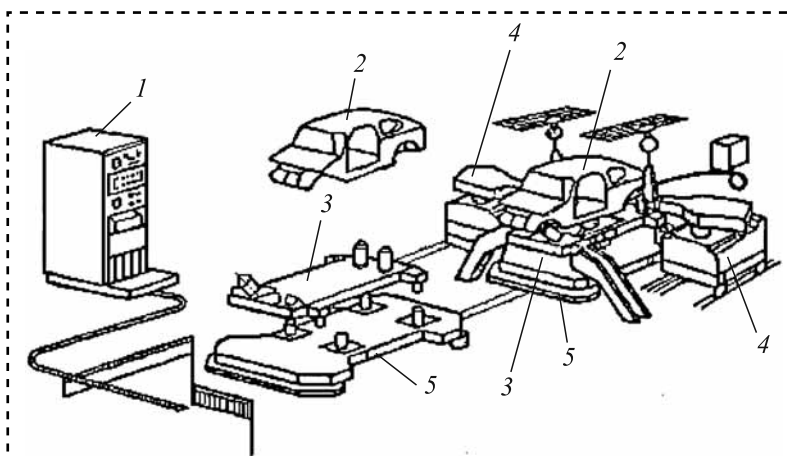
Технические требования к точечной контактной сварке: сила смыкания электродов — 2250 Н; время сварки — 0,16 с; ток сварочного импульса — 10,5 кА; ударное давление электро-





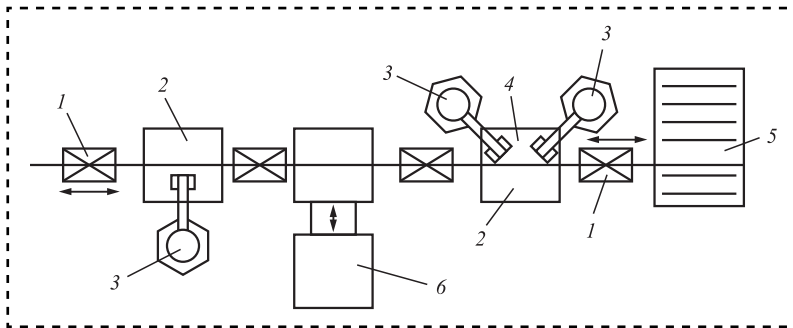
**Рис. 3. Схемы основных устройств транспортной системы линии сборки-сварки кузовов:**

*a* — поворотный стол; *б* — выкатная тележка; *в* — поворотно-выкатной стол; *г* — подвесной транспортно-загрузочный манипулятор (ТЗМ); *д* — вертикально-замкнутый конвейер; СвР — сварочный робот; ЗД — загрузка деталей в сварочный кондуктор (СК); Н1, Н2 — накопители конвейерного и стеллажного типа; ЗМ — загрузочный манипулятор; ПСв — позиция сварки; Т — тележка; ПЗ — позиция загрузки; ВКС — выкатной стол; ПРГ — позиция разгрузки; ТЖС — тележка спутника; ПСбСв — позиция сборки-сварки; *e* — спутник для линии сборки-сварки кабин автомобилей семейства "ГАЗелей и "Валдая"



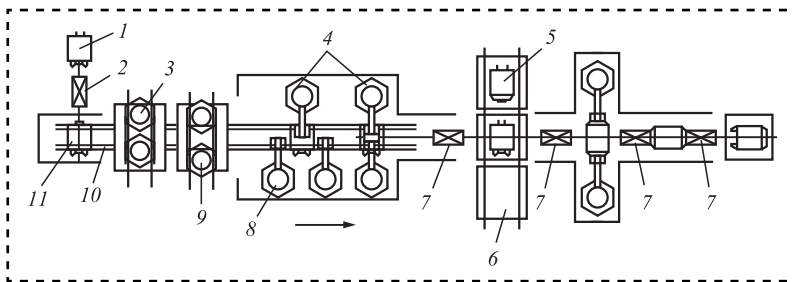
**Рис. 4. Роботизированный пост линии сборки-сварки кузовов легковых автомобилей:**

*1* — система управления; *2* — кузов; *3* — спутник; *4* — сварочный робот; *5* — транспортный робот



**Рис. 5. Схема линии сборки-сварки переднего пола кузова "ГАЗель" (ГАЗ-2705) (аналогична СЛ каркаса основания):**

1 — подвесной транспортный робот; 2, 3 — сварочный кондуктор и робот; 4 — роботизированный комплекс (РТК) сварки; 5 — накопитель; 6 — позиция загрузки



**Рис. 6. Линия сборки-сварки основания кузова легковых автомобилей ГАЗ:**

1 — АРМ прихватки; 2, 3 — загрузочный и подвесной роботы; 4, 9 — РТК с напольным и подвесным сварочным роботом 8; 5 — выкатная тележка; 6 — позиция загрузки передка; 7 — подвесной транспортный робот; 10 — грейферная транспортная система; 11 — позиция загрузки

дов —  $5 \text{ кг/мм}^2$ ; диаметр контактной поверхности электрода —  $5 \text{ мм}$ ; температура нагрева рабочей поверхности электрода при сварке —  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ; материал электрода — бронза; стойкость электродов —  $20\ 000$  сварок.

Примеры сварочного оборудования представлены на рис. 7.

### Приварка боковин к основанию кузова "ГАЗели"

Сборочный модуль приварки левых и правых боковин к основанию кабины "ГАЗели" в составе линии сборки-сварки содержит: накопители левых и правых боковин 1; накопитель 2 сменных захватов загрузочного робота 9; сварочные роботы 3 фирмы KUKA Roboter; сварочные кондукторы 4 и 5 для фиксации левой и правой боковин; загрузочный робот 6 для правой боковины; спутник 7 с основанием кабины; подвижный загрузочный робот 9 для обеих боковин; транспортную систему 8 для перемещения спутников; направ-

ляющие 10 для перемещения загрузочного робота 9 в зоне накопителей 1 и 2 (рис. 8).

Загрузочный робот 9 снабжен вращающейся муфтой для крепления сменных захватов, и поэтому может брать как левые, так и правые боковины. Правые боковины робот 9 передает роботу 6, который загружает их в сварочный кондуктор 5. Затем робот 9 возвращается в исходное положение, меняет захваты, берет из накопителя левую боковину и загружает ее в сварочный кондуктор 4. Кондукторы с боковинами сходятся и фиксируют их относительно основания кабины на спутнике, после чего начинается сварка. Когда сварочные роботы 3 пройдут все точки сварки на кабине, кондукторы расходятся, спутник с кабиной перемещается на следующую позицию для доварки. Время цикла составляет  $T_{ц} = 115,5 \text{ с}$ .

Подвижный сварочный кондуктор (каретка) с узлами фиксации боковин на операциях сварки кабин представляет собой сложную конструкцию, которая в значительной мере унифицирована для сборочных единиц кабин всего семейства "ГАЗелей" (рис. 9).

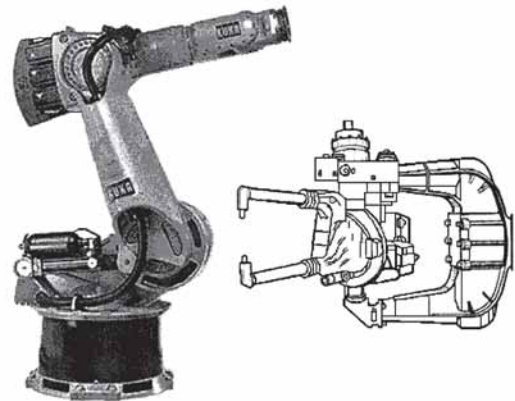
### Приварка крыши к боковинам кузова "ГАЗели"

Сборочный модуль приварки крыши к боковинам кузова "ГАЗели" и "Валдая", а также кабины грузовых автомобилей в составе линии сборки-сварки (например, "ГАЗель" с двухрядной сдвоенной кабиной) содержит: сварочные роботы 1 фирмы KUKA Roboter; спутник 2 с основанием и боковинами в позиции установки крыши; тактовый конвейер 3 сборочной линии; спутник 4 с приваренной крышей; загрузочный робот 5 для установки крыши; накопители крыш 6 для кабин моделей ГАЗ-33023 (двухрядная), ГАЗ-33104 "Валдай" и ГАЗ-3302 "ГАЗель" (рис. 10). Сборка кузова проводится в спутнике на линии с тактовым цепным конвейером. Время цикла составляет  $T_{ц} = 95 \text{ с}$ .

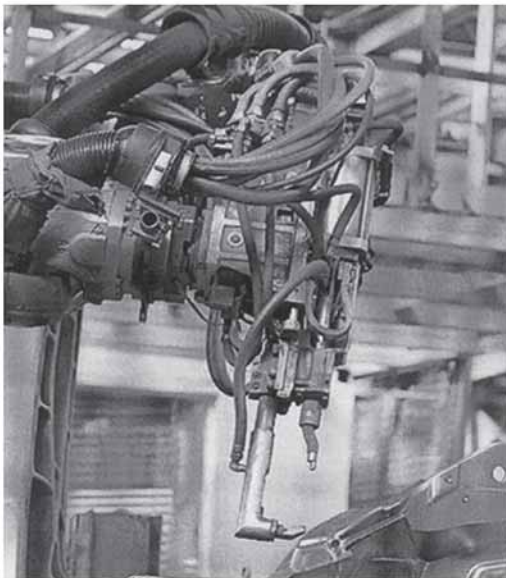
Робот для монтажа крыши оснащен вакуумным поддерживающим захватом (рис. 11).



а



б



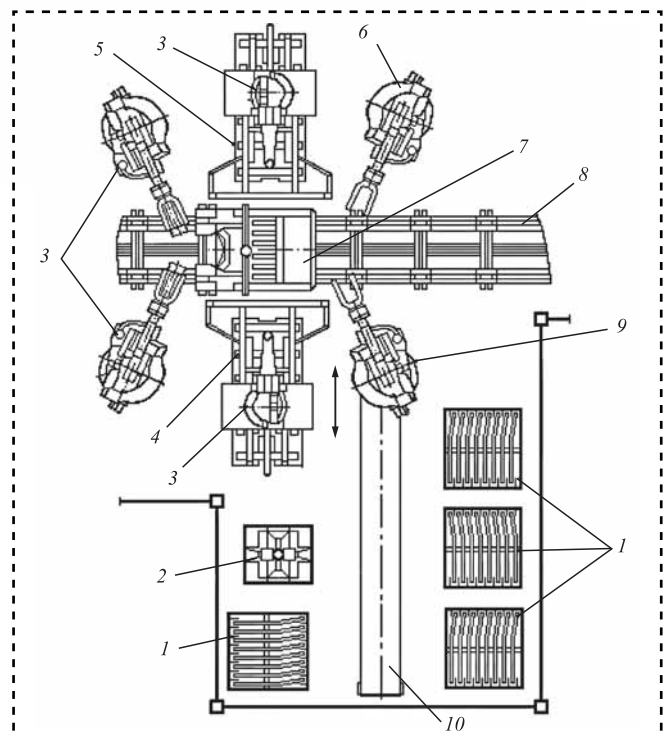
в

**Рис. 7. Примеры сварочного оборудования:**

а — роботизированный цех сборки кузова автомобиля Tesla; б — внешний вид сварочного робота KR-200 фирмы KUKA Robotec (сварочные клещи сняты); в — подвесной сварочный робот со штоковыми клещами для контактной точечной сварки кабин "ГАЗели" и "Валдая"

**Рис. 8. Сборочный модуль для приварки левых и правых боковин к основанию кабины автомобилей "ГАЗель", "Валдай" и "ГАЗель" (со двоянной кабиной):**

1 — накопители левых и правых боковин; 2 — накопитель сменных захватов подвижного загрузочного робота 9; 3 — четыре сварочных робота (2 в составе сварочных кондукторов); 4 — сварочный кондуктор для левых боковин; 5 — сварочный кондуктор для правых боковин; 6 — робот для загрузки в сварочный кондуктор правых боковин; 7 — спутник с основанием кабины; 8 — тактовый конвейер; 9 — подвижный робот для загрузки в сварочный кондуктор левых боковин и передачи роботу 6 правых боковин; 10 — рельсовый путь для перемещения загрузочного робота 9



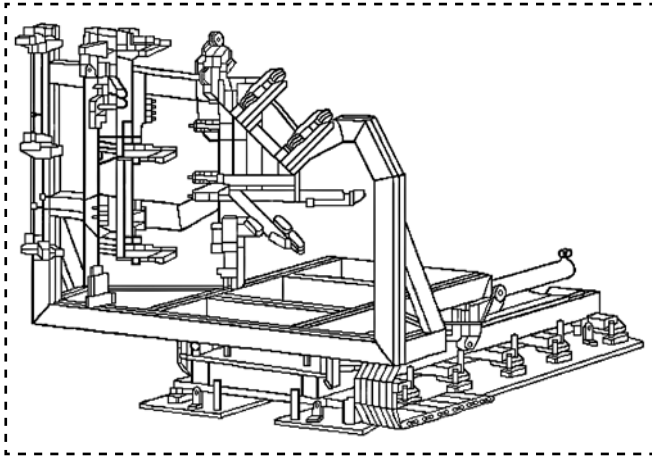


Рис. 9. Подвижный сварочный кондуктор (каретка) с узлами фиксации боковин на операциях сварки кабин автомобилей семейства "ГАЗелей"

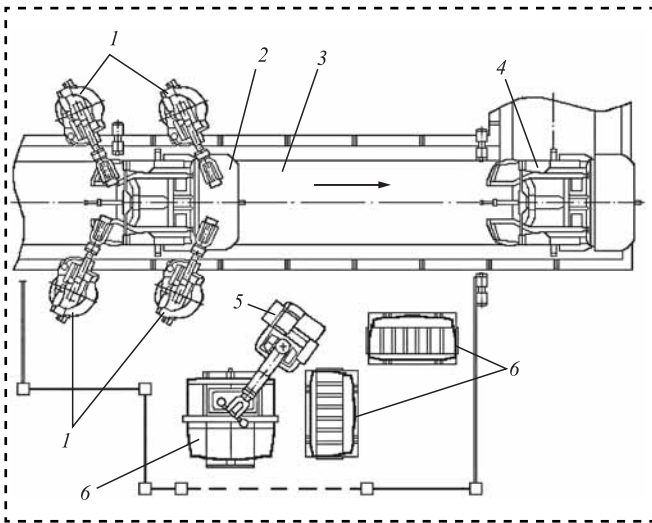


Рис. 10. Сборочный модуль приварки крыши к боковинам кузова "ГАЗели" и "Валдая" в составе линии сборки-сварки кабин:

1 — четыре сварочных робота; 2 — спутник; 3 — тактовый конвейер; 4 — спутник с приваренной крышей; 5 — загрузочный робот; 6 — накопители крыш

## Вывод

В массовом производстве при сборке на основе технологии контактной сварки преобладает организационная форма подвижной сборки на основе тактового конвейера с автоматизированными рабочими местами (АРМ) и автоматическими сборочными постами (АСП). На АРМ выполняются ручные операции по загрузке де-

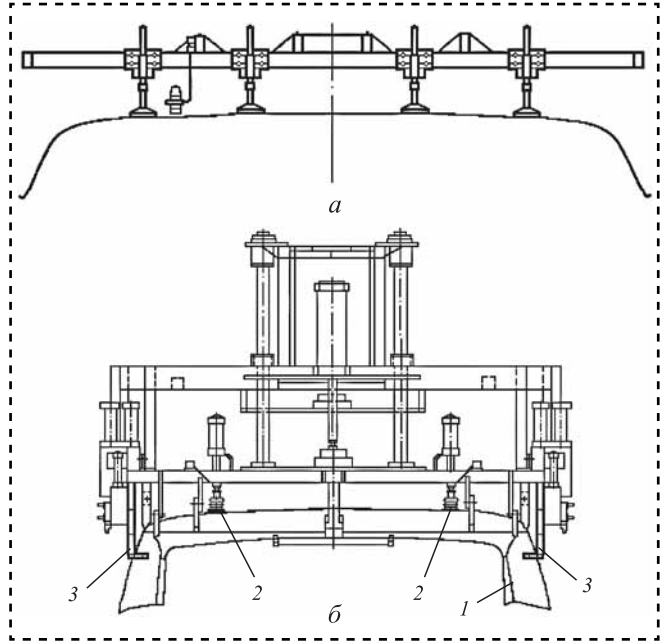


Рис. 11. Схема размещения присосок вакуумного захвата по ширине крыши кабины автомобиля "ГАЗель" (а) и конструкция поддерживающего вакуумного захвата загрузочного робота для крыши кабины автомобиля "ГАЗель" (б): 1 — крыша; 2 — присоска; 3 — поддерживающий уголок

талей кузова в магазины-накопители сборочной линии (СЛ) и некоторые операции ручной сварки в труднодоступных местах кузова.

Наличие гибких АСП на СЛ позволяет работать как в режиме "хаотической" сборки, когда на конвейере собирают все плановые модификации кузовов, так и в режиме последовательной сборки (сборка партии кузовов одной модификации, затем другой и т.д.). Структурно производство кабин и кузовов представляет собой сборочные цеха, включающие комплект линий узловой сборки и линии финишной сборки кузова.

## Библиографический список

1. Иванов А.А. Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки: учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
2. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: ФОРУМ, 2012. 336 с.
3. Иванов А.А. Проектирование систем автоматизированного машиностроения: учебник. М.: ФОРУМ, 2013. 298 с.





16-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА

**ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ –**  
ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

**MetrolExpo'2020**

**1–3 декабря**  
Москва, ВДНХ, пав. 55



Новый гибридный формат выставки  
офлайн + онлайн



**Стирает границы**

неограниченное количество участников со всего мира



**Увеличивает охват**

использование искусственного интеллекта для формирования рекомендаций и нетворкинга



**Упрощает коммуникации**

благодаря современным IT-технологиям



ДОСТУПНО В  
**Google Play**



Available on the  
**App Store**

Платформа представлена в связке классических веб-страниц и приложения для iOS и Android.

**ОРГАНИЗАТОР:**

Выставочная компания «ВЭСТСТРОЙ ЭКСПО»

Телефон/Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)

E-mail: metrol@expoprom.ru



**www.metrol.expoprom.ru**

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sboraka@mashin.ru](mailto:sboraka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.

Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 23.09.2020. Подписано в печать 16.10.2020. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз". Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.