

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 8 (128)  
август  
2015

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**  
д.т.н., проф.  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

д.т.н., проф., заслуженный  
деятель науки и техники РФ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**

д.ф.-м.н., проф.  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

д.т.н., проф.  
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д.т.н., проф.  
А.В. КИРИЧЕК

д.т.н., проф.  
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

**Редакция:**

И.Н. МЫМРИНА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.

Факс: (499) 269-48-97.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации  
ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

## СОДЕРЖАНИЕ



### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Бабичев А.П., Мотренко П.Д.** Вибрационные технологии в машиностроении: опыт применения и перспективы развития.....3

**Прокопец Г.А., Прокопец А.А.** Система показателей оценки надежности технологического процесса вибрационной обработки деталей.....5



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Берберов С.А., Берберова Н.И., Кешишьян К.С.** Повышение качества шлицевых отверстий в термообработанных деталях дорнованием.....10

**Попов М.Е.** Устойчивость процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей прецизионными методами ППД.....14

**Тамаркин М.А., Казаков Д.В., Шведова А.С., Гребенкин Р.В.** Повышение надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования.....23



### ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

**Анкудимов Ю.П., Чаава М.М., Чернега Ю.Г.** Применение комплексного энергетического воздействия для модифицирования поверхностного слоя стальных деталей методом вибрационной обработки.....28

**Лебедев В.А., Иванов В.В., Штынь С.Ю., Давыдова И.В.** Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности.....34



### ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

**Мельников А.С., Тищенко Э.Э.** Технологическое обеспечение требуемой точности детали.....40

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 8 (128)  
August  
2015

Since 2005, January

**Editor-in-Chief**

Dr. of Eng. Sci.  
Yu.V. PANFILOV

**Chair of Editorial Council**

Dr. of Eng. Sci., The honoured  
worker of a science and  
technics of the RF  
V.F. BEZYAZHCHNYI

**Editorial Assistant**

Dr. of Phys.-Math. Sci.  
V.Yu. FOMINSKY

**Chairman Assistants:**

Dr. of Eng. Sci.  
V.Yu. BLUMENSTEIN  
Dr. of Eng. Sci.  
A.V. KIRICHEK  
Dr. of Eng. Sci.  
O.V. CHUDINA

**Editorial council:**

Yu.P. ANKUDIMOV  
A.P. BABICHEV  
V.P. BALKOV  
V.M. BASHKOV  
A.I. BELIKOV  
A.I. BOLDYREV  
S.N. GRIGORIEV  
V.A. ZEMSKOV  
S.A. KLIMENKO  
Yu.R. KOPYLOV  
V.A. LASHKO  
V.A. LEBEDEV  
V.V. LYUBIMOV  
E.D. MAKARENKO  
B.Ya. MOKRITSKY  
F.I. PANTELEENKO  
H.M. RAHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.A. SHULOV  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
G.A. SUHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
M.L. KHEIFETS

**Edition:**

I.N. MYMRINA  
T.V. PARAYSKAYA

## CONTENTS

➔	<b>GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING</b>	
	<b>Babichev A.P., Motrenko P.D.</b> Vibration engineering technologies: experience in the application and development prospects .....	3
	<b>Prokopets G.A., Prokopets A.A.</b> Indicator evaluation reliability system for the process of vibration processing details .....	5
➔	<b>MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING</b>	
	<b>Berberov S.A., Berberova N.I., Keshishian C.S.</b> Improving the quality of slotted holes in heat-treated parts by burnishing .....	10
	<b>Popov M.E.</b> The sustainability process finishing-strengthening processing with precision methods SPD .....	14
	<b>Tamarkin M.A., Kazakov D.V., Shvedova A.S., Grebenkin R.V.</b> The reliability of technological processes of processing of details by the dynamic method of surface plastic deformation.....	23
➔	<b>PROCESSING BY COMBINED METHODS</b>	
	<b>Ankudimov Yu.P., Chaava M.M., Chernega Yu.G.</b> Application of the complex power influence for the modification of the surface layer of steel details by vibromechanical treatment .....	28
	<b>Lebedev V.A., Ivanov V.V., Shtun S.Yu., Davydova I.V.</b> Energy condition for the formation of vibration mechanochemical coatings and assessment of their adhesive strength .....	34
➔	<b>INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE</b>	
	<b>Melnikov A.S., Tishchenko E.E.</b> Technological support of the demanded detail accuracy .....	40

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" 85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta Rossii" 60252) or in publishing office.  
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.  
Fax: (499) 269-48-97  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry Tele- and Broadcasting of Mass Communications Media. The certificate of registration ПИ № 77-17733, March 9, 2004

Reprint is possible only with the reference to the journal  
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



УДК 621.9.048.6

**А.П. Бабичев** (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону),  
**П.Д. Мотренко** (ОАО "Роствертол", г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: vibrotech@mail.ru

### Вибрационные технологии в машиностроении: опыт применения и перспективы развития

*Раскрыто одно из ведущих научных направлений, связанное с использованием вибрационных технологий в машиностроении, металлообработке и других отраслях; показан опыт применения и перспективы его развития.*

**Ключевые слова:** вибрационные технологии; вибрационная обработка; виброударная обработка; стабилизирующая обработка.

*Solved one of the leading research areas associated with the use of vibration technology in mechanical engineering, metal processing and other industries; describes the experience of application and prospects of its development.*

**Keywords:** vibrating technology, vibration treatment, vibro-impact treatment, stabilizing treatment.

Современное машиностроительное производство, транспорт, строительство, быт, медицину и другие отрасли трудно представить без созданных к настоящему времени вибрационных технологий и технологического оснащения: вибрационных машин, станков, аппаратов, приборов и инструментов. Тем не менее, несмотря на впечатляющие успехи в развитии теории колебаний и практики использования вибрационных процессов и устройств, интерес к этой проблеме не иссякает, а напротив, еще более усиливается. Это подтверждает актуальность проблемы, перспективы ее развития, целесообразность постановки и решения более масштабных задач.

Современный период характеризуется интенсивным развитием исследований в области теории колебаний и звука, практического их использования в технологических целях (вибрационные технологии) и создания средств, реализующих эти процессы (вибрационная техника).

Общая физическая природа, характеризующая процессы вибрационной технологии (ВиТ), достаточно сложна и связана с такими явлениями, как удар, кавитация, абразивное изнашивание, многоконтактное взаимодействие обрабатываемых предметов, волновые процессы (взаимодействие ударных волн с материалом или средой), адгезионные явления и др. ВиТ основывается на таких фундаментальных разделах физики, как

акустика, удар и ударные явления, колебания и волны, молекулярная акустика.

Уместно отметить, что становление и развитие ВиТ сопровождается дополнением воздействия вибрационного процесса высокими и низкими температурами, электрическим и магнитным полем, химическими процессами, вследствие чего физико-химическая природа процесса еще больше усложнилась, а технологическое применение значительно расширилось.

Область использования ВиТ в различных отраслях народного хозяйства достаточно многогранна и имеет тенденцию к дальнейшему расширению.

Цель излагаемого материала — охарактеризовать некоторые разработки, идеи, соображения, первичные наброски, над которыми ведут работу аспиранты и докторанты, студенты и магистранты, сотрудники кафедры "Технология машиностроения" ДГТУ, лаборатории и НИИ "Вибротехнология" ДГТУ.

Проводимые исследования направлены на повышение эффективности и производительности процесса, получение качественно новых результатов обработки, автоматизацию процесса, создание средств технологического оснащения. Материал представлен в виде ряда научных направлений, отражающих динамические и кинематические характеристики процесса, физические и механохимические явления вибрационных процессов, конструкторско-технологические разработки.

*Развитие и реализация процессов виброабразивной обработки* — одно из традиционных направлений, по которому созданы большие научные заделы и ведутся работы по их реализации. Они направлены на решение широкого спектра практических задач по совершенствованию и повышению эффективности операций отделочно-зачистной обработки (ОЗО) широкой номенклатуры деталей различного назначения.

*Виброударная упрочняющая и стабилизирующая обработка* — следующее по масштабам исследований направление. По этому направлению имеются обстоятельные научные заделы и примеры внедрения. Однако сложность и ответственность процессов упрочняющей обработки требуют дальнейших комплексных исследований с учетом создания оборудования и инструментов для обработки специфических типов деталей высокотехнологичных изделий (авиационная и ракетно-космическая техника, производство турбин, двигателей транспортных средств и т.п.).

В 2001—2014 гг. ДГУ совместно с ОАО "Роствертол" выполнен комплекс исследований и созданы научные заделы по разработке новых технологических схем, оборудования и инструментов для виброударной упрочняющей обработки силовых деталей вертолетов.

В настоящее время совместно с ОАО "Роствертол" ведутся работы по реализации разработок и их дальнейшему развитию.

Интересные решения предложены по виброударной обработке лонжерона лопасти рулевого винта вертолета, а также адресной виброударной обработке силовых деталей из различных металлических материалов. Предложения подготовлены на основе весьма обстоятельных исследований процесса виброударной обработки и сравнительных усталостных испытаний.

*Вибрационная механохимия; механо-термическая обработка и покрытия; комбинированные процессы виброударной обработки (ВиО), вибрационная механохимическая обработка, вибрационная механохимико-термическая обработка, вибрационная электрохимическая обработка (ВиМХО; ВиМХТО; ВиЭХО и др.).* Исследование и технологическое применение ударно-волновых процессов и явлений при упрочняющей и стабилизирующей обработке, сборке и разборке изделий машиностроения в условиях их ремонта и утилизации представляют большой интерес для дальнейшего развития ВиТ. По данному направлению получены первичные обнадеживающие результаты, ведутся исследования в настоящее время, и планируется их продолжение в последующий период. По предварительным исследованиям, это интересная и многообещающая тематика. Ее результатом могут стать новые виды инструментов, новые технологические схемы и оборудование.

*Применение вибрационных технологий в условиях ремонта и утилизации изделий машиностроения.* По этому направлению имеются некоторые заделы и ведутся поисковые исследования. Установлено, что ВиТ могут эффективно применяться в условиях ремонта изделий машиностроения и их утилизации на операциях очистки и мойки от различного рода загрязнений (нагара, накипи, масляно-грязевых, грунтовых загрязнений и т.п.) и на операциях разборки резьбовых и пресовых соединений. На современном этапе и в ближайший период это весьма актуальная тематика.

*Совершенствование и создание новых видов вибрационного оборудования; новых видов вибровозбудителей, в том числе с обеспечением высокоамплитудных и резонансных режимов колебаний; реализация на этой основе новых технологических схем вибрационной обработки, в том числе специфических деталей: крупногабаритных и длинномерных сложной формы, разработка и исследование новых форм рабочих камер вибрационных станков (щелевые, многокольцевые), разработка новых видов виброударных инструментов и гранулированных сред.* Имеются интересные разработки, научные заделы, в том числе оригинальные. Ведутся работы по их реализации с ОАО "Роствертол" и ООО "ПК "НЭВЗ" (новые технологические схемы виброударной обработки длинномерных деталей — лонжеронов лопастей несущего и рулевого винтов вертолета, адресная вибрационная обработка силовых деталей вертолета сложной формы, вибрационная обработка крупномодульных шестерен тяговой передачи электровоза, обработка колечатых и распределительных валов автомобильных и тракторных двигателей и др.).

Физика и механика структурного преобразования сплошной и гранулированной сред в условиях вибрационного (виброударного) воздействия — интересное и многообещающее, на наш взгляд, направление, не лишенное практической целесообразности. Имеются первичные обнадеживающие результаты, дающие основание вести дальнейшие исследования в этом направлении. Установлена, например, возможность всесторонней обработки деталей сложной формы в уплотненной гранулированной среде при сообщении ударных импульсов от одного или нескольких источников вибрационного воздействия, а также структурных изменений материала в результате распространения и взаимодействия ударных волн.

*Дальнейшие исследования в области технологического использования ультразвуковых, инфразвуковых и модулированных частот колебаний.* Касаясь перспектив использования колебаний различного спектра в технологических целях, можно отметить, что в ближайшие годы интерес к этой проблеме со стороны соответствующих специалистов различных отраслей

будет возрастать. Основными предпосылками к этому являются возможность интенсификации существующих технологических процессов и методов воздействия на предмет и среду, подлежащие обработке или переработке; возможность разработки новых способов обработки материалов и сред; снижение энергозатрат и улучшение качества обработки, повышение производительности и улучшение экологических характеристик, например существенное снижение шума и вибраций за счет использования эффекта виброволнового воздействия и механических волноводов; снижение токсичности и объема сброса промышленных отходов при замене гальванических и химических процессов покрытий вибрационными механохимическими и др.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д.: изд-е ДГТУ, 1999. 620 с.
2. **Отделочно-упрочняющая** обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / И.А. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. Ростов-н/Д, ДГТУ, 2003. 192 с.
3. **Папшев Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
4. **Gillespi L.** "Mass Finishing handbook" Industrial Press Inc. 989 Avenue of the Americas. New York NY 10018.
5. **Применение** вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Гиллеспи Л.К. и др. Ростов-н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2010. 289 с.

УДК 621.9.048.6-192

**Г.А. Прокопец, А.А. Прокопец**

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

E-mail: galinepr@mail.ru

## Система показателей оценки надежности технологического процесса вибрационной обработки деталей

*Рассмотрены вопросы надежности технологических процессов, адаптировано определение надежности к особенностям технологического процесса, предложены показатели для оценки надежности технологического процесса, в качестве примера рассмотрена разработка системы показателей качества детали для вибрационной отделочной обработки деталей. Для анализа причин брака построено и проанализировано дерево отказов технологической системы вибрационной обработки при вибрационном шлифовании ответственных деталей.*

**Ключевые слова:** надежность технологического процесса, качество, стабильность, дерево отказов.

*The article discusses the reliability of treatment processes, the adaptation is made to determine the reliability of processing features, proposed indicators to assess the reliability of the process. The article describes an example of the development of indicators of quality parts for the process of vibration processing details. To analyze the causes of marriage constructed fault tree technological system the process of vibration processing details at a vibratory grinding of critical parts.*

**Keywords:** process reliability, quality, stability, fault tree.

**Актуальность работы.** Согласно ГОСТ Р 53480—2009 "Надежность в технике. Термины и определения" надежность — это "свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности и поддержка технического обслуживания". По ГОСТ 27.002—89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения" надежность — это "свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования". Надежность — понятие многогранное. Она является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказ-

ность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Надежность любого изделия машиностроительного производства закладывается конструктором при проектировании этого изделия путем формирования системы показателей качества, через которые обеспечиваются эксплуатационные свойства изделия. Но этого недостаточно. Необходимо, чтобы при его изготовлении в процессе реализации технологического процесса надежность, заложенная конструктором, была адекватно перенесена на изготавливаемое изделие, что во многом определяется надежностью самого технологического процесса, т. е. технологический процесс машиностроительного производства является важным звеном между потребителем и изделием, удовлетворя-

ющим его потребность. Откуда и следует актуальность прогнозирования и обеспечения надежности технологических процессов.

**Аналитическая часть.** Надежность технологического процесса достаточно сложно оценивать в той системе показателей качества, которая заложена в ГОСТе для традиционных технических объектов. Поэтому назрела необходимость разработки системы показателей надежности для технологического процесса.

Определим надежность технологического процесса механической обработки как свойство данного процесса обеспечивать заданный спектр и уровень показателей качества детали и сохранять в течение заданного промежутка времени достигнутый при наладке уровень качества детали в пределах технологического допуска при обеспечении установленных условий эксплуатации процесса, а именно в установленных условиях его применения и технического обслуживания, под которым понимается подналадка технологической системы и поддержка в исправном состоянии ее элементов. Исходя из этого определения надежность технологического процесса можно разделить на две взаимосвязанные составляющие: качество обработки, соответствующее заявленному конструктором, и стабильность получаемого результата (нахождение значения показателя качества в технологическом допуске при эксплуатации технологического процесса в течение заданного промежутка времени). И первую, и вторую составляющие обеспечивают практически одни и те же элементы технологической системы, но различными своими характеристиками. Например, качество технологического процесса можно опосредованно оценивать по показателям качества изготовленных изделий, стабильность — по производительности процесса и по нахождению значений обеспечиваемых параметров в пределах допуска, заданного конструктором, в партии заготовок или в течение заданного промежутка времени, который определяется экономической целесообразностью.

В соответствии с ГОСТ Р 53480—2009 надежность объекта оценивают по четырем группам показателей — безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости или по сочетанию этих свойств. Адаптируя эти понятия теории надежности к характеристике надежности технологических процессов и приводя их в соответствие с предлагаемым определением, можно предложить следующие смысловые уточнения показателей:

безотказность, для технологического процесса — стабильность, способность с заданной вероятностью обеспечивать значения показателей качества изготавливаемого изделия в течение оговоренного промежутка времени (например, в течение изготовления партии деталей) в технологическом допуске при экономиче-

ски целесообразном числе подналадок технологической системы;

долговечность — срок эксплуатации технологического процесса до его полного морального устаревания, т. е. до момента, когда технологический процесс больше не обеспечивает получение заданных эксплуатационных характеристик (заданных показателей качества) изготавливаемых деталей, или физического устаревания, когда технологический процесс не обеспечивает требуемую производительность, а ремонт элементов технологической системы, в которой он реализуется, становится либо технически, либо экономически нецелесообразен;

ремонтпригодность, для технологического процесса — восстанавливаемость, т. е. вероятность восстановления параметров процесса до значений, обеспечивающих показатели качества изготавливаемого изделия в заданных пределах (например, путем подналадки технологической системы или замены изношенного инструмента); технологический процесс однозначно должен быть восстанавливаемым в отличие от традиционных технических объектов;

сохраняемость — возможность многократного запуска технологического процесса с заданной вероятностью обеспечения заданных показателей качества изготавливаемых деталей, что особенно важно в условиях серийного производства. Это связано с тем, что технологические процессы относятся к циклическим (т. е. одни и те же состояния повторяются во времени в одной и той же последовательности) и конечным (с известным временем протекания) процессам.

**Реализация.** Рассмотрим разработку системы показателей качества детали на примере вибрационной обработки (ВиО). При ВиО (рис. 1) обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру 1, заполненную рабочей средой требуемой характеристики [1]. Рабочая камера смонтирована на упругих элементах, в рассматриваемом случае на пружинах 2, дающих ей возможность колебаться в различных направлениях. Она

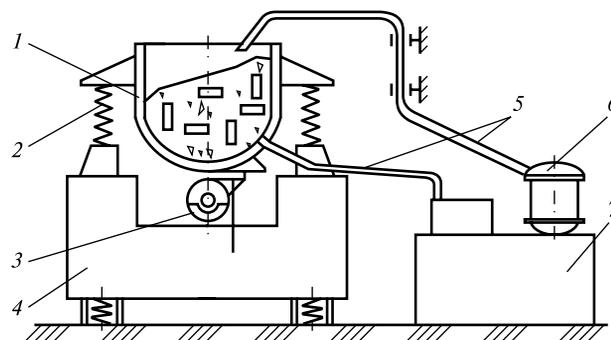


Рис. 1. Технологическая система ВиО:

1 — рабочая камера; 2 — упругий элемент; 3 — инерционный вибратор; 4 — основание; 5 — система промывки; 6 — помпа; 7 — бак-отстойник технологической жидкости (ТЖ)

получает колебания заданной частоты от вала, вращающегося с частотой 900...3000 об/мин. Амплитуда колебаний от 0,5 до 5...9 мм формируется установкой дебалансов  $Z$  (инерционного вибратора) под определенным углом.

В процессе обработки детали непрерывно подвергаются переменным по знаку ускорениям, под действием которых рабочая среда и детали совершают два вида движения: колебательное и циркуляционное. В процессе обработки при свободной загрузке детали занимают различные положения в рабочей среде, обеспечивая тем самым достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

Трудности в обеспечении надежности технологического процесса ВиО связаны с большой сложностью технологической системы, с наличием многочисленных и разнообразных взаимосвязей между ее элементами, с высокими требованиями к надежности технологического процесса, так как процесс ВиО часто используется как финишный. В связи с этим на первом этапе анализа надежности технологического процесса ВиО необходимо структурировать технологический процесс (рис. 2). В структуру технологического процесса входит технологическая система, режим обработки и характеристики заготовок.

В структуре самой технологической системы можно выделить следующие основные элементы: корпус;

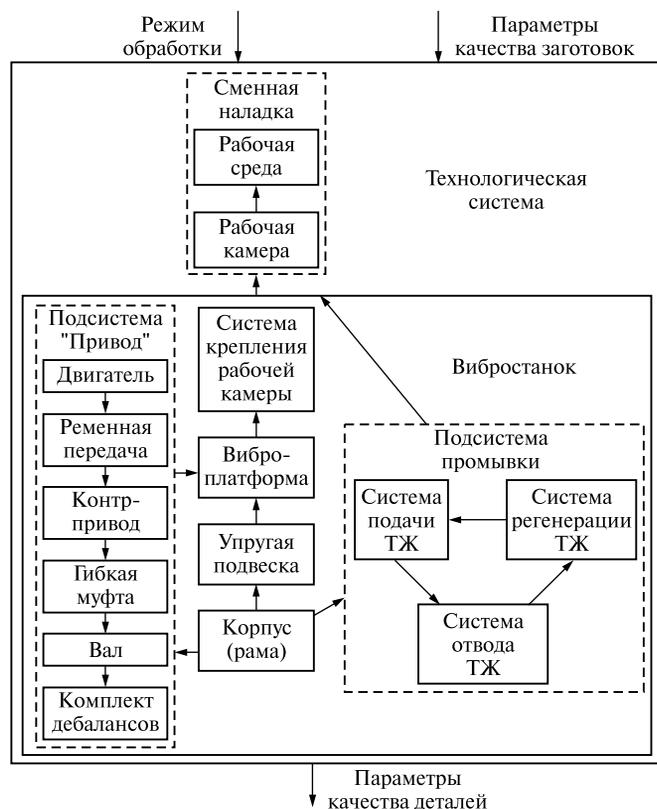


Рис. 2. Структурная схема процесса вибрационной обработки

упругая подвеска, на которой устанавливается вибрирующая часть станка; виброплатформа, несущая на себе сменную наладку в составе рабочей камеры (камер) и засыпанной внутрь ее рабочей среды; привод, обеспечивающий вибрацию с требуемыми характеристиками, а также систему промывки, выполняющую тройную функцию: очистку внутренней полости камеры от продуктов износа рабочей среды и стружки, отвод тепла из зоны резания и химическое воздействие на поверхностный слой детали в целях повышения производительности процесса, нанесения твердой смазки, оксидирования, защиты от коррозии и др. Каждый из этих элементов в строго определенной степени влияет на надежность технологического процесса ВиО.

Кроме элементов технологической системы на надежность технологического процесса в значительной степени оказывают влияние управляющие воздействия и качество заготовки (входные параметры). К управляющим воздействиям относятся режим и время обработки. Режим обработки определяется настройкой технологической системы. Время обработки отслеживается оператором и так же, как и технологическая система, определяет надежность технологического процесса.

На надежность технологического процесса оказывают влияние и входные параметры, такие как параметры шероховатости заготовки ( $Ra$ ,  $Rmax$ , форма неровностей), масса и форма заготовки. Нестабильность значений параметров шероховатости в партии заготовок неизбежно приведет к нарушению стабильности технологического процесса и к снижению качества обработки, т. е. к разбросу значений параметров шероховатости в партии деталей.

Для анализа причин брака можно использовать инженерный подход, который применяется при оценке риска в сложных промышленных технологиях, а именно составить дерево отказов. Выполненная структуризация технологического процесса упрощает эту задачу и делает результат анализа дерева отказов в целях выявления их причин более надежным. Ограничим задачу рассмотрением одной из разновидностей ВиО — вибрационного шлифования поверхностей деталей в среде абразива при свободной загрузке деталей. Дерево отказов технологической системы ВиО при виброшлифовании ответственных деталей представлено на рис. 3.

Появление отказа (шероховатость обработанной поверхности выше допустимой, при этом радиус скругления кромок превышает допустимую величину) может быть обусловлено одной из следующих причин:

оператор нарушил технологическую дисциплину либо не обеспечил требуемый режим промывки или заданное время обработки, либо не выполнил вовремя подналадку технологической системы и др.;

технолог выбрал неправильную рабочую среду или допустил ошибку при назначении режима обработки,

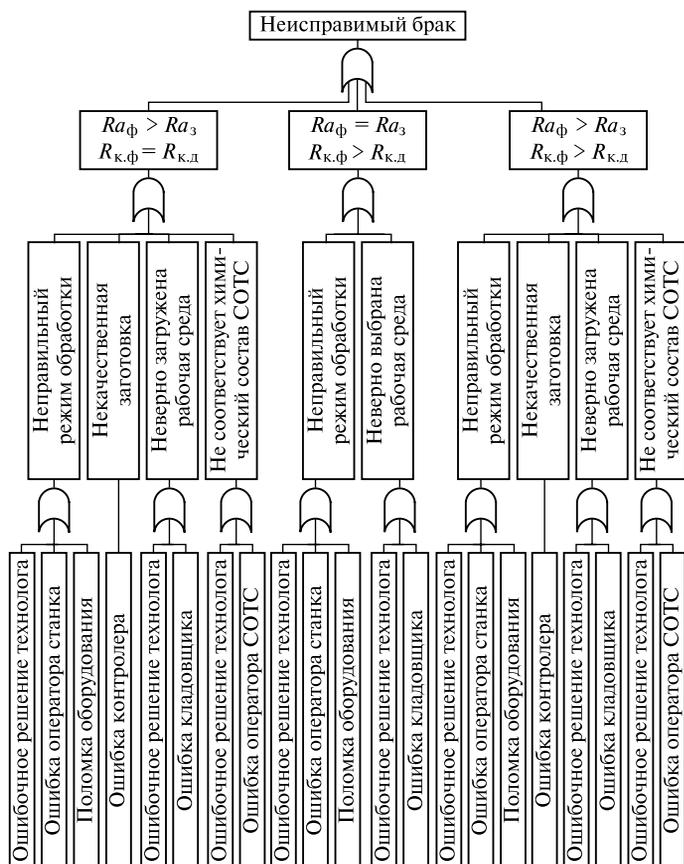


Рис. 3. Дерево причин потенциальных отказов (дерево отказов) технологической системы ВиО при выполнении операции виброшлифования:

$R_{a\phi}$ ,  $R_a$  — фактически полученный и заданный параметры шероховатости соответственно;  $R_{к.φ}$ ,  $R_{к.д}$  — фактически полученный и допустимый по техническим условиям радиусы скругления кромок деталей соответственно

либо не включил в технологический процесс операцию (или переход) по контролю заготовок, поступающих на обработку (в зависимости от стабильности предшествующей операции или технологического процесса);

контролер допустил ошибку или халатность при входном контроле заготовок, поступающих на операцию ВиО (скрытый брак, не выявленный на предыдущей операции) или при контроле рабочей среды, поступившей на предприятие;

поломка оборудования, например, в результате несвоевременного профилактического ремонта.

Как показывает анализ дерева отказов, наиболее вероятной причиной отказа является человеческий фактор.

Следующий этап — выявление спектра факторов, влияющих на надежность процесса ВиО, и постановка им в соответствие показателей надежности. Все факторы разделим в соответствии с двумя указанными ранее группами:

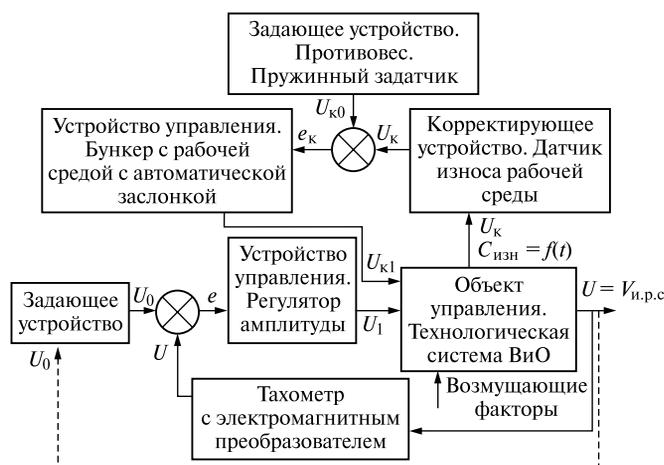
оценка уровня показателей качества обработки детали, соответствующего заявленному конструктором;

стабильность во времени значений показателей качества детали, получаемых в результате реализации технологического процесса.

Четкого разделения по этим двум группам показателей качества нет. Необходимо отметить, что каждый показатель надежности является комплексной характеристикой и зависит от нескольких факторов, причем степень влияния этих факторов на конечный результат различна. Каждый фактор характеризуется своим частным показателем надежности и входит в комплексный показатель со своим коэффициентом значимости, определяющим степень его влияния на надежность технологического процесса. Результаты анализа сведены в таблицу.

Структуризация факторов технологической системы по составляющим надежности технологического процесса виброшлифования ответственных деталей

Элемент технологической системы	Основные факторы, влияющие на составляющие надежности	
	Качество обработки	Стабильность
Рабочая камера	Диссипативные свойства покрытия рабочей камеры	Износ покрытия рабочей камеры
Привод рабочих колебаний	Стабильность частоты вращения приводного вала Точность установки эксцентриков (грузов)	Износ подшипников Надежность крепления эксцентриков
Упругая подвеска	Жесткость подвески (пружин) Уравновешенность массы платформы с установленными на ней рабочими камерами (рабочей камерой)	Неодинаковость жесткости элементов подвески Постоянство массы платформы с установленными на ней рабочими камерами (рабочей камерой)
Рабочая среда	Размеры и форма частиц рабочей среды Зернистость абразивных гранул Объем загрузки рабочей камеры	Искажение формы частиц рабочей среды в результате износа Снижение режущей способности абразивных гранул Уменьшение объема загрузки в связи с износом рабочей среды
Технологическая жидкость	Состав технологической жидкости Количество технологической жидкости (удаление продуктов износа, гидродинамический эффект) Температура (охлаждение зоны резания)	Постоянство состава технологической жидкости Чистота технологической жидкости (надежность очистки)



**Рис. 4. Система автоматического регулирования технологической системы ВиО с компенсацией износа рабочей среды:**  
 $V_{н.р.с}$  — скорость циркуляции рабочей среды как обобщенный показатель стабильности процесса

Целесообразно на следующем этапе определить метод обеспечения надежности технологического процесса, например применить некоторую систему управления. В настоящее время достаточно широко используется управление с прогнозирующими моделями, являющееся улучшением классического управления с отрицательной обратной связью. В нем учитывается предсказание поведения объекта управления при различных типах входных воздействий [2]. Обратная связь в таких системах управления используется для корректировки неточностей, связанных с внешними помехами и неточностью математической модели объекта управления. Основой этого метода является математическая модель объекта, и все выполненные в предыдущем анализе шаги создают базу для формирования такой модели.

Схема реализации такой системы управления и состав ее элементов будут зависеть от структуры техно-

логической системы, условий и цели обработки и при их изменении будут соответственно изменяться. Например, при обработке деталей в условиях мелко- и среднесерийного производства, а также при использовании рабочих сред с высокой стойкостью стабилизировать результат обработки в течение достаточно длительного времени (например, при обработке партии деталей) представляется возможным изменением режима колебаний. При тех же условиях обработки деталей в условиях крупносерийного и массового производства, а также при использовании рабочих сред, скорость износа которых достаточно велика, стабилизировать показатель качества деталей только изменением режима колебаний уже не представляется возможным. Поэтому в такую систему автоматического регулирования необходимо включить блок компенсации износа рабочей среды. Структурная схема такой системы автоматического регулирования представлена на рис. 4.

Таким образом, системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью позволят значительно снизить влияние случайных (в том числе человеческого фактора) и систематических факторов и, соответственно, повысить надежность процесса вибрационной обработки. Более того, применение таких систем позволит снизить трудоемкость обработки деталей, т. е. повысить производительность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук / Ростов-н/Д, 1995. 238 с.
2. **Метод** объединенного принципа максимума в параметрических задачах оптимального управления / А.А. Костоглотов и др. // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4.



УДК 621.7.075

С.А. Берберов, Н.И. Берберова, К.С. Кешишьян

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

E-mail: nayhsihsek@yandex.ru

## Повышение качества шлицевых отверстий в термообработанных деталях дорнованием

Рассматривается конструкция твердосплавного инструмента, предназначенного для калибровки шлицевых отверстий в термообработанных деталях. Этот инструмент разработан с целью заменить устаревшие конструкции. В отличие от существующих средств и методов калибровки предложенная конструкция инструмента обеспечивает получение шлицевых отверстий с высокой точностью, о чем свидетельствует уменьшение шероховатости поверхностного слоя; в то же время поверхностный слой отверстий упрочняется. Данный метод позволяет повысить износостойкость поверхности шлицевых отверстий в термообработанных деталях.

**Ключевые слова:** дорнование, калибрование, шлицы, отверстие, деталь, точность, деформирование, метод обработки.

*This article details the design disclosed carbide tool designed for calibrating slotted holes in the heat-treated parts. These tools designed to replace the outdated design. Unlike existing tools and methods of calibration, we have proposed a design tool, providing reception slotted holes with high accuracy, as evidenced by the roughness of the surface layer is reduced by 1, 2-quality class, at the same time opening hardening. This method can improve the wear resistance of the surface of the slotted holes in the heat-treated parts.*

**Keywords:** burnishing, calibration, splines, hole, detail, precision, straining, processing method.

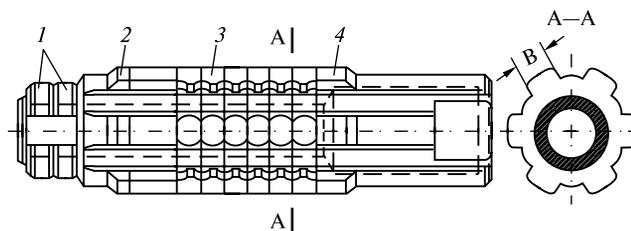
### Введение

Качество и долговечность деталей машин во многом зависят от методов отделочной обработки поверхностного слоя детали. В последнее время все более широкое применение во всех отраслях машиностроения получают методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин пластическим деформированием. К одному из таких методов относится дорнование (калибрование). Этот метод обеспечивает высокую точность обработки отверстий, увеличение производительности обработки, повышение эксплуатационных свойств детали.

В современных машинах нашли широкое распространение детали со шлицевыми отверстиями (шестерни, зубчатые колеса и др.), позволяющие с большой точностью центрировать втулку относительно вала и передавать большие крутящие моменты на значительные расстояния. Однако обеспечение точности шлицевых отверстий (особенно с центрированием по наружному диаметру шлицев) представляет большие трудности, так как такие детали изготавливаются из высоколегированных сталей, подвергаются термической обработке — объемной закалке, в результате которой металл де-

формируется, и полученная точность отверстий нарушается. Усадка отверстий иногда достигает 0,1...0,15 мм по диаметру. Калибровать их режущими прошивками невозможно (твердость детали соизмерима с твердостью прошивок), абразивная обработка затруднена из-за недостаточного пространства для размещения абразивного круга, электрохимические методы стравливания слоя материала не обеспечивают требуемую точность.

Для калибрования прямобочных шлицевых отверстий в закаленных зубчатых колесах (твердость 56...62 HRC) применяются многозубые сборные дорны (рис. 1), ко-



**Рис. 1. Многозубый шлицевой дорн для калибровки шлицевых отверстий:**

1 — гайка; 2 — передняя направляющая; 3 — дорнующие зубья; 4 — оправка

торые представляют из себя оправку с набранными на ней дорнующими кольцами. Раздельное изготовление каждого зуба дорна позволяет обеспечить заточку углов заборного и образного конусов по боковым кромкам зуба.

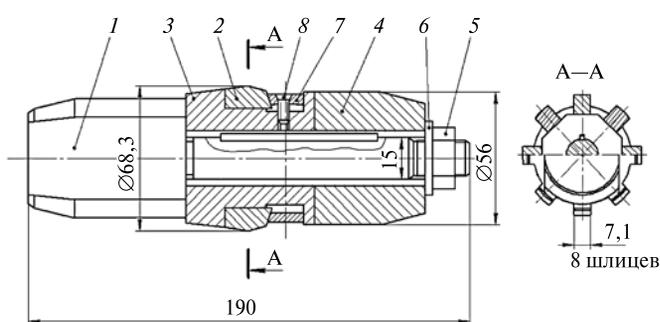
Калибрование шлицевых отверстий производится тремя дорнами, которые поочередно проталкиваются сквозь отверстие. Каждый дорн по всей длине имеет неизменный размер как по наружному диаметру, так и по ширине шлица.

Приведенная конструкция дорна сложна в изготовлении, так как шлифовать профиль дорна по боковым поверхностям весьма затруднительно. Стойкость такого дорна ничтожно мала — несколько деталей. Это и стало поводом для разработки новых конструкций инструмента.

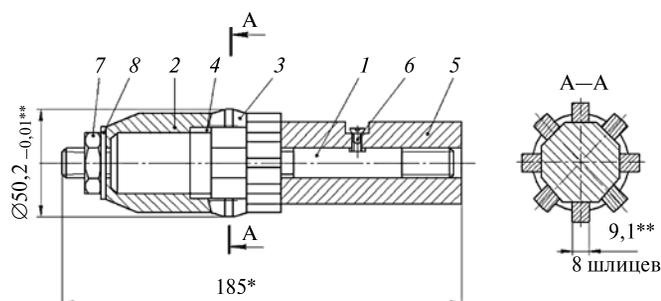
### Разработка конструкции шлицевого дорна

В ДГТУ на кафедре "Технология машиностроения" разработаны новые конструкции твердосплавных сборных шлицевых дорнов, обладающих очень высокой стойкостью. Высокая стойкость обусловлена спецификой работы твердого сплава в условиях трения. Конструкции этих дорнов позволяют осуществлять шлифование по боковым поверхностям отдельно, в результате чего себестоимость их изготовления меньше, чем изготовления цельного дорна из быстрорежущей стали.

На рис. 2 приведена конструкция твердосплавного сборного шлицевого дорна. Дорн проталкивается через шлицевое отверстие на прессе с помощью оправки 1. Длина хвостовой оправки должна быть на 5 мм больше высоты детали со шлицевым отверстием. Дорн производит калибрование шлицевых отверстий при помощи рабочих органов — твердосплавных пластин 2. Твердосплавные пластины изготовлены из сплава ВК6 по ГОСТ для отрезных резцов. Твердосплавные пластины 2 крепятся на корпусе 3 с помощью сухарей 7 и винтов 8. Для компенсации погрешности изготовления



**Рис. 2. Шлицевая прошивка с пластинами из твердого сплава:**  
1 — оправка; 2 — твердосплавные пластины; 3 — корпус; 4 — хвостовик; 5 — гайка; 6 — шайба; 7 — сухарь; 8 — винт



**Рис. 3. Прошивка для калибрования шлицевых отверстий:**  
1 — оправка; 2 — сепаратор; 3 — корпус; 4 — пластина; 5 — хвостовик; 6 — винт; 7 — гайка; 8 — шайба

пластины по длине на корпус сухарей 7 наклеивается резинка.

Конструкция дорна позволяет отдельно, вне корпуса, оформить боковые рабочие поверхности пластины на универсально-заточном станке. Наружные рабочие поверхности (наружный диаметр, ширина ленточки, заборные и обратные углы) шлифуются либо на круглошлифовальном, либо на универсально-заточном станке.

Предлагаемая конструкция дорна благодаря твердосплавным пластинам имеет высокую износостойкость и технологична в изготовлении.

Недостатками такой конструкции являются высокая трудоемкость и сложность сборки твердосплавных пластин с помощью сухарей и большого числа деталей. Этих недостатков лишена конструкция шлицевой прошивки, представленная на рис. 3. Эта конструкция имеет все достоинства предыдущей, но закрепление всех твердосплавных пластин осуществляется при помощи одной детали — сепаратора 2, который закрепляет все пластины при помощи гайки 7 и шайбы 8. Сепаратор 2 представляет из себя вал со шлицами, заниженными по наружному диаметру и боковым поверхностям на 1...2 мм, что позволяет легко входить в обрабатываемое шлицевое отверстие.

В целях широкого внедрения этих конструкций дорнов были проведены исследования по определению наиболее оптимальной геометрии дорнов для обеспечения требуемого качества поверхности отверстий и наименьших энергетических затрат.

### Исследования влияния конструктивных элементов дорна на качество поверхности и силовые факторы процесса калибрования

Одним из важнейших элементов, определяющих форму рабочей поверхности дорна, являются углы заборного конуса  $\alpha$ , так как заборной частью осуществляется основная деформация обрабатываемого металла и от нее в значительной степени зависят усилие дорнования  $P$  и качество полученной поверхности. При

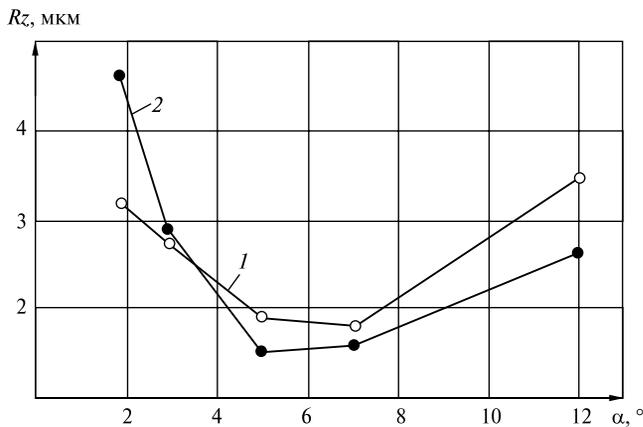


Рис. 4. Зависимости высоты шероховатостей поверхности  $Rz$  от угла заборного конуса  $\alpha$  для разных обрабатываемых материалов

правильном выборе углов заборных конусов шлицевых дорнов тяговое усилие будет минимальным, высота шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия также будет наименьшей ввиду преимущественного радиального течения металла.

На рис. 4 приведены построенные по результатам исследований графики зависимостей высоты шероховатостей поверхности  $Rz$  шлицевых отверстий втулок, обработанных фасонными дорнами, от заборного угла  $\alpha$ . Обрабатываемые материалы — стали 20X, цементованная и закаленная до твердости 58...62 HRC (кривая 1); 40X, закаленная до твердости 48...52 HRC (кривая 2).

Исследования показали, что оптимальная геометрия дорнующего инструмента ( $\alpha = 4...5^\circ$ ) обеспечивает наивысшее качество обработанной поверхности шлицевого отверстия и наименьшее значение тягового усилия дорнования.

В процессе калибрования шлицевых отверстий фасонными дорнами в обрабатываемой детали протекают упругие и пластические деформации по профилю шлицевого отверстия. Поэтому большое практическое значение имеет учет упругих и остаточных деформаций, появляющихся по профилю шлицевого отверстия после прохода фасонного дорна с определенным натягом, так как эти деформации оказывают значительное влияние на точность размеров шлицевых отверстий. Зная величины остаточных деформаций по профилю шлицев, можно правильно подобрать натяги дорнования и обеспечить получение шлицевых отверстий в деталях в пределах необходимой точности.

Исследования показали, что остаточная деформация поверхности шлицевого отверстия при калибровании зависит от натягов по наружному диаметру  $i_d$  и боковой поверхности шлицев  $i_6$ ; физико-механических свойств обрабатываемого материала, толщины стенки втулки, схемы деформирования поверхностей отвер-

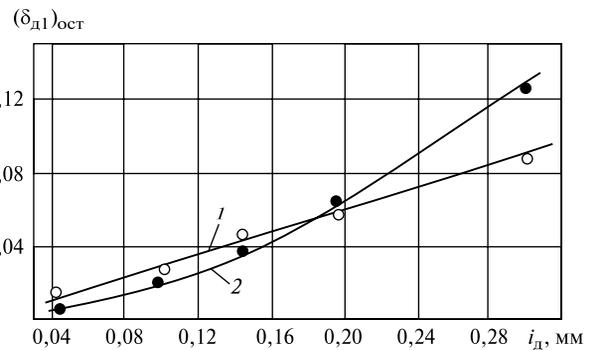


Рис. 5. Зависимости остаточных деформаций металла по поверхности наружного диаметра шлица от натяга:

1 — сталь 40X, объемно-закаленная до твердости 48...52 HRC; 2 — сталь 20X, цементованная на глубину 0,8...1,1 мм и закаленная до твердости 58...62 HRC

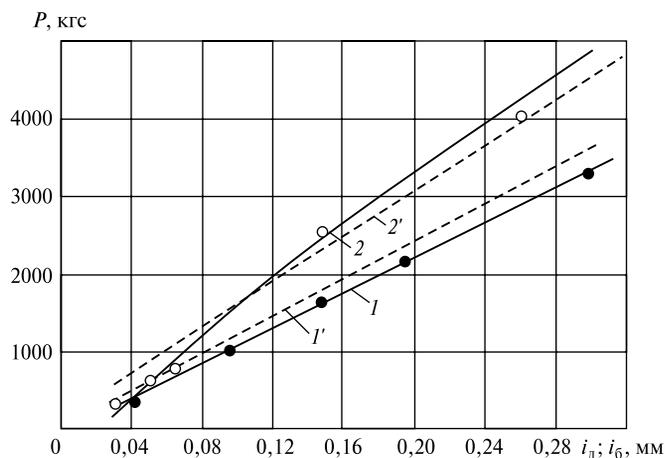
ствия. На рис. 5 приведен построенный по результатам исследований график зависимости остаточных деформаций металла по поверхности наружного диаметра шлицевого отверстия  $(\delta_{д1})_{ост}$  от натяга дорнования  $i_d$  для случая обработки втулок из стали 40X, объемно-закаленной до твердости 48...52 HRC (кривая 1). Зависимость имеет примерно прямолинейный характер. Свое начало на оси абсцисс прямая берет от некоторого положительного значения натяга, так как при меньших натягах обрабатываемая втулка находится в режиме чистых упругих деформаций и остаточных деформаций не имеет.

Зависимость 1 остаточных деформаций имеет малый угол наклона к оси абсцисс. Это свидетельствует о том, что остаточная деформация по наружному диаметру шлицевого отверстия при дорновании втулок из стали 40X, закаленной до твердости 48...52 HRC, намного меньше натяга дорнования.

Определение тягового усилия при дорновании шлицевых отверстий имеет большое практическое значение, так как, зная заранее значение усилия, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или прессы, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. Можно правильно назначить оптимальную геометрию инструментов-дорнов, обеспечивающую при равных всех прочих условиях наименьшее значение тягового усилия.

На рис. 6 представлен график зависимостей тяговых усилий  $P$  от натяга  $i_d$  при дорновании втулок из стали 40X, объемно-закаленной до твердости 48...52 HRC (линия 1) и стали 20X, цементованной на глубину 0,8...1,1 мм и закаленной до твердости 40...45 HRC (линия 2).

Как показывают исследования, тяговые усилия при обработке объемно-закаленных сталей 40X и 45 с увеличением натяга дорнования  $i_d$  значительно возрастают



**Рис. 6. Зависимость тяговых усилий  $P$  от натяга дорнования:**  
 $1, 1'$  — по наружному диаметру шлицевого отверстия  $i_d$ ;  
 $2, 2'$  — по боковым поверхностям шлицев  $i_6$ ;  $1', 2'$  — расчетные данные

примерно по прямолинейному закону. При дорновании же образцов из цементованной и закаленной стали 20X тяговые усилия с увеличением натяга дорнования по наружному диаметру шлица значительно возрастают примерно по прямолинейному закону только до натяга  $i_d = 0,13$  мм. Это свидетельствует о том, что происходит деформирование только поверхностных слоев металла. После превышения данного значения натяга рост тяговых усилий становится менее интенсивным и кривая плавно изгибается, так как при натягах, больших 0,13 мм, происходит пластическое деформирование металла, лежащего ниже цементованного слоя и имеющего меньшую твердость, и поэтому металл оказывает меньшее сопротивление деформированию. Начиная с натяга  $i_d = 20$  мм тяговые усилия продолжают возрастать примерно по прямолинейному закону. Это указывает на то,

что при таких натягах пластическому деформированию подвергаются не только слои металла, лежащие под цементованным слоем, но и сам цементованный слой.

### Выводы

Калибрование шлицевых отверстий в термообработанных деталях с использованием предложенной конструкции твердосплавного сборного шлицевого дорна является эффективным методом отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающим получение поверхностей высокого качества. Проведенные исследования дают возможность более широко внедрять этот метод обработки в технологию изготовления зубчатых колес.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берберов С.А., Берберова Н.И. Калибрование шлицевых отверстий в термообработанных деталях фасонными дорнами // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. в рамках VII пром. конгр. Юга России / Вертол Экспо. Ростов-н/Д. 2011. С. 32—36.
2. Берберов С.А., Осинцева Е.С. Особенности процесса дорнования шлицевых отверстий твердосплавными дорнами // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы IX регион. науч.-практ. конф. учреждений высш. и сред. проф. образования. ДГТУ, Ростов-н/Д. 2012. С. 48—53.
3. Берберов С.А., Болокан А.Г. Инструмент для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Сб. науч. тр. междунар. научн.-техн. конф. ДГТУ. Ростов-н/Д. 2014. С. 22—29.

## Устойчивость процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей прецизионными методами ППД

*Работа посвящена системному исследованию динамики процессов поверхностного пластического деформирования (ППД), в которой рассматривается единство проблем устойчивости траекторий движения деформирующего инструмента, его возмущений, выбора параметров инструмента и технологических режимов, основанных на особенностях динамики. Исследование посвящено анализу и синтезу динамических и конструктивных параметров деформирующего инструмента, а также управлению динамикой процесса ППД в единстве с обеспечением устойчивости и управления реакцией системы на кинематические и силовые возмущения в целях повышения качества изготовления деталей, прежде всего, улучшения шероховатости. Рассмотрены модели процесса отделочно-упрочняющей обработки прецизионными методами ППД при стационарном и периодическом импульсном силовом воздействии деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Приведено решение уравнений движения с учетом ударов, разрывных функций силы, явления дребезга, что обеспечивает возможность анализа переходных процессов и предельного цикла движения. Для оценки выхода ударной системы на установившийся режим движения проводится статистический анализ числовой последовательности предударных скоростей. Этот анализ позволяет осуществлять строгую констатацию выхода системы на установившийся режим движения с заданным уровнем отклонения числовых значений, не превышающих малую величину. Предложены алгоритмы управления процессом моделирования и элементы его реализации в проблемно-ориентированном программном комплексе.*

**Ключевые слова:** отделочно-упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, устойчивость, выглаживание, математические модели, удар, виброударная система, явления дребезга.

*This paper is devoted to system research on dynamics of the surface plastic deformation (SPD) processes, which addresses the problems of sustainability unity motion paths deforming instrument, tool options, choice of perturbation and technological modes based on the features of dynamics. The research is devoted to the analysis and synthesis of dynamic and design parameters of deforming tools, as well as managing the dynamics of SPD in unity of sustainability and the management response system on kinematic and power disturbances in order to improve the quality of production, above all, improve roughness. The model of process finishing-strengthening processing precision SPD methods when stationary and periodic pulsed power effects deform the tool on the work surface. Is the solution of the equations of motion given the strikes, power functions, the phenomenon of exploding bounce, allowing for analysis of transient processes and limit cycle of movement. To assess the impact of the traffic load is carried out a statistical analysis of a numeric sequence predudarnyh speeds. This analysis allows for a strong statement coming out of the established regime of deviation with a given level of numeric values, do not exceed a small amount. Algorithms modeling and management elements of the problem-oriented software package.*

**Keywords:** finishing-strengthening processing, surface plastic deformation, stability, burnishing, mathematical models, impact, vibroimpact system, the phenomenon of bounce.

### Введение

Одним из наиболее эффективных путей повышения безотказности и долговечности ответственных деталей из высокопрочных сталей и сплавов является применение методов упрочняющей обработки, используемых при изготовлении деталей и ремонте. В настоящее время задача повышения эффективности методов упрочняющей обработки таких деталей стоит еще более остро, чем раньше.

В большинстве случаев методы поверхностного упрочнения основаны на нанесении покрытий или изменении состояния (модификации) поверхности.

При нанесении покрытий упрочнение деталей достигается путем осаждения на ее поверхности материалов, которые по своим свойствам отличаются от основного металла, но наиболее полно отвечают тре-

бованиям эксплуатации (износ, коррозия, химическое воздействие и т.п.).

При изменении состояния (модификации) поверхностного слоя происходит физико-химическое изменение в металле, повышающее его сопротивление разрушению. Модифицирование поверхностного слоя может осуществляться деформационным упрочнением, поверхностной термообработкой, диффузионным нанесением легирующих элементов.

### Постановка задачи

Обеспечение изготовления деталей, обладающих требуемым качеством, является одной из основных задач машиностроительного производства. В связи с повышением требований к качеству деталей все более широкие перспективы применения на завершающей

стадии технологического процесса изготовления приоб- ретают операции прецизионной отделочно-упрочняю- щей обработки методами поверхностного пластическо- го деформирования (ППД). Эти методы обработки обе- спечивают благоприятное с позиции эксплуатационных свойств сочетание параметров шероховатости, микро- твердости, величины и характера распределения техно- логических остаточных напряжений при изготовлении широкого круга ответственных деталей, таких как што- ки, валы, оси и др., выполняемых из высокопрочных сталей и работающих в условиях высоких скоростей, повышенного износа и циклических нагрузок.

Многие исследователи в области ППД [1–7] отме- чают, что при определенных усилиях нормального дав- ления наблюдается потеря устойчивости и в системе развиваются автоколебания. В этом случае на поверх- ности обрабатываемой заготовки формируются регу- лярные следы, величина которых может превышать величину шероховатости исходной поверхности. При малых силах контактного взаимодействия объем пла- стической деформации в области контакта инструмен- та с обрабатываемой заготовкой не позволяет сгладить те исходные микронеровности, которые существуют на необработанной поверхности. Поэтому все исследова- тели отмечают существование оптимальных значений внешних сил, при которых эффективность процесса максимальна. Наконец, процесс ППД сопровождается некоторым силовым шумом. Он обусловлен, напри- мер, периодическими изменениями рельефа поверх- ности обрабатываемой заготовки. На силовой шум оказывают также влияние особенности пластической деформации в зоне контакта, которая связана с пери- одическим формированием поверхностей скольжения в приповерхностной области. На динамику процесса также оказывают влияние параметры инструмента.

Устойчивость и надежность процессов отделочно- упрочняющей обработки методами ППД зависят от большого числа факторов. В данной работе рассмотре- ны модели устойчивости для двух характерных процес- сов отделочно-упрочняющей обработки — статически- ми и динамическими методами ППД.

#### Устойчивость процесса обработки деталей статиче- скими методами ППД

Проведем анализ устойчивости процесса ППД на примере технологического процесса обработки дета- лей методом выглаживания. При обработке заготовок выглаживанием могут наблюдаться колебания инстру- мента [8–11], которые возникают при действии пере- менных нагрузок и обусловлены свойствами упругой системы конструкции станка (недостаточная жест- кость, демпфирующая способность и масса).

При выглаживании, как и при обычном резании, на инструмент действуют три составляющие равнодей- ствующей силы  $P_R$ : осевая  $P_x$ , радиальная  $P_y$  и главная  $P_z$

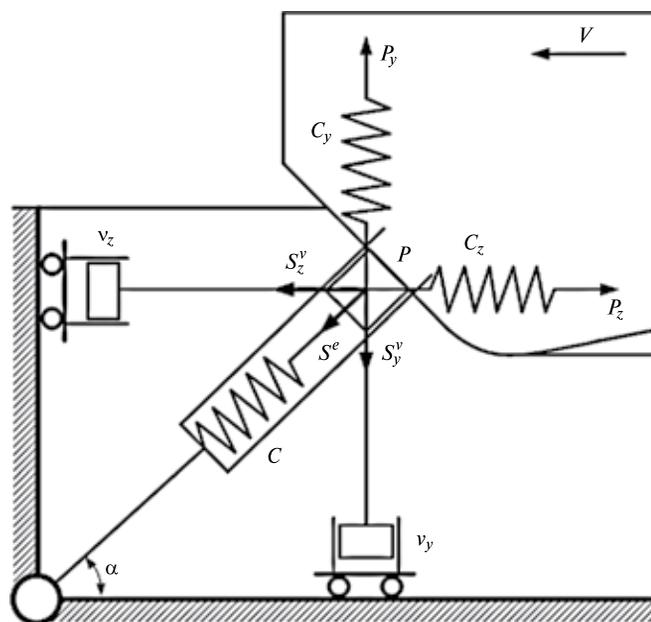


Рис. 1. Двумерная структурная модель ППД упругопластического упрочняющегося тела

(касательная). Причем текущие значения и соотноше- ния сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  изменяются в течение каждого цикла колебания инструмента. В итоге суммарная амплитуда колебаний инструмента может достичь такого значе- ния, что упругая технологическая система выйдет за границу устойчивости. Поэтому при проектировании технологического процесса выглаживания необходимо проводить расчет на устойчивость.

Учитывая, что определяющими факторами в фор- мировании и распространении упругих волн в инстру- менте для выглаживания и в технологической системе являются радиальная и тангенциальная составляющие амплитуды, рассмотрим эти колебания как систему с двумя степенями свободы (рис. 1).

Проанализируем случай, когда инструмент для вы- глаживания является доминирующей колебательной системой, т.е. он совершает более интенсивные по ам- плитуде колебания, чем система заготовки. Матема- тическую модель процесса выглаживания составляем в виде одномассной динамической модели с заменой распределенных параметров на сосредоточенные (эк- вивалентные). Для этого введем эквивалентные ко- эффициенты жесткости  $C_y$ ,  $C_z$  и сопротивления или демпфирования  $v_y$ ,  $v_z$  инструмента вдоль осей  $Y$  и  $Z$  соответственно, а их равномерно распределенную массу заменим эквивалентной массой  $m$  (рис. 2). На рассма- триваемую систему действуют силы инерции  $P_{ин}$ , со- противления (демпфирования)  $P_{сопр}$ , упругости  $P_{упр}$  и выглаживания (равнодействующая)  $P_R$ .

В соответствии с принятыми обозначениями пред- ставим действующие на рассматриваемую систему силы в виде векторных выражений:

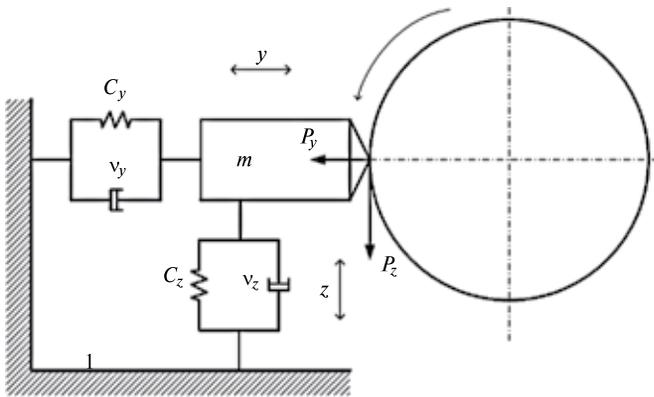


Рис. 2. Расчетная динамическая модель процесса выглаживания

для силы инерции

$$\bar{P}_{ин} = -m(\ddot{y}\bar{j} + \ddot{z}\bar{k});$$

для силы сопротивления (демпфирования)

$$\bar{P}_{сопр} = v_y\dot{y}\bar{j} + v_z\dot{z}\bar{k};$$

для силы упругости

$$\bar{P}_{упр} = C_y y \bar{j} + C_z z \bar{k},$$

где  $\bar{j}, \bar{k}$  — единичные векторы;  $\ddot{y}, \ddot{z}$  — ускорения;  $\dot{y}, \dot{z}$  — скорости;  $y, z$  — перемещения при выглаживании по осям  $Y$  и  $Z$  соответственно.

Для рассматриваемой колебательной системы в соответствии с принципом д'Аламбера имеет место равенство

$$P_{ин} + P_{сопр} + P_{упр} + P_R = 0.$$

С использованием полученных выше выражений для сил инерции, сопротивления и упругости движение в плоскости  $OYZ$  описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + v_y\dot{y} + C_y y &= P_y(t); \\ m\ddot{z} + v_z\dot{z} + C_z z &= P_z(t). \end{aligned} \quad (1)$$

При выглаживании величины  $P_y(t)$  и  $P_z(t)$  определяются соотношениями

$$P_y(t) = P_y - \Delta P_{\Delta a} \sin(\omega t - \phi) + \Delta P_{\Delta b} \cos \omega t;$$

$$P_z(t) = P_z + \Delta P_{\Delta a} \cos(\omega t - \phi) + \Delta P_{\Delta b} \sin \omega t.$$

Здесь составляющие силы выглаживания  $P_y(t)$  и  $P_z(t)$  рассматриваем состоящими из двух слагаемых: составляющих сил при стационарном процессе  $P_y, P_z$  и сил, возникающих от возникновения вибраций ( $\Delta P_{\Delta a}, \Delta P_{\Delta b}$  — максимальные составляющие силы выглаживания, обусловленные соответственно изменением толщины деформируемого слоя и твердости материала заготовки). Фазовый угол определяется выражением  $\phi = \pi i$ , где  $i$  — отношение остатка периода колебаний, не уложившегося во время одного оборота детали, к периоду колебаний. При форме колебаний, близкой к гармонической, максимальные значения новых членов суммы определяются по формулам теории рядов Фурье [12, 14]:

$$P_y = \frac{1}{T} \int_0^T P_y(t) dt;$$

$$\Delta P_{\Delta a} = \frac{2}{T} \int_0^T P_y(t) \sin \omega t dt;$$

$$\Delta P_{\Delta b} = \frac{2}{T} \int_0^T P_y(t) \cos \omega t dt,$$

где  $T = 2\pi/\omega$  — период вынужденных колебаний;  $\omega$  — круговая частота вынужденных колебаний.

Решение системы уравнений (1) определит дополнительные перемещения инструмента по осям  $Y$  и  $Z$ . Например, перемещение инструмента по оси  $Y$  от действия силы  $P_y(t)$ :

$$\begin{aligned} y &= \frac{P_y}{C_y} + \frac{\Delta P_{\Delta a}}{\sqrt{(C_y - m\omega^2)^2 + 4v_y^2\omega^2}} \sin \omega t + \\ &+ \frac{\Delta P_{\Delta b}}{\sqrt{(C_y - m\omega^2)^2 + 4v_y^2\omega^2}} \cos \omega t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{P_y}{C_y} + \frac{\Delta P_{\Delta a}}{C_y \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{p^2}}} \sin \omega t + \\ &+ \frac{\Delta P_{\Delta b}}{C_y \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{p^2}}} \cos \omega t, \end{aligned}$$

где  $p = \sqrt{\frac{C_y}{m}} = \frac{C_y}{v_y}$  — собственная частота колебаний упругой технологической системы при отсутствии затухания.

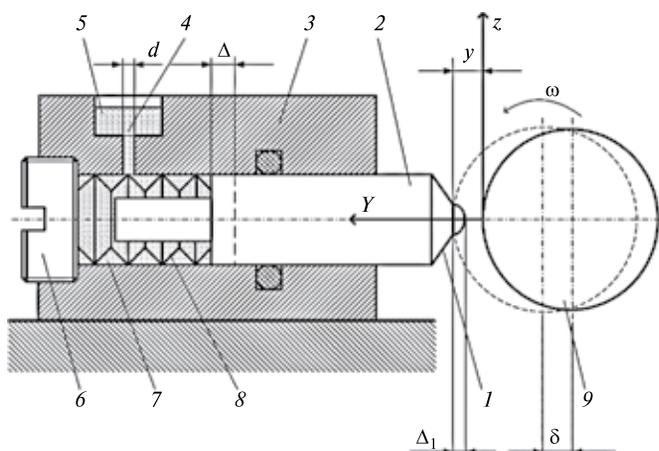


Рис. 3. Схема динамического моделирования процесса ППД выглаживателем с гидравлическим демпфером

Таким образом, перемещение рассматриваемой парциальной системы представлено суммой трех членов: первый характеризует статическое смещение под действием силы  $P_y$ , а второй и третий — перемещения под действием переменных составляющих силы выглаживания, обусловленных изменением толщины деформируемого слоя ( $\Delta P_{\Delta a}$ ) и твердости материала ( $\Delta P_{\Delta b}$ ) заготовки при выглаживании. Аналогичными выражениями определяются перемещения по оси  $Z$  от действия силы  $P_z(t)$ .

Общее перемещение инструмента от переменных нагрузок и недостаточной упругости конструкции определяем по принципу суперпозиции.

На рис. 3 показана схема процесса ППД выглаживателем, закрепленным в державке с гидравлическим демпфером. Державка состоит из корпуса 3, поршня 2 со штоком, в котором закреплен выглаживатель 1, пружины 8 (изображена условно) и винта 6. Резервуар 5 соединен дросселем 4 с полостью 7, заполненной жидкостью. При перемещении поршня 2 жидкость, перетекая из полости 7 в резервуар 5, создает демпфирующее действие, т.е. дополнительное сопротивление движению поршня. Поршень 2 перемещается под действием упругих сил, действующих со стороны заготовки 9 с одной стороны и пружины 8 с другой стороны.

Для случая процесса выглаживания детали, закрепленной в центрах с некоторым биением  $\delta$  (см. рис. 3), дифференциальное уравнение, описывающее процесс ППД, будет иметь вид

$$m\ddot{y} + v\dot{y} + c(\Delta + y + \delta \sin \omega t) = -ES(\Delta_1 - y - \delta \sin \omega t) \operatorname{sgn}(\Delta_1 - y - \delta \sin \omega t), \quad (2)$$

где  $m$  — приведенная масса инструмента, кг;  $v$  — коэффициент демпфирования, Н/(мм/с);  $c$  — жесткость пружины, Н/мм;  $\Delta$  — предварительный натяг пружины,

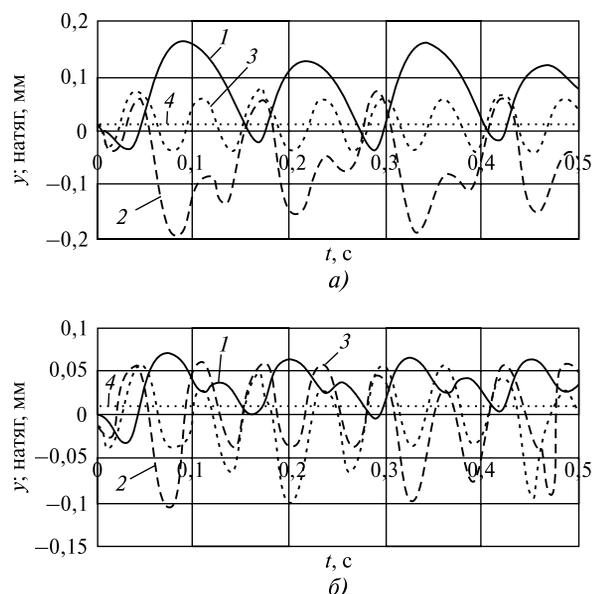


Рис. 4. Графическое решение уравнения (2):

$a$  — при  $\omega = 100$  рад/с;  $b$  — с нелинейностью (3) при  $\omega = 100$  рад/с; 1 — траектория вершины инструмента; 2 — натяг инструмента при вращении детали (динамический); 3 — траектория кромки детали; 4 — предварительный натяг (статический)

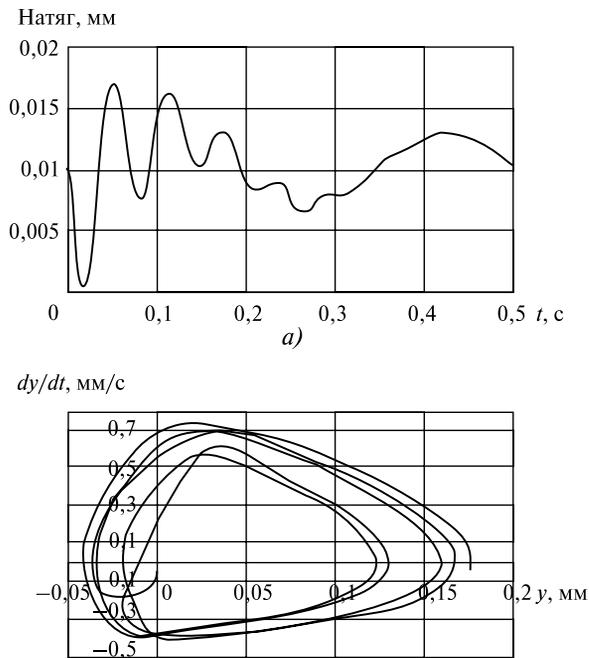
мм;  $\delta$  — биение детали, мм;  $\omega$  — угловая скорость детали, рад/с;  $E$  — жесткость материала детали на единицу площади деформирования, Н/мм<sup>3</sup>;  $S$  — площадь пятна контакта деталь—инструмент, мм<sup>2</sup>;  $\Delta_1$  — предварительный натяг инструмента в деталь, мм;  $\operatorname{sign}()$  — единичная функция, описывающая наличие силового воздействия поверхности детали на инструмент в случае контакта и его отсутствие при отрыве инструмента от детали.

Для того чтобы выявить зависимость деформации  $y$  во время соприкосновения инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки и зависимость  $y$  от изменения предварительного натяга пружины  $\Delta$ , выполнено моделирование процесса выглаживания с применением пакета MathCAD.

Для значений  $\omega = 100$  рад/с;  $c = 1000$  Н/мм;  $v = 200$  Н/(мм/с);  $\delta = 0,05$  мм;  $\Delta_1 = 0,01$  мм;  $ES = 100$  кН/мм;  $\Delta = 1$  мм результаты расчета приведены в графическом виде на рис. 4,  $a$ . Здесь же в тех же масштабах времени и перемещений построен график функции  $y_1(t) = \Delta_1 - \delta \sin \omega t$ , показывающий положение кромки детали, вращающейся с биением.

В процессе вычислений автоматически определяется значение натяга инструмента в динамике ("+" — натяг, "-" — зазор). Поэтому интересно исследовать динамику изменения натяга. Кривая изменения натяга, построенная в одном и том же масштабе времени, может дать интересные сведения о динамике процесса.

Анализ изменения натяга в процессе с угловой скоростью  $\omega = 100$  рад/с (см. рис. 4,  $a$ ) показывает невоз-



**Рис. 5. Решение уравнения (2):**

*a* — изменение натяга в процессе выглаживания при  $\omega = 20$  рад/с;  
*б* — фазовый портрет уравнения при  $\omega = 100$  рад/с

возможность работы на таких частотах вращения деталей, поскольку контакт инструмента и детали не постоянный, а возникает периодически.

При угловой скорости  $\omega = 20$  рад/с и таких же значениях остальных параметров натяг существует постоянно (рис. 5, *a*), однако максимальное значение натяга смещено по фазе от максимального приближения поверхности детали к инструменту несколько больше, чем на половину периода, амплитуда колебаний натяга составляет  $\pm 0,0025$  мм. Это вызвано инерционностью системы установки инструмента. Поэтому максимальный натяг будет в зоне наибольшего удаления детали от вершины инструмента и, наоборот, минимальный натяг — в зоне наибольшего приближения. При работе такая система будет уменьшать биение детали, а возможно, даже увеличивать.

Изменяя параметры дифференциального уравнения (2), а следовательно, и реальной системы, можно изменять относительный сдвиг кривых натяга и таким образом непосредственно влиять на изменение формы детали.

При использовании гидравлических демпфирующих устройств демпфирующий член уравнения может иметь вид  $c\dot{y}^2$ . В уравнении (2) принято допущение, что площадь пятна контакта не изменяется в процессе изменения натяга. Однако при обработке тороидальным или сферическим инструментом с небольшими радиусами ( $r \leq 3$  мм) образующих поверхностей и незначительными натягами площадь пятна контакта может изменяться приблизительно пропорционально квадрату или даже кубу натяга:

$$S \approx k(1 + \Delta_1 - y - \delta \sin \omega t)^3. \quad (3)$$

Подстановка двух нелинейностей:  $c\dot{y}^2$  и (3) в уравнение (2) существенно усложняет его анализ. В формуле (3) коэффициент  $k$  принят равным единице. Численное решение уравнения (2) с нелинейностью (3) при  $k \approx 1$  и  $\omega = 100$  рад/с приведено на графике функции  $y = y(t)$ , показанном на рис. 4, *б*.

Анализ решения уравнения (2) с учетом нелинейностей свидетельствует, что это уравнение более правдоподобно отражает поведение реальной системы: поскольку натяг инструмента не может быть больше нескольких сотых долей миллиметра, модель с учетом нелинейностей в большей степени отражает реальный процесс.

Последующий анализ экспериментальных данных и уточнение уравнения (2) позволят создать модель, адекватную реальному процессу. Однако и приведенные на рис. 4 и 5 графики могут помочь уточнить модель, определить уравнение периодического решения, а следовательно, спектр частот, приведенную массу системы и т.д.

Решив для каждого отдельного участка движения соответствующее уравнение, предварительно задавшись рядом различных начальных условий, можно построить семейство фазовых траекторий — лист фазовой плоскости. Каждая из фазовых траекторий данного листа изображает движение инструмента в процессе выглаживания для заданных начальных условий (рис. 5, *б*). Рассматривая движение изображающей точки для различных условий системы, можно выявить так называемые особые точки, а также устойчивые и неустойчивые предельные циклы.

Одним и тем же условиям процесса выглаживания соответствуют два случая:

процесс устойчив, инструмент при небольших возмущениях возвращается в состояние равновесия;

процесс неустойчив, инструмент совершает автоколебательное движение с постоянными частотой и амплитудой.

Анализ фазовых траекторий (см. рис. 5, *б*) показывает, что система, описываемая уравнением (2), имеет устойчивое положение равновесия, представляющее собой асимптотически устойчивый предельный цикл, и при любом отклонении начальных условий она с течением времени выходит на этот цикл. Указанный предельный цикл характеризует наличие в системе устойчивых периодических колебаний, к которым система приходит вне зависимости от начального отклонения.

Многолиственный фазовый портрет позволяет определить характер колебательного движения инструмента при любых начальных условиях [13—15].

Представленная математическая модель процесса выглаживания дает возможность получать требуемое качество поверхности благодаря обоснованному выбору параметров технологической системы.

### Устойчивость процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей динамическими методами ППД

К одним из наиболее эффективных методов ППД деталей машин относятся методы ударно-импульсной обработки (рис. 6). К достоинствам этих методов можно отнести [6, 8, 12]:

1. Универсальность, выражающуюся в возможности применения одного и того же инструмента для обработки деталей в широком диапазоне размеров и самых разнообразных по форме (цилиндрических, плоских, фасонных и т.д.).
2. Простота конструкции инструментов, дешевизна их изготовления.
3. Возможность упрочнения обрабатываемого металла на значительную глубину при небольших усилиях, что обеспечивает повышение статической и усталостной прочности изделий.
4. Ввиду незначительности действующих на технологическую систему усилий представляется возможным эффективно обрабатывать нежесткие и неравножесткие детали.
5. Малая высота неровностей обработанной поверхности при наиболее рациональном рельефе микропрофиля.

К инструментам импульсного действия относятся инструменты с пружинным приводом (рис. 7) и



Рис. 6. Классификация и область применения импульсных методов обработки инструментами ударного действия

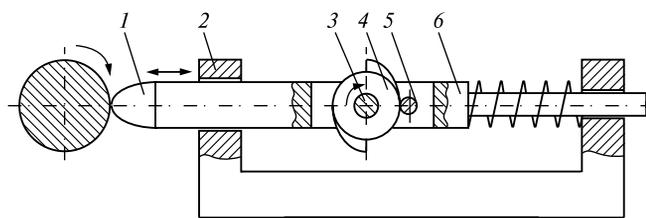


Рис. 7. Схема работы ударно-импульсного инструмента с пружинным приводом:

1 — ударник; 2 — корпус; 3 — вал привода; 4 — кулачок; 5 — упор; 6 — шток

устройства для поверхностного упрочнения деталей с эксцентриковыми упрочнителями.

Характерной особенностью процессов импульсного (динамического) действия является отсутствие в процессе обработки постоянного контакта между рабочей поверхностью деформирующего инструмента и поверхностью заготовки.

При анализе виброударных процессов отделочно-упрочняющей обработки одним из главных критериев их выбора являются реализуемые режимы движения [13—17]. Рассмотрим обобщенную динамическую схему движения деформирующего инструмента, представленного в виде поступательно движущегося тела массой  $m$ , на которое действует некоторое переменное во времени возмущение. При движении инструмента происходят его удары с поверхностью обрабатываемой детали, положение которой определяется координатой  $x_c$ .

Движение рассматриваемой системы опишем уравнениями

$$m\ddot{x} = P(t); \quad x(t_0) = x_0; \quad \dot{x}(t_0) = \dot{x}_0;$$

$$P(t) = \begin{cases} P_1, & (n-1)T \leq t < (n-1)T + t_1; \\ P_2, & (n-1)T + t_1 \leq t < nT; \end{cases}$$

$n = 1, 2, \dots$ ; при  $x = x_c$ , если  $\dot{x} > 0$ , то  $\dot{x}^+ = -R\dot{x}^-$ .  
Здесь  $P_1, P_2$  — силы, действующие на массу  $m$  в направлении поверхности обрабатываемой детали и в обратном направлении соответственно;  $T$  — период силового воздействия;  $t_1$  — длительность действия силы  $P_1$ ;  $n$  — номер цикла силового воздействия;  $x_0$  — координата массы в начальный момент времени, при  $t = t_0$ ;  $\dot{x}_0$  — скорость ударной массы в начальный момент времени;  $x_c$  — координата поверхности обрабатываемой детали;  $\dot{x}^+$  — скорость ударной массы перед столкновением с обрабатываемой поверхностью;  $\dot{x}^-$  — скорость ударной массы после столкновения с обрабатываемой поверхностью;  $R$  — коэффициент восстановления скорости при ударе ( $0 < R < 1$ ).

Методом приспособывания решений дифференциальных уравнений, описывающих смежные интервалы движения, разделенные моментом удара, построены аналитические зависимости, определяющие параметры движения на различных интервалах [15, 16]. Время нанесения первого удара  $t_{c1}$  и предударная скорость  $(\dot{x}(t_{c1}))^-$  могут быть найдены с помощью зависимостей

$$t_{c1} = t_0 + \frac{-\dot{x}_0 + \sqrt{\dot{x}_0^2 - 2A_1(x_0 - x_c)}}{A_1}, \text{ если } t_{c1} < t_1;$$

$$t_{c1} = t_1 + \frac{-\dot{x}(t_1) + \sqrt{\dot{x}^2(t_1) + 2A_2(x_c - x(t_1))}}{A_2}, \text{ если } t_{c1} \geq t_1;$$

$$(\dot{x}(t_{c1}))^- = \sqrt{\dot{x}_0^2 - 2A_1(x_0 - x_c)}, \text{ если } t_c < t_1;$$

$$(\dot{x}(t_{c1}))^- = \sqrt{\dot{x}^2(t_1) + 2A_2(x_0 - x_c)}, \text{ если } t_c \geq t_1,$$

где  $A_1 = P_1/m$ ;  $A_2 = P_2/m$ ;  $x(t_1)$ ,  $\dot{x}(t_1)$  — координата и скорость ударной массы соответственно в момент переключения силы.

Если удар происходит до момента переключения силы:  $t_{c1} < t_1$ , то удар тела об обрабатываемую поверхность детали может многократно повторяться на интервале  $t_{c1} < t < t_1$ . Если в первой фазе действия силы в момент времени  $t = t_{ci}$  происходит  $i$ -й удар, то на интервале  $t_{ci-1} \leq t \leq t_i$

$$\dot{x}(t) = (\dot{x}(t_{ci-1}))^+ + A_1(t - t_{ci-1});$$

$$x(t) = x_c + (\dot{x}(t_{ci-1}))^+(t - t_{ci-1}) + \frac{1}{2}A_1(t - t_{ci-1})^2,$$

где  $t_{ci-1}$  — время нанесения  $(i - 1)$ -го удара;  $(\dot{x}(t_{ci-1}))^+ = -R(\dot{x}(t_{ci-1}))^-$  — скорость ударной массы после нанесения  $(i - 1)$ -го удара, являющаяся начальной скоростью ее движения на интервале  $t_{ci-1} \leq t \leq t_i$ .

Время между двумя последовательными ударами обратно пропорционально послеударной скорости предыдущего удара и с ее ростом уменьшается в геометрической прогрессии. Возникает явление дребезга. Координата ударной массы интенсивно стремится к  $x_c$ . Общее время таких соударений при числе соударений, стремящемся к бесконечности, конечно и определяется как

$$t_{c\infty} = t_{c1} + \frac{2R}{A_1(1-R)}(\dot{x}(t_{c1}))^-.$$

Если  $t_{c\infty} < t_1$ , то многократно-ударный режим дви-

жения ударной массы заканчивается еще в первой фазе действия силы  $P(t)$  и следует переходить к рассмотрению движения во второй фазе действия при начальных условиях  $x(t_1) = x_c$ ,  $\dot{x}(t_1) = 0$ .

Если неравенство  $t_{c\infty} < t_1$  не выполняется, возникает необходимость определения конечного числа ударов  $i$  ударной массы о поверхность обрабатываемой детали до начала второй фазы действия силы  $P(t)$ :

$$i = \frac{\ln \left[ 1 - \frac{t_1 - t_{c1}}{a_1} \right]}{\ln R} + 1; \quad a_1 = \frac{2}{A_1} R (\dot{x}(t_{c1}))^-.$$

При режиме многократных ударов скорость каждого последующего удара интенсивно уменьшается по закону геометрической прогрессии, причем  $(\dot{x}(t_{ci}))^- = R^{i-1}(\dot{x}(t_{c1}))^-$ . Так как  $R < 1$ , то  $R^{i-1}$  при  $i \rightarrow \infty$  стремится к нулю. Если рассмотреть отношение  $\dot{x}^-(t_{ci})/\dot{x}^-(t_{c1}) = R^{i-1}$ , то становится очевидным, что отношение скорости удара на  $i$ -м соударении к предударной скорости первого удара при достаточно большом числе соударений малая величина. Если задаться величиной этой малости  $\varepsilon$  и полагать, что

$$(\dot{x}(t_{ci}))^- = \begin{cases} (\dot{x}(t_{ci}))^-, & \text{если } R^{i-1} \geq \varepsilon; \\ 0, & \text{если } R^{i-1} < \varepsilon, \end{cases}$$

то можно определить минимальное число ударов  $i_{\min}$ , после которого следует считать, что ударная масса находится в покое у поверхности обрабатываемой детали, пока  $t < t_1$ :  $i_{\min} = \ln \varepsilon / \ln R + 1$ .

Эти решения положены в основу алгоритма моделирования процесса отделочно-упрочняющей обработки деталей виброударными методами ППД с учетом явления дребезга.

Блок-схема алгоритма моделирования устойчивости процесса ударно-импульсной обработки представлена на рис. 8.

Важным моментом анализа функционирования системы является определение максимальной скорости удара. Фиксируется первый удар на протяжении каждого периода действия сил. При этом происходит запись номера эксперимента, номера периода, предударной скорости, времени нанесения удара в соответствующую связанную таблицу БД. Эти данные используются для вывода результатов моделирования, для воспроизведения их в виде диаграмм координаты, скорости и ускорения (рис. 9). На экране монитора реализуется анимационный процесс движения ударной массы, воспроизводятся диаграммы положения  $x$ , ско-



Рис. 8. Блок-схема алгоритма моделирования устойчивости процесса ударно-импульсной обработки

рости  $v$  и ускорения  $A$  ударной массы, а также фазовая диаграмма  $v = v(x)$  движения ударной массы (рис. 10).

Для оценки выхода ударной системы на установившийся режим движения помимо визуальных оценок посредством активации граничной линии, проходящей через множество точек максимальных значений предударных скоростей  $V_p$ , осуществляется статистический анализ числовой последовательности предударных скоростей. Этот анализ позволяет осуществлять строгую математическую констатацию выхода системы на установившийся

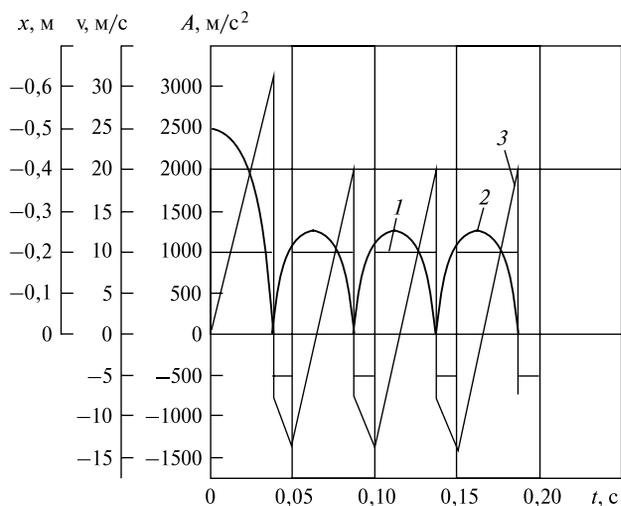


Рис. 9. Диаграммы положения  $x$  (1), скорости  $v$  (2) и ускорения  $A$  (3) ударной массы

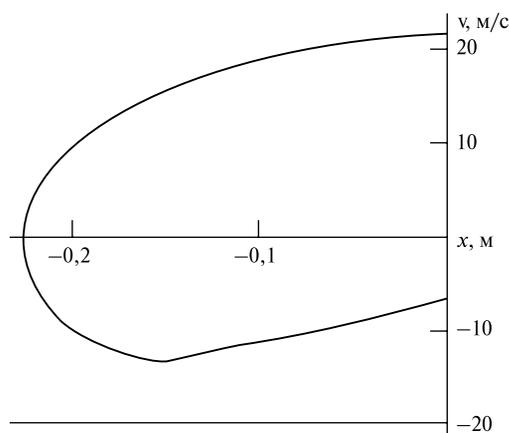


Рис. 10. Фазовая диаграмма  $v = v(x)$  движения ударной массы

режим движения с заданным уровнем отклонения числовых значений, не превышающих малую величину  $\epsilon$ .

Устойчивость процесса движения анализируется путем оценки сходимости ряда в виде числовой последовательности разницы предыдущего и текущего значений предударных скоростей с использованием критерия Коши. Сформулируем этот критерий для рассматриваемого процесса: чтобы ряд суммы чисел

$$\left( \sum_0^n (V_i - V_{i-1}) + \dots \right)$$

сходилась, необходимо и достаточно, чтобы последовательность его частичных сумм  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  обладала следующим свойством: какова бы ни была величина  $\epsilon > 0$ , существует такое  $n$ , чтобы при любом  $m \geq 0$  выполнялось условие  $|s_{n+m} - s_n| < \epsilon$ .

Таким образом, рассмотрена обобщенная динамическая модель движения ударного инструмента, представленного в виде поступательно движущегося тела массой  $m$ , с соударениями с поверхностью обрабатываемой детали и периодической воздействующей силой.

Разработана процедура моделирования процесса движения ударного инструмента при периодическом силовом воздействии с учетом возможных многократных ударов (явления дребезга) за период силового воздействия. Решение этой задачи найдено путем определения минимального числа последовательных ударов, превышение которого позволяет с заданным уровнем погрешности отсекал следующие малые перемещения ударника и определять начальные значения для следующего цикла движения.

Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс для моделирования движения виброударного инструмента с учетом соударений, разрывных функций силового воздействия на объект, явления дребезга, графическим и числовым воспроизведением параметров движения в процессе моделирования с фиксированием длительности переходных процессов и предельных циклов движения.

Для оценки выхода ударной системы на установившийся режим движения помимо визуальных оценок

осуществляется статистический анализ числовой последовательности предупредных скоростей, по результатам которого делается заключение о наличии или отсутствии установившегося режима.

Устойчивость процесса движения анализируется путем оценки сходимости ряда в виде числовой последовательности разницы предыдущего и текущего значений предупредных скоростей с использованием критерия Коши при выборке чисел и расчете частичных сумм для большого объема циклов, на порядок или на два порядка превышающего реальное число циклов для гарантированной констатации устойчивости процесса.

На основании экспериментальных исследований по определению влияния на динамику эксцентрикового упрочнителя отдельных параметров кинематики и динамики процесса установлено, что энергия системы, теряемая при ударе на совершение пластической деформации обрабатываемого материала, складывается из изменения кинетической энергии поступательного движения системы и изменения кинетической энергии вращающейся эксцентриковой массы. При практических расчетах максимальную контактную силу и длительность переднего фронта ударного импульса можно определять по упрощенной методике, не требующей специальной регистрирующей аппаратуры.

Исследование динамики процесса ударно-импульсной обработки инструментом с пружинным приводом раскрывает закономерности протекания процесса для различных стадий работы устройства, позволяет в полной мере использовать технологические возможности этого процесса при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей различных деталей.

### Выводы

Исследования устойчивости процессов отделочно-упрочняющей обработки показали, что природа потери устойчивости для статических и динамических методов ППД различна. Это следует учитывать при разработке математических моделей управления устойчивостью процессов ППД.

Выполненные исследования показали следующее:

Несмотря на многообразие процессов ППД они могут описываться математическими моделями, имеющими общую структуру, что позволяет совершенствовать эти процессы, создавать автоматизированные системы проектирования технологических процессов упрочняющей обработки деталей машин методами ППД.

Управляемость и устойчивость технологических процессов обработки деталей методами ППД зависит от режимов обработки и динамических свойств технологической системы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 311 с.
2. **Попов М.Е.** Расчет усилий и деформаций при выглаживании поверхностей // Вестник машиностроения. 1975. № 8. С. 41—46.
3. **Обеспечение** требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: Учеб. пособие / В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц, В.Ф. Губанов, А.Г. Схиртладзе. Курган: Изд-во Курганского ун-та, 2005. 85 с.
4. **Попов М.Е.** Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки: Учеб. пособие. Ростов-н/Д., РИСХМ, 1987. 91 с.
5. **Попов М.Е.** Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием осциллирующим инструментом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 11. С. 3—9.
6. **Технологические** процессы поверхностного пластического деформирования / М.Е. Попов и др.; под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2007. 404 с.
7. **Попов М.Е.** Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 7. С. 11—19.
8. **Технология** экспериментальных исследований / М.Е. Попов и др.; под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2011. 580 с.
9. **Попов М.Е., Абухарб М.** Поддержка принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 5. С. 7—15.
10. **Деформирующая** обработка валов / М.Е. Попов и др.; под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во НИ ИргТУ, 2013. 540 с.
11. **Обработка** деталей поверхностным пластическим деформированием / М.Е. Попов и др.; под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во НИ ИргТУ, 2014. 560 с.
12. **Попов М.Е.** Упрочняющая обработка деталей поверхностным пластическим деформированием ударно-импульсным инструментом с пружинным приводом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 8. С. 10—23.
13. **Бидерман В.Л.** Теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.
14. **Пластическая** деформация как волновой процесс / В.Е. Панин, Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, Н.М. Мних // Доклад АН. № 2. 1999. С. 1375—1379.
15. **Манжосов В.К., Новиков Д.А.** Моделирование режимов движения виброударной системы при периодическом силовом воздействии // Изв. Саратов. ун-та: Сер. Математика. Механика. Информатика. Вып. 4. Т. 10. 2010. С. 65—71.
16. **Манжосов В.К., Новиков Д.А.** Управление процессом моделирования движения объекта с ударами о преграду // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 211—217.
17. **Нагаев Р.Ф.** Механические процессы с повторными затухающими соударениями. М.: Наука, 1985. 200 с.

М.А. Тамаркин, Д.В. Казаков, А.С. Шведова, Р.В. Гребенкин  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## Повышение надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования

Рассмотрены процессы обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) с точки зрения повышения их надежности. Выявлены факторы, оказывающие доминирующее влияние на производительность и качество обработки. Представлены усовершенствованные теоретико-вероятностные модели процесса формирования качества поверхностного слоя при обработке динамическими методами ППД. На основании результатов теоретических исследований предложены зависимости влияния основных технологических параметров центробежно-ротационной обработки (ЦРО) и вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) на шероховатость обработанной поверхности, глубину упрочненного слоя и степень упрочнения. Произведены расчеты влияния допусков основных параметров качества поверхностного слоя и технологических режимов ЦРО на коэффициенты смещения, мгновенного рассеивания и запаса точности, которые характеризуют надежность технологических процессов обработки. По результатам расчетов построены графики. Полученные модели могут быть использованы для аналитического прогнозирования параметров надежности технологических процессов обработки. Пользуясь представленной методикой, можно при выборе технологических режимов обработки найти такое их сочетание, которое позволит надежно обеспечить требуемое качество обрабатываемых деталей.

**Ключевые слова:** надежность технологического процесса, показатели надежности, динамические методы поверхностного пластического деформирования, параметры качества поверхностного слоя.

The article examines the processes of machining dynamic methods of surface plastic deformation (SPD) in terms of improving their reliability. The factors that have a dominant influence on the performance and quality of processing. The paper presents the improved probability-theoretic model of the formation of the quality of the surface layer in the processing by dynamic methods of SPD. Based on the results of theoretical studies suggested depending influence of the main technological parameters of centrifugal rotary processing (CRP) and vibratory finishing and hardening treatment for surface finish, hardened layer depth and degree of hardening. Calculations of the effect of tolerances main quality parameters of the surface layer and technological regimes centrifugal rotary processing on the value of the offset coefficient, instantaneous dispersion and stock accuracy which characterize the reliability of technological processes. The calculations graphed. The resulting model can be used for analytical prediction reliability parameters of technological processes. Using the method presented, the choice of technology can be processing modes to choose a combination thereof, which will ensure the required quality of machined parts.

**Keywords:** process safety, reliability, dynamic methods of surface plastic deformation, the quality parameters of the surface layer.

### Введение

Вопросы надежности технологических процессов (ТП) изготовления деталей приобретают все более высокую значимость в самых различных сферах человеческой деятельности. Особую значимость имеют решения задач, посвященных обеспечению надежности ТП в условиях промышленного производства, где целью является достижение необходимых качества изделий и производительности производственного процесса, с учетом ограниченности ресурсов и необходимости минимизации их затрат [1, 2].

Под надежностью технологического процесса понимают его свойство обеспечивать требуемое качество детали, получаемой обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров качества в установленных пределах [3, 4].

При рассмотрении технологического процесса с точки зрения надежности следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и их номинальных значений, которые заранее прописаны в конструкторской документации. Перед технологом стоит задача: без рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает достижение значения контролируемого параметра в пределах допуска и стабильность соблюдения этого условия.

Не менее важной, чем проблема обеспечения надежности ТП, является проблема увеличения жизненного цикла (ЖЦ) изделий, в частности такого этапа ЖЦ, как эксплуатация, на длительность которой, в первую очередь, влияют геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя деталей. Использование методов упрочнения поверх-

ностным пластическим деформированием — один из основных путей решения данной задачи. При использовании различных видов ППД на финишных этапах обработки происходит изменение шероховатости, обеспечивается упрочнение поверхностного слоя, создается благоприятная картина остаточных напряжений. Данные параметры поверхностного слоя оказывают воздействие на усталостную долговечность, которая, в свою очередь, влияет на продолжительность ЖЦ детали.

### Теоретическое исследование методов центробежно-ротационной и вибрационной отделочно-упрочняющей обработки

В настоящее время накоплен обширный промышленный опыт использования таких методов ППД, как центробежно-ротационная обработка (ЦРО) и вибрационная отделочно-упрочняющая обработка (ВиОУО).

Сущность метода ЦРО состоит в том, что гибкая обрабатываемая среда (абразивные частицы различной конфигурации, фарфоровые или стальные полированные шарики и т.д.) и обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру, состоящую из неподвижной цилиндрической вертикально расположенной обечайки и примыкающего к ней вращающегося дна. Обрабатываемая среда и детали приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры.

Процесс ВиОУО сопровождается последовательным нанесением на поверхности деталей большого количества микроударов частицами рабочей среды при их взаимных соударениях и скольжении. Удары вызваны действием колебаний, сообщаемых рабочей камере, смонтированной на упругих элементах и имеющей возможность колебаться в различных направлениях. Привод рабочей камеры получает от вибратора (обычно используется вал с несбалансированными грузами).

Высокая производительность и широкие технологические возможности — отличительная особенность данных методов. Процессы обработки с их использованием отличаются простотой оборудования, его малой металло- и энергоемкостью, а также большой номенклатурой обрабатываемых деталей сложной конфигурации и возможностью решения различных технологических задач.

На ход технологического процесса обработки могут оказывать влияние управляемые, трудноуправляемые и неуправляемые факторы. Вносить изменения в управляемые переменные может человек или система управления. Переменными, относящимися к техно-

логической системе, можно считать основные параметры режимов обработки, характеристики рабочих сред и обрабатываемых деталей. Несмотря на то что изменению могут быть подвержены все управляемые переменные, в каждом конкретном случае изменения должны быть целесообразными, обоснованными.

Влияние на ход производства управляемых факторов неравноценно. Доминирующее влияние на ход тех или иных операций оказывать может целый ряд факторов. Эффективность результата управления зависит от того, насколько точно удастся определить все множество указанных факторов, а также степень влияния каждого из них на протекание процесса. Ниже в качестве примера рассмотрен технологический процесс ЦРО, являющийся объектом управления. Управляющее устройство может быть представлено набором управляющих решений со следующими данными [5]:

1. Частота вращения ротора  $\gamma$ . Увеличение величины  $\gamma$  приводит к увеличению шероховатости поверхности и параметров упрочнения. Но также при повышении частоты вращения ротора, с одной стороны, происходит рост производительности обработки, а с другой — наблюдается формирование нестабильного тороидально-винтового потока гибкой обрабатываемой среды при значительном увеличении  $\gamma$ . Частоту вращения ротора необходимо выбирать исходя из поставленной задачи обработки и учитывать при теоретических расчетах.

2. Объем подаваемой технологической жидкости  $V_{ТЖ}$ . Уменьшение  $V_{ТЖ}$  отрицательно сказывается на стабильности тороидального потока.

3. Диаметр шарика  $D_{ш}$ . При увеличении  $D_{ш}$  увеличивается глубина упрочненного слоя, а показатели шероховатости поверхности ухудшаются.

Регулируя технологический процесс с помощью управляемых факторов, можно компенсировать влияние неуправляемых и трудноуправляемых факторов, добиться требуемых параметров качества деталей при условии повышения надежности ТП. Возникает необходимость в создании условий, которые способны обеспечить качество обрабатываемых деталей, соответствующее предъявляемым к ним техническим требованиям, в течение заданного времени.

Оценка надежности ТП может быть выполнена на уровне конкретных технологических процессов либо на уровне отдельной технологической операции.

Анализ надежности ТП проводят, применяя следующие показатели [3, 5]:

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_{\tau} = \frac{\omega_p}{T}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  — поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время;  $T$  — допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega_p = 6\sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \leq K_{T.o} \leq 1, \quad (3)$$

где  $K_{T.o}$  — нормативное (предельное, технически обоснованное) значение  $K_T$ .

2. Коэффициент мгновенного рассеяния (по контролируемому параметру)

$$K_p(\tau) = \frac{\omega_p(\tau)}{T}, \quad (4)$$

где  $\omega_p(\tau)$  — поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени  $\tau$ .

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{cm}(\tau) = \frac{\bar{\Delta}(\tau)}{T}, \quad (5)$$

где  $\bar{\Delta}(\tau)$  — среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени  $\tau$ ,

$$\bar{\Delta}(\tau) = |\bar{y}(\tau) - y_0|, \quad (6)$$

где  $\bar{y}(\tau)$  — среднее значение контролируемого параметра;  $y_0$  — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение  $y_0$  совпадает с номинальным значением параметра  $y_{ном}$ ).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_z(\tau) = 0,5 - K_{cm}(\tau) - 0,5K_p(\tau). \quad (7)$$

Для обеспечения надежности ТП должно выполняться условие

$$K_z(\tau) > 0. \quad (8)$$

Надежность достижения требуемых параметров зависит от допуска на эти параметры. Это один из основных факторов, который влияет на выбор способа обработки. Основная задача исследования направлена на определение влияния допусков на глубину упрочненного слоя, степень упрочнения и шероховатость обработанной поверхности детали при изменении основных технологических параметров на надежность технологического процесса ЦРО.

При проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки одной из основных задач является аналитический расчет ожидаемой степени упрочнения, шероховатости поверхности и глубины упрочненного слоя. При внедрении шарика в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток), вокруг которой всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину  $h_n$ . Аналитическое определение толщины упрочненного слоя и степени упрочнения в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Существующие математические зависимости были получены на основе теории упругости или пластичности после принятия многочисленных упрощений и допущений. Значительные исследования в этой области проведены И.В. Кудрявцевым, В.П. Пшибыльским, Д.Д. Папшевым, М.С. Дроздом и др. [6–8]. Использование зависимостей, определяющих глубину  $h_n$  проникновения пластической деформации, требует знания контактной нагрузки  $P$  и предела текучести  $\sigma_T$  материала детали. Однако в ряде случаев, особенно при ударном нагружении, определение  $P$  и  $\sigma_T$  затруднительно, ввиду чего желательно выразить  $h_n$  через параметры, легко вычисляемые или определяемые из опытов:

$$h_n = 4,3\sqrt[4]{ab} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{h}, \quad (9)$$

где  $a, b$  — полуоси эллипса контакта;  $h$  — максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали.

При ЦРО величина  $h$  определяется выражением [9]

$$h = 2V_{эф} R \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3k_s c \sigma_T}}, \quad (10)$$

где  $R$  — радиус шарика;  $\alpha$  — угол встречи шарика с поверхностью детали;  $\rho_{ш}$  — плотность материала шарика;  $c$  — коэффициент несущей способности контактной поверхности;  $k_s$  — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта;  $V_{эф}$  —

эффективная скорость движения шарика. При ЦРО  $V_{эф} = K_{эф} \gamma R_{эф}$ , где  $K_{эф}$  — коэффициент эффективной скорости;  $R_{эф}$  — эффективный радиус вращающегося ротора. При ВиОУО  $V_{эф} = K_{эф} Af$ , где  $A$  — амплитуда колебаний рабочей камеры;  $f$  — частота колебаний.

С учетом (10) после преобразований можно записать:

для ЦРО

$$h_n = 9,7 \sqrt[4]{\frac{ab\rho_{ш}}{k_s c \sigma_T}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{V_{эф} R \sin \alpha}; \quad (11)$$

для ВиОУО

$$h_n = 15,2 \sqrt[4]{\frac{ab\rho_{ш}}{k_s c \sigma_T}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{AfR \sin \alpha}. \quad (12)$$

Согласно [10] под степенью пластической деформации  $\varepsilon$  условно принимается отношение диаметра остающейся от вдавливания лунки  $d$  к диаметру вдавливаемой сферы  $D$ :

$$\varepsilon = \frac{d}{D}. \quad (13)$$

Учитывая зависимости, полученные в работе [7], для случая вдавливания индентора в деформированное полупространство можно записать формулу

$$d = \left( \frac{DE_y}{0,1HD} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

где  $E_y$  — энергия удара индентора; HD — динамическая твердость материала детали [6].

Для ЦРО и ВиОУО

$$E_y = \frac{m_{ш} V_{эф}^2}{2}, \quad (15)$$

где  $m_{ш}$  — масса шарика.

Учитывая (14), а так же то, что  $HD = 1,7 HB$  [6], после преобразований получим следующие зависимости:

для ЦРО

$$\varepsilon = 2,03 \sqrt[4]{\frac{R^2 \gamma^2 \rho_{ш}}{HB}}; \quad (16)$$

для ВиОУО

$$\varepsilon = 17,86 \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{HB}} \sqrt{Af}, \quad (17)$$

где HB — твердость материала детали по Бринеллю.

Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra_{уст}$  при ЦРО можно рассчитать по зависимости (18) [11]

$$Ra_{уст} = 0,006 k_3 \sqrt{\frac{habl_{ед}}{R^2}}, \quad (18)$$

где  $k_3$  — коэффициент загрузки рабочей камеры;  $l_{ед}$  — единичная длина, а при ВиОУО — по зависимости

$$Ra_{уст} = 0,0022 \sqrt{\frac{habl_{ед}}{R^2}}. \quad (19)$$

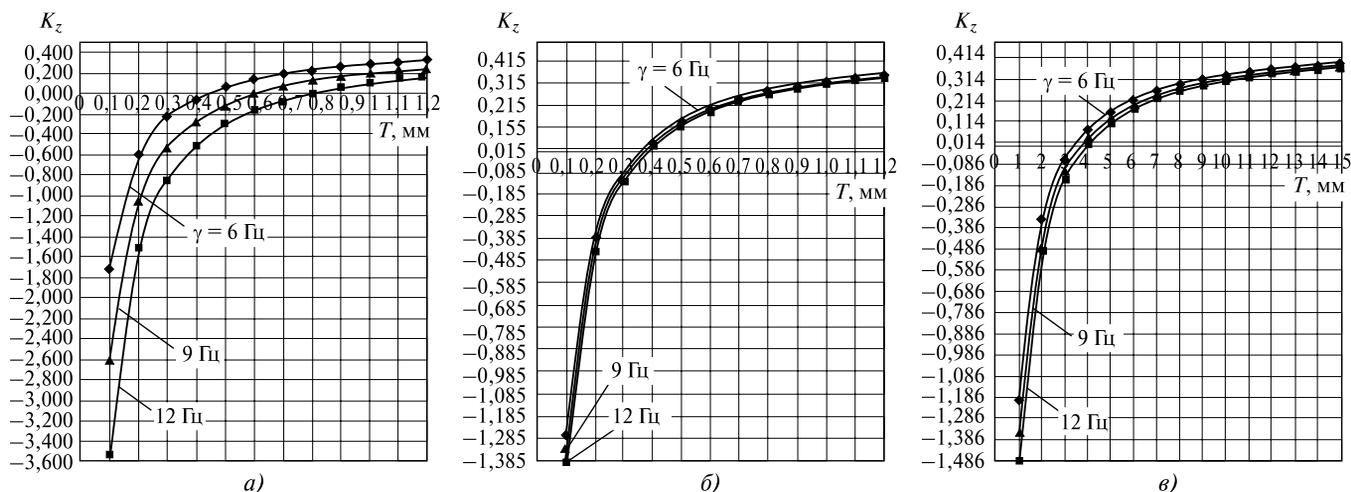
С использованием комплекса теоретических моделей отделочно-упрочняющей ЦРО проведены расчеты коэффициентов, характеризующих надежность технологических процессов обработки, результаты которых позволили определить влияние изменения режимов обработки и характеристик рабочих сред при различных допусках на контролируемые параметры (установившуюся шероховатость обработанной поверхности, степень упрочнения и глубину упрочненного слоя) на надежность их обеспечения. Допуски контролируемых параметров варьировались в широких пределах с шагом, позволяющим учесть различные варианты встречающихся на практике отклонений.

В результате выполнения теоретических расчетов построены зависимости влияния частоты вращения ротора, диаметра шарика и допуска параметров шероховатости на надежность ТП ЦРО. Исследования влияния допусков на значения шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени упрочнения проводились для стали 45. На рисунке приведены полученные зависимости.

### Заключение

Анализируя результаты проведенных расчетов, можно сделать вывод, что при увеличении допуска на контролируемый параметр надежность технологических процессов динамических методов ППД повышается даже при отклонении регламентированных значений технологических параметров в определенных пределах.

С использованием полученных зависимостей разработана методика аналитического прогнозирования



Влияние значения допуска  $T = 0,1 \dots 1,2$  мкм с шагом  $0,1$  мкм изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора  $\gamma$  на надежность ТП ЦРО в среде стальных шариков диаметром  $4$  мм. Частота вращения ротора  $\gamma$  равна  $6, 9$  и  $12$  Гц с разбросом  $15\%$ ; материал—сталь  $45$ :

$a$  — контролируемый параметр — шероховатость поверхности  $Ra$ ;  $b$  — контролируемый параметр — глубина упрочнения  $h_n$ ;  $v$  — контролируемый параметр — степень упрочнения  $\epsilon$

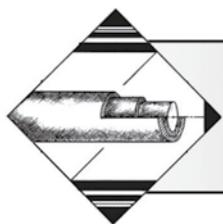
надежности технологического процесса. При назначении технологических режимов обработки необходимо выбрать такие, которые позволят надежно обеспечить требуемое качество поверхностного слоя, стабилизировать его достижение и увеличение ЖЦ деталей даже при определенных отклонениях этих режимов от требуемых значений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г. Основы теории надежности. Ростов-н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2002. 182 с.
2. Коу Takasava. Tsuneo Mokdeu Tackling Tribology and Burr Technology based on Precession Desing — A Carreer of Original Reserch // Proceeding of the 7-th International Conference on Deburring and Surface Finishing. University of California at Barclav. 2004. P. 239—249.
3. Дубровский П.В. Обеспечение надежности технологических процессов. Ульяновск, УлГТУ, 2000. 124 с.
4. Григорьян Г.Д. Элементы надежности технологических процессов. Киев: Головное издательство, 1984. 214 с.
5. Корольков Ю.В. Обеспечение надежности технологических процессов центробежно-ротационной обработ-

ки свободным абразивом // Вестник ДГТУ. 2011. № 8. С. 1247—1254.

6. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
7. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом / И. В. Кудрявцев и др. М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. 144 с.
8. Пшебыльский В.П. Технология поверхностной пластической обработки. М.: Металлургия, 1991. 476 с.
9. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебедеко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник Донского государственного технического университета. Т. 09. № 3. 2009. С. 469—480.
10. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом // Повышение долговечности деталей машин методами поверхностного наклепа. Тр. ЦНИИТМАШ. Вып. 108. 1965. С. 6—34.
11. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Технологические основы обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах // Научно-технические основы в машиностроении и авиастроении: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. Рыбинск. 2012.



# ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9.048.6

Ю.П. Анкудимов, М.М. Чаава, Ю.Г. Чернега  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: tm\_tfdgtu@mail.ru

## Применение комплексного энергетического воздействия для модифицирования поверхностного слоя стальных деталей методом вибрационной обработки

*Предложены схемы вибрационной обработки, позволяющие воздействовать на поверхность обрабатываемых деталей механической, тепловой, химической и электрической энергиями в целях образования защитных и упрочненных слоев металла.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, комплексное энергетическое воздействие, модифицирование поверхности.*

*Schemes are proposed for vibratory treatment possible to influence the surface of processed details mechanical, thermal, chemical and electrical energies in order to form protective and hardening metal layers.*

**Keywords:** *vibromechanical treatment, complex power influence, modification of the surface.*

### Введение

Технологические особенности вибрационной обработки (ВиО) позволяют отнести ее к методам упрочнения свободными гранулированными средами с заданными свойствами. При ВиО на обрабатываемую поверхность воздействуют механическими ударами частиц рабочей среды и низкочастотными колебаниями заданной интенсивности (в диапазоне частот 15...50 Гц).

В базовом процессе [1] детали свободно загружаются или устанавливаются в рабочую камеру, совершающую гармонические колебания на упругих элементах под действием возмущающей силы, создаваемой механическим или электромагнитным вибратором. В рабочую камеру помещается также обрабатывающая среда. Под действием колебаний стенок камеры частицы обрабатывающей среды совершают "быстрые" периодические перемещения в возникающих динамических зазорах и "медленное" циркуляционное движение за счет эффекта вибротранспортирования. Первое движение обеспечивает ударное воздействие частиц рабочей среды на поверхность деталей, что ведет к поверхностно-пластическому деформированию материала детали, а второе — равномерное распределение следов динамического воздействия по обрабатываемой поверхности с получением однородности ее свойств и показателей качества.

Технологические возможности вибрационной обработки во многом определяются составом и свойствами обрабатывающих сред. В последние годы ВиО находит применение не только как отделочно-упрочняющая обработка, но и как метод нанесения модифицирующих механохимических и термодиффузионных покрытий [2—6].

### Комбинированные схемы ВиО

Согласно современным представлениям о путях получения комплекса физико-механических и химических свойств деталей, ответственных за их сопротивление износу, усталостному и коррозионному разрушениям, перспективным является использование в технологических процессах различных видов энергии и схем их воздействия на детали.

На основе изучения основных закономерностей комбинированных методов металлообработки разработан ряд схем ВиО с подводом дополнительной тепловой, электрической и химической рабочих энергий в зону контакта обрабатывающей среды с деталями. Данные схемы являются основой для создания конструкций вибрационных станков и дополнительных устройств к ним, позволяющих существенно расширить перечисленные выше технологические возможности вибрационной обработки.

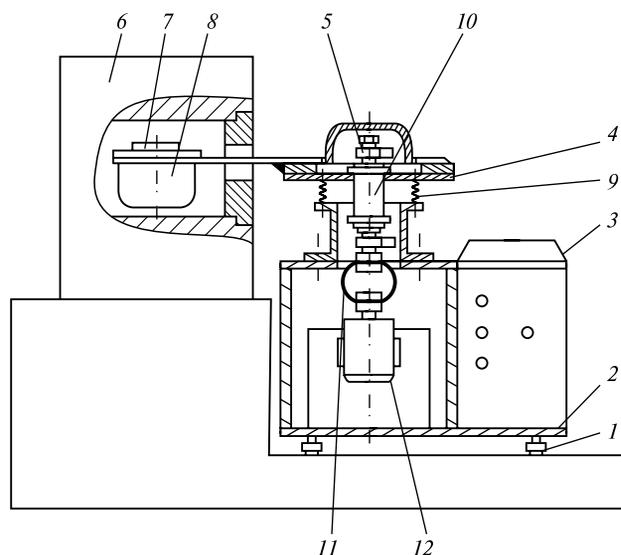
Схемы подвода рабочей энергии в зону обработки (к обрабатываемой среде и деталям) обуславливают распределение воздействующей энергии в пространстве и во времени (таблица). На рис. 1, 2 представлены конструкции вибрационных станков с дополнительно вводимыми в рабочую зону при ВиО тепловой, химической и электрической энергиями.

Схемы подвода рабочей энергии в зону обработки при ВиО

Вид рабочей энергии	Распределение энергии		Схема
Тепловая	Объемное, поверхностное	Непрерывное, дискретное	Рис. 1, 2
Химическая	Поверхностное	Непрерывное, дискретное	Рис. 1, 2
Электрическая	Поверхностное	Дискретное	Рис. 2

Вибрационный станок, представленный на рис. 1, позволяет осуществлять постоянный разогрев рабочей камеры до нужной температуры и поддержание ее на этом уровне в течение цикла обработки.

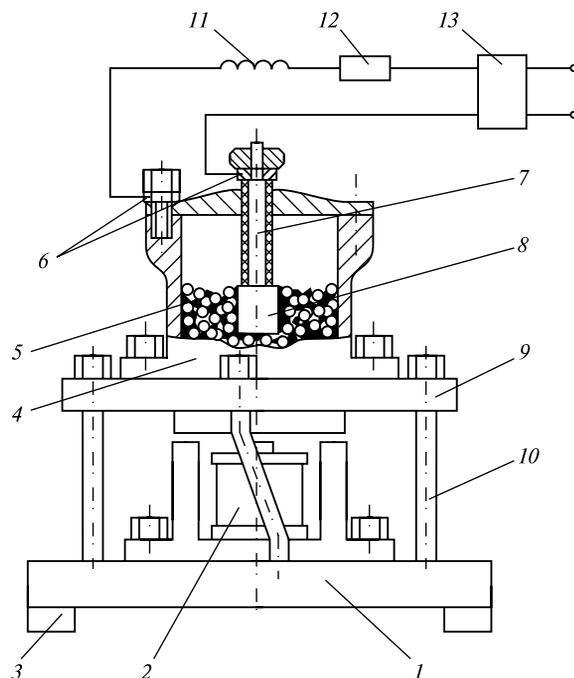
Источником вибрации служит вибратор 10, вал которого соединен с электродвигателем 12 через гибкую муфту 11. Вал вибратора с двумя дебалансами 5 крепится вертикально на виброплощадке 4. Роль упругих элементов выполняют пружины 9, способствующие снижению динамических нагрузок на основании станка 2. Для гашения вибраций служат также виброопоры 1 (амортизаторы). Рабочая камера 8 устанавливается в кольцо, закрепленном на консоли виброплощадки станка. Герметично закрытая пробкой 7 камера с рабочей средой и деталями помещается в муфельное про-



**Рис. 1. Схема вибрационного станка для ВиМХТО:**  
1 — виброопора; 2 — станина; 3 — пульт управления; 4 — виброплощадка; 5 — дебаланс; 6 — электропечь сопротивления; 7 — пробка; 8 — камера; 9 — пружина; 10 — вибратор; 11 — гибкая муфта; 12 — электродвигатель

странство электропечи 6. Поддержание необходимого уровня температуры в рабочей камере осуществляется при помощи терморегулятора на панели управления электропечи. Режимы обработки контролируются с пульта управления 3 вибрационного станка и находятся в следующих пределах: круговая (горизонтальная) амплитуда колебаний — 0...3 мм; вертикальная амплитуда колебаний — 0...2 мм; частота колебаний — 25...33 Гц; температура внутри камеры — 120...400 °С.

Повышенная температура в зоне обработки влияет на результат контактного взаимодействия компонентов внутри рабочей камеры. Так, при увеличении пластичности материалов повышается их степень деформации и ее глубина. С поверхности удаляется влага, выгорают органические пленки и наслоения, что дополнительно активизирует возникающие при деформировании ювенильные участки поверхности. Все эти процессы ведут к возникновению явления схватывания — соединению разнородных материалов в твердой фазе под совместным воздействием тепловой и механической энергий. Дополнительное введение в рабочую камеру химически активных сред, порошкообразных и газообразных составов при определенных условиях инициирует диффузионные явления в поверхностном слое обрабатываемых деталей. Вибрационную обработку в таких условиях мы назвали вибрационная механохимико-термическая обработка (ВиМХТО).



**Рис. 2. Схема вибрационного станка при ВиЭФО:**  
1 — основание; 2 — электромагнитный вибратор; 3 — виброопора; 4 — рабочая камера; 5 — рабочая среда; 6 — электроконтакты; 7 — оправка; 8 — обрабатываемая деталь; 9 — виброплощадка; 10 — упругий элемент; 11 — стабилизирующий дроссель; 12 — балансный реостат; 13 — выпрямитель

На рис. 2 показана конструкция вибрационного станка, позволяющего вводить в рабочую зону электрическую энергию импульсно, путем реализации электрических разрядов, возникающих в межэлектродном пространстве между электропроводной обрабатываемой средой и поверхностью обрабатываемых деталей.

Источником вибрации служит электромагнитный вибратор 2. Рабочая камера 4 установлена на виброплощадке 9, которая удерживается с помощью упругих элементов 10, выполненных в виде гнутых металлических стержней, жестко закрепленных на основании 1. Вся конструкция смонтирована на упругих виброопорах 3, препятствующих передаче вибрации фундаменту. Электрическая часть схемы включает в себя однофазный двухполупериодный выпрямитель типа ВСА-5К 13, от которого напряжение через последовательно соединенные балластный реостат 12 и стабилизирующий дроссель 11 подается на электроконтакты 6, выполненные в виде шайб. Один из контактов (анод) крепится к корпусу рабочей камеры, второй (катод) — к оправке 7, помещенной в изоляционный кожух и служащей для крепления обрабатываемой детали 8. При включении электромагнитного вибратора в сеть через однополупериодный выпрямитель виброплощадка вместе с закрепленным на ней якорем начинает движение вверх и одновременный поворот против часовой стрелки (по спирали вверх), при этом компоненты рабочей среды под действием центробежных сил получают движение в том же направлении, от обрабатываемой детали — по касательной. В следующий полупериод виброплощадка под действием сил упругости, возникающих в упругих элементах, возвращается в исходное положение, совершая движение по спирали вниз. Элементы рабочей среды при смене направления вектора скорости получают движение от обрабатываемой детали — по касательной, направленное в ту же сторону. Таким образом, благодаря специальной конструкции упругих элементов рабочая камера во время обработки совершает колебательные движения с частотой 25 Гц в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Это обеспечивает периодический контакт рабочей среды с обрабатываемой деталью за счет использования механизма центробежного разделения, что является необходимым условием для появления искродугового разряда.

Вибрационная обработка в условиях наложения электрического тока на содержимое загрузки рабочей камеры получила название вибрационная электрофизическая обработка (ВиЭФО).

Традиционная электрофизическая обработка основана на использовании кратковременных искровых и искродуговых разрядов. Заготовку и инструмент подключают как два электрода к источнику питания с напряжением, достаточным для возбуждения искровых или дуговых разрядов. При сближении электрода-инструмента и электрода-заготовки между ними возника-

ет электрическое поле, вызывающее ионизацию газа. Развитие процесса ионизации с повышением напряжения на электродах заканчивается пробоем межэлектродного промежутка и возникновением искрового разряда. Зазор между электродами колеблется в пределах 0,1...0,3 мм. В зависимости от мощности источника питания, природы тока и его параметров искровой разряд может переходить в дуговой. Благодаря высокой температуре, достигаемой в зоне обработки, происходят локальное плавление и частичное испарение металла, диффузия в него элементов окружающей газовой и иной среды. Расплавленный металл под действием сил ударной волны выбрасывается в межэлектродное пространство, где и застывает. Величина зоны воздействия определяется количеством энергии, выделяющейся на электродах. Этот метод используют для упрочнения, наплавки износостойких покрытий, поверхностного легирования и т.д. В число его недостатков входят малая производительность и невозможность равномерной обработки деталей сложной конфигурации.

Предлагаемый метод ВиЭФО позволяет устранить недостатки традиционной электрофизической обработки при нанесении различных покрытий, а также интенсифицировать процесс обработки за счет применения множественного искродугового контакта между инструментом и обрабатываемой деталью. Преимущества вибрационной обработки здесь соединены с возможностями электрофизического метода.

Технологические возможности комплексного энергетического воздействия на поверхность обрабатываемых деталей методами ВиМХТО и ВиЭФО изучались на примере получения покрытий из порошковых материалов, вводимых в состав гранулированной обрабатываемой среды.

## ВиМХТО

Выше указано, что в процессе вибрационной механохимико-термической обработки создаются условия, способствующие схватыванию поверхности деталей с порошкообразным материалом, введенным в состав рабочей среды. Особенно эффективной в этом отношении является обработка с нагревом массы загрузки до температур, интенсифицирующих образование покрытия.

Для экспериментального изучения особенностей образования антикоррозионных металлических покрытий были проведены исследования по влиянию условий процесса на возможность получения покрытий из цинка, алюминия и композиций на их основе. Выбор материалов покрытия обусловлен широким применением цинка для защиты стали от коррозии, но несмотря на хорошие антикоррозионные свойства этого покрытия (антикоррозионная защита стальных изделий и конструкций на 90 % осуществляется цинкованием) большинство методов цинкования снижает механические свойства деталей за счет разупрочнения или наводороживания поверхностного

слоя. Алюминий во многих случаях превосходит цинк по своим защитным свойствам, к тому же он дешевле и менее дефицитен, однако в настоящее время нет достаточно разработанного универсального и экономичного способа его нанесения на стальные детали сложной формы. Это сдерживает распространение алюминирования как защитного покрытия. Кроме того, алюминий легко соединяется со сталью в твердой фазе и, следовательно, будет склонен к образованию покрытия в процессе вибрационной механохимико-термической обработки.

Сырьем для получения покрытий служили порошки алюминия АП и цинка ПЦ-4, которые наносили на образцы из сталей 08кп и 60С2. Обработку производили с использованием в качестве рабочей среды стальных шариков диаметром 1,5...14 мм.

**Алюминиевое покрытие.** Процесс образования покрытия начинается при температуре выше 100 °С. При комнатной температуре нет условий для выгорания органических веществ и испарения влаги, адсорбированной поверхностью деталей и частицами порошка. Схватывания порошка с поверхностью не происходит, он измельчается, претерпевает качественные изменения и превращается в темно-серую пыль окислов и органических соединений алюминия. Повышение температуры до 120...150 °С приводит к получению на поверхности образцов светлого алюминиевого покрытия, толщина которого зависит от амплитудно-частотных режимов, продолжительности обработки, количества и способа подачи в рабочую камеру порошка, а также от твердости материала основы (рис. 3, а). При равенстве прочих факторов на стали 60С2 образуется более тонкое и гладкое покрытие, чем на стали 08кп. Температура 230...250 °С принципиально не изменяет условий образования покрытия, однако его поверхность имеет более темный цвет. Повышение температуры до 300 °С приводит к получению покрытий серого цвета, которые при хранении на воздухе сильно темнеют в отличие от полученных при более низких температурах. Алюминиевое покрытие хорошо прилегает к основному металлу, копируя его неровности. Промежуточных слоев между ним и основой нет. Структура металла, прилегающего к поверхности, сильно деформирована. Следует отметить, что большая стойкость порошка алюминия к окислению позволяет осуществить процесс нанесения покрытий без герметизации рабочей камеры и применения восстановительной или инертной газовой среды.

**Цинковое покрытие.** Вибрационная обработка в интервале температур 20...350 °С в открытой или негерметично закрытой рабочей камере не позволяет получить качественное цинковое покрытие. Схватывание частиц цинкового порошка и обрабатываемой поверхности происходит в отдельных точках, между которыми остается непокрытый металл. При температуре выше 200 °С происходит интенсивное окисление порошка, делающее невозможным осуществление обработки. Поэтому тех-

нология получения цинкового покрытия предусматривала обработку в герметично закрытой камере (без доступа воздуха) с добавлением в состав цинкового порошка 3...5 % (по объему) хлористого аммония, при разложении которого от нагрева образуется восстановительная атмосфера. Поддерживалась температура процесса 200—300 °С. Полученное таким способом цинковое покрытие отличается по своему строению от алюминиевого (рис. 3, б). Оно состоит из верхнего слоя — частиц цинкового порошка, соединенных между собой, и диффузионной зоны цинкового феррита, ширина которой зависит от температуры обработки. Эта зона содержит до 3 % цинка и отличается повышенной твердостью. Значения микротвердости в ней составляют 1900...2500 МПа (основа — сталь 08кп), в то время как микротвердость пластически деформированных зерен феррита — 1700...1800 МПа. Обработка при температуре 250 °С в течение 60 мин приводит к диффузии цинка на глубину 30...40 мкм. Постепенно эта зона переходит в основную структуру — феррит с повышенной микротвердостью, которая на глубине 150 мкм понижается до исходных 1350...1500 МПа.

Представляют интерес также исследования по выявлению возможности получения цинк-алюминиевых покрытий вибрационной механохимико-термической обработкой. По первому способу в состав алюминиевого порошка вводили цинковую пудру — 30 %. Механизм образования такого покрытия и режимы обработки не отличаются от соответствующих при нанесении алюминия, однако частицы цинковой пудры уменьшают вредное влияние пористости чисто алюминиевого покрытия. По второму способу получали двухслойные покрытия путем введения

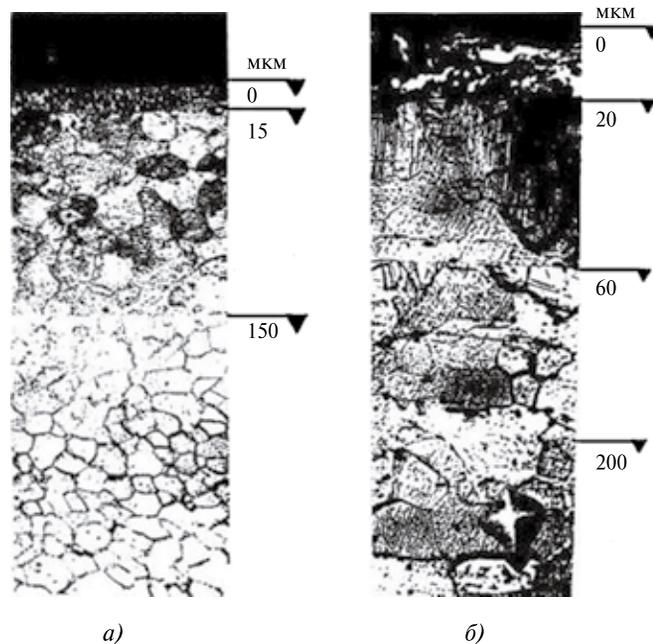


Рис. 3. Микроструктура образца из стали 08кп после ВиМХТО: а — с алюминиевым покрытием, температура обработки  $t = 150$  °С; б — с цинковым покрытием,  $t = 250$  °С

в рабочую камеру сперва цинк-алюминиевого порошка, состоящего из 80 % цинка и 20 % алюминия, а затем, после обработки в течение 60 мин, — чисто алюминиевого порошка. Покрытие представляет собой подслоу, обогащенный цинком, предотвращающий вредный контакт алюминия со сталью, на котором находится слой алюминия, коррозионно-стойкий в различных средах (рис. 4).

Экспериментальное изучение кинетики формирования цинк-алюминиевых покрытий на образцах из стали 08кп показывает, что этот процесс начинается с пластической деформации ферритных зерен и подготовки поверхности к соединению с частицами порошка. Об этом говорит интенсивный рост зерен феррита, прилегающих к поверхности после рекристаллизационного отжига. На этой стадии обрабатываемые образцы теряют в весе, что свидетельствует об удалении окислов и мельчайших частиц металла с их поверхности. Об этом же свидетельствует наличие в оставшемся на дне рабочей камеры и не вступившем в соединение цинк-алюминиевом порошке железа, которое идентифицировано химически. При дальнейшей обработке образуется тонкий слой алюминия, смешанного с мелкими частицами цинка и материала основы. На первичный слой покрытия наносятся более крупные частицы алюминия и цинка. В этот период происходит увеличение веса образцов до максимальной величины, отвечающей предельной толщине покрытия.

### ВиЭФО

Методика исследования технологических возможностей ВиЭФО включала реализацию схемы процесса

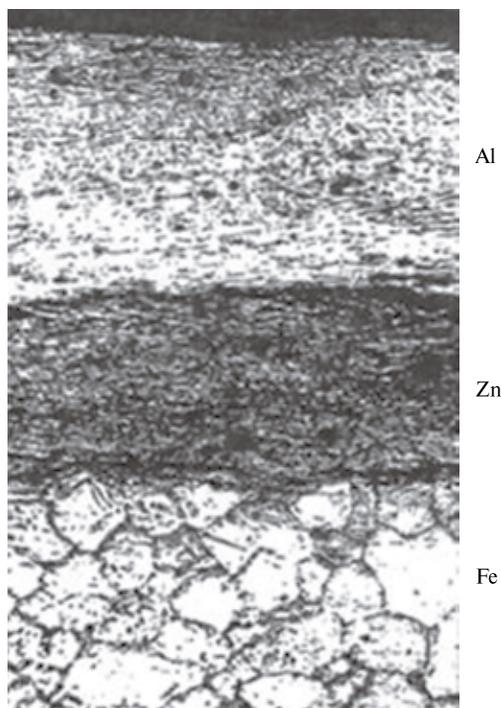


Рис. 4. Микроструктура образца из стали 08кп с двухслойным цинк-алюминиевым покрытием после ВиМХТО

(см. рис. 2). Корпус рабочей камеры является анодом, а обрабатываемая деталь — катодом. Электропроводная рабочая обрабатывающая среда — шарики из стали ШХ15 — является тем звеном, которое осуществляет замыкание электрической цепи. Реостат 12 сопротивлением 1 Ом обеспечивает необходимое падение напряжения. Рабочая среда, периодически контактируя с поверхностью обрабатываемой детали, возбуждает в каждый момент времени некоторое число искродуговых разрядов (более трех параллельных разрядов не наблюдается), которые развиваются и протекают по обычной схеме. При этом дроссель служит для поддержания и стабилизации электрической дуги. В рабочую камеру подается мелкодисперсный порошок, состоящий из карбидов хрома, титана, вольфрама. При возникновении разрядов частицы металлического порошка наполнителя расплавляются и оседают на поверхности детали. Имеет место локальное оплавление металлических шариков и поверхности обрабатываемой детали, в результате чего поверхностный слой детали подвергается термической обработке и покрывается слоем легирующих элементов наполнителя. Необходимо отметить, что хаотичность взаимодействия между собой частиц рабочей среды при обработке предопределяет возникновение различных цепей замыкания электрического тока, поэтому трудно говорить о стабильности параметров каждого дугового разряда.

Для получения данных о технологических возможностях метода ВиЭФО были проведены эксперименты, в которых в качестве образцов использовались цилиндрические детали диаметром 10 мм из стали 45, закрепленные на оправке. Шарики из стали ШХ15 и частицы порошка наполнителя, состоящего из карбидов хрома, титана и вольфрама, загружались в рабочую камеру разово, перед началом обработки. Обработка проводилась в течение 20 мин при вертикальной составляющей амплитуды колебаний рабочей камеры 0,2 мм и горизонтальной (т.е. круговой амплитуде) — 1 мм. Напряжение на электроконтактах (напряжение дуги) во время обработки составляло 20 В при силе тока в цепи 10 А. В результате экспериментов было получено равномерное покрытие поверхности детали, что можно объяснить спецификой траектории движения частиц рабочей среды и режимами вибрации. Наибольший интерес представляют данные об изменении микротвердости нанесенного материала покрытия и основного металла по сечению образца.

При исследовании структуры на оптическом микроскопе МИМ-8 при увеличении 600 можно выделить три характерных участка поверхностного слоя: слой самого покрытия, переходный слой и слой основного металла детали измененной микротвердости (рис. 5). Слой покрытия имеет очень неровную внешнюю границу. Средняя толщина покрытия 0,125 мм, микротвердость  $H_{\mu} = 7500$  МПа. Структура в целом однородна, без видимых средствами оптической микроскопии дефектов.

Переходный участок представляет собой диффузионно-насыщенный плохо травящийся слой с включениями зерен вытянутой формы. Глубина переходного слоя также неравномерна и в среднем составляет 0,163 мм при степени упрочнения 120...150 %. Основной материал имеет равномерную мелкозернистую ферритно-перлитную структуру слабо изменяющейся микротвердости до глубины 0,8...1 мм. В отличие от переходного участка зерна перлита имеют в основном правильную форму.

Данные измерений микротвердости, проводившихся на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,049 Н (50 гс), подтверждают наличие участков различной микроструктуры и коррелируются с ними (рис. 5). Максимальное значение  $H_{\mu}$  соответствует материалу покрытия и равно 7530 МПа, что почти в 1,5 раза превышает микротвердость переходного слоя, которая практически не изменяется по глубине. Микротвердость основного металла монотонно убывает и достигает значения 2688 МПа, которое соответствует исходному состоянию.

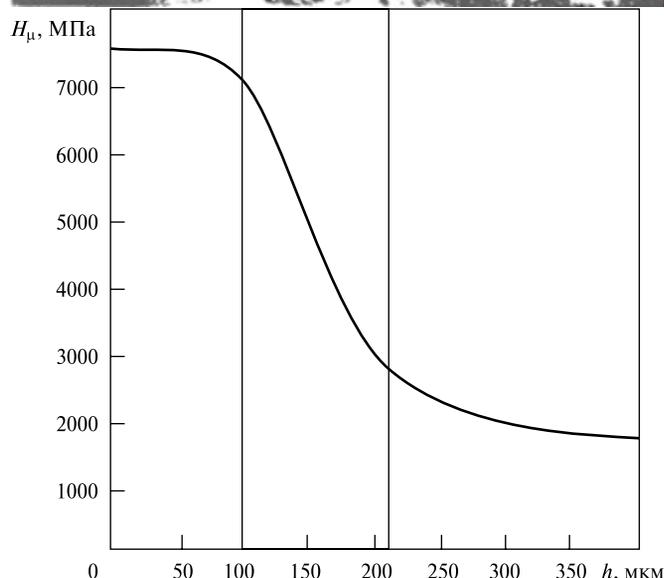


Рис. 5. Микроструктура образца из стали 45 и график изменения микротвердости после ВиЭФО в рабочей среде: шарики из стали — ШХ15, смесь порошков карбидов хрома, титана и вольфрама

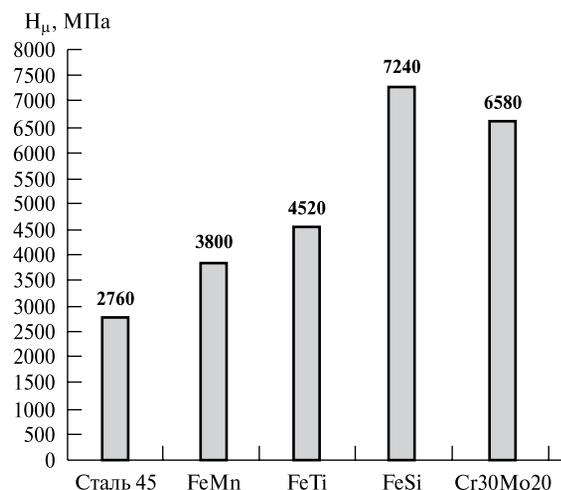


Рис. 6. Диаграмма изменения микротвердости покрытий из различных порошковых материалов после ВиЭФО

В целях изучения влияния природы порошкообразного материала рабочей среды на твердость поверхности были исследованы порошки FeMn, FeTi, FeSi, Cr30Mo20. Результаты представлены на рис. 6. Как видно из диаграммы, наибольшая микротвердость зарегистрирована при модифицировании порошком FeSi.

### Выводы

Представленные выше результаты исследования комплексного влияния источников энергии различной природы при реализации метода вибрационной обработки позволяют сделать вывод о возможности существенного расширения его технологических возможностей, в частности за счет модифицирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 1998. 624 с.
2. Complex Change in Superficial Layer Properties of Specimen Obtained by Metallurgical Powder under Vibration Process Method / J.P. Ankudimov, P.J. Ankudimov, A.P. Babichev et al. / Defect and Diffusion Forum. 2010. Vol. 297—301.
3. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, В.В. Иванов, Ю.П. Анкудимов и др. Ростов-н/Д. Изд. центр ДГТУ, 2012. 208 с.
4. Анкудимов Ю.П., Анкудимов П.Ю. Операционные возможности метода вибрационной обработки при комплексном энергетическом воздействии на технологическую систему // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 8.
5. Анкудимов Ю.П., Чернега Ю.Г. Применение дополнительных энергетических источников при виброударной обработке деталей // Современные достижения науки: Сб. тр. междунар. конф. Прага, Чехия. 2014.
6. Исследование процесса цинкования при вибрационной механо-термической и механохимической обработке / Ю.П. Анкудимов, А.К. Веретельников, Ю.Г. Чернега, И.И. Шекота // Аспекты развития науки, образования и модернизация промышленности: Материалы XII Регион. науч.-практ. конф. учреждений высш. и сред. проф. образования. Ростов-н/Д., 2014.

В.А. Лебедев, В.В. Иванов, С.Ю. Штынь, И.В. Давыдова  
 (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
 E-mail: va.lebedev@yandex.ru

## Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности

*Раскрыта сущность вибрационных механохимических покрытий и представлено энергетическое условие их формирования. Предложена расчетно-аналитическая модель нанесения покрытий в виброволновых технологических системах, которая позволяет оценить адгезионную прочность получаемого на поверхности металла покрытия, определить продолжительность процесса и выбрать наиболее эффективные технологические параметры его проведения.*

**Ключевые слова:** покрытие, вибрационная обработка, механохимия, индентор, локальный микрообъем, внутренняя энергия, адгезия.

*The article reveals the essence of vibration mechanochemical coatings and presented the energy conditions of their formation. A calculation model of an analytic coating in vibrowave technological system is proposed. It allows to evaluate the adhesion strength of the resulting coating on the metal surface, determine the duration and choose the most effective technological parameters of the process.*

**Keywords:** cover, vibration treatment, mechanochemistry, indenter, local microvolumes, internal energy, adhesion.

### Введение

Отличительной особенностью вибрационных механохимических покрытий (ВиМХП) является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударно-импульсного воздействия инденторов, свободнодвижущихся в замкнутом объеме рабочей камеры. В результате динамического взаимодействия инденторов с поверхностью детали обеспечивается активация химических и физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое, происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик. По способу формирования покрытия на поверхности металла ВиМХП можно разделить на три основные группы.

*Первая группа* объединяет ВиМХП, сформированные непосредственно на поверхности металла без взаимного проникновения материала покрытия и основного металла, связь покрытия с металлом происходит на основе механического сцепления.

*Вторую группу* представляют ВиМХП, сформированные в результате взаимного структурного взаимодействия материала покрытия и металла детали, обеспечивающего механохимическую связь между ними.

*Третью группу* составляют ВиМХП, для которых сам металл является исходным материалом для покрытия: в результате химического взаимодействия металла с химическими растворами на поверхности формируется соответствующее покрытие.

Для всех групп ВиМХП независимо от сложности протекающих на поверхности металла химических и физико-химических процессов механическая энергия неизменно остается главной активирующей силой.

В результате вибрационного механического воздействия внешних сил происходит увеличение внутренней энергии системы, увеличиваются энергия поступательного движения молекул, энергия внутримолекулярного колебательного движения атомов и атомных групп, входящих в состав молекулы, энергия вращения электронов в атомах, энергия ядра атомов и другие виды энергии. Это свидетельствует о том, что процесс формирования вибрационных механохимических покрытий представляет собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла механических, химических и физико-химических явлений.

В работе [1] показано, что с термодинамической точки зрения все элементарные акты механохимического процесса, протекающие в локальных микрообъемах на границе раздела "покрытие—подложка", разделяются на два характерных вида, отличающихся кинетическими закономерностями. Первый вид элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок связан с установлением адгезионных связей между контактирующими веществами и тем самым обуславливает накопление в локальном объеме скрытой энергии. Элементарные акты второго вида связаны с установлением и уничтожением связей, в результате чего происходит трансформация (превращение) необратимой механохимической энергии в тепловую, что проявляется в виде теплового эффекта. Таким образом, в соответствии с основным законом термодинамики — законом сохранения энергии — при ее превращениях уравнение энергетического баланса процесса образования локального микрообъема вибрационного механохимического покрытия на границе раздела "покрытие-подложка" можно записать в виде

$$A = \Delta U + q; \tag{1}$$

$$\Delta U = \Delta U_{п.м} + \Delta U_{п.х} + \Delta U_{т.м} + \Delta U_{т.х},$$

где  $\Delta U_{п.м}$ ,  $\Delta U_{п.х}$  — изменения механической и химической потенциальной составляющих внутренней энергии локального объема;  $\Delta U_{т.м}$ ,  $\Delta U_{т.х}$  — части тепловой энергии, затрачиваемой на повышение химической реакции энергетического состояния локального объема;  $q$  — часть тепловой энергии рассеиваемой в тело подложки и окружающую среду. Схема энергетического баланса процесса формирования локального микрообъема вибрационного механохимического покрытия на границе раздела "покрытие—подложка" представлена на рис. 1.

Соотношения между составляющими энергетического баланса механохимического процесса при формировании ВиМХП могут быть самыми разнообразными и зависят от природы и структуры материала, а также условий, в которых протекает процесс нанесения покрытий.

### Энергетическое условие формирования ВиМХП

Рассматривая сформировавшийся в процессе вибрационной механохимической обработки (ВиМХО) на границе раздела "покрытие—подложка" модифицированный локальный микрообъем как открытую термодинамическую

систему, находящуюся при установившихся механохимических условиях в соотношении локального равновесия, условие его образования можно представить в виде

$$\Delta U = U_0, \tag{2}$$

где  $\Delta U$ ,  $U_0$  — изменение мольной внутренней энергии системы и ее мольная энергия, определяющая условия образования модифицированного локального микрообъема соответственно.

Физический смысл этого условия заключается в том, что когда его левая часть, соответствующая повышению внутренней энергии системы  $\Delta U$ , достигнет правой  $U_0$ , оцениваемой фундаментальной энергетической характеристикой, процесс модификации локального микрообъема достигнет своего завершения (равновесия).

В основу термодинамических подходов к описанию поверхностного слоя заложено представление о поверхностном слое как о фазовом слое, обладающем толщиной и объемом. Это позволяет использовать для описания поверхностного слоя тот же термодинамический аппарат, что и для трехмерных фаз. В соответствии с методом избыточных величин Гиббса, согласно которому используемые термодинамические параметры являются не абсолютными, а избыточными по сравнению с соответствующими параметрами макроскопических фаз, фундаментальное уравнение для

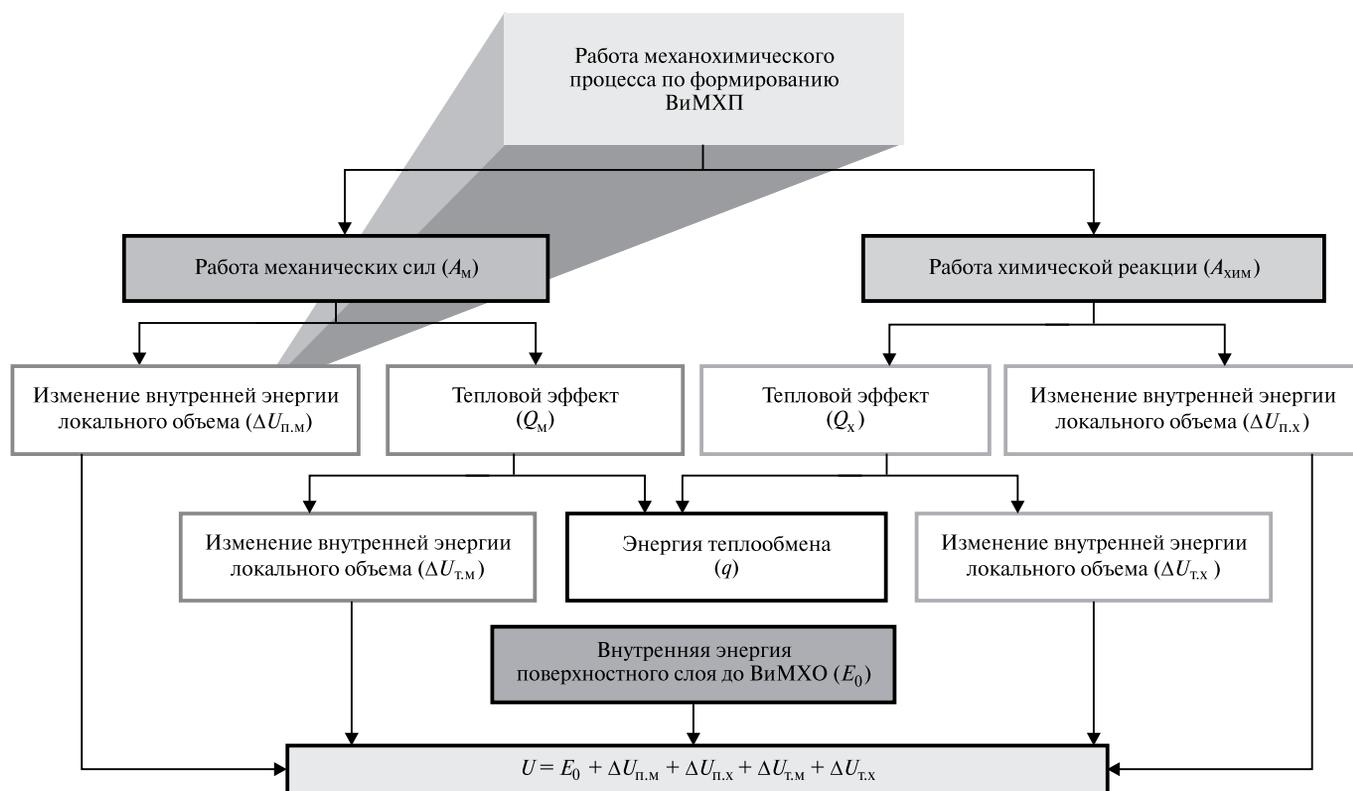


Рис. 1. Схема энергетического баланса процесса получения ВиМХП

энергии поверхностного слоя  $U$  на границе раздела фаз имеет вид

$$\Delta U = T\Delta S + p\Delta V + \sum \mu_i \Delta w_i, \quad (3)$$

где  $T$  — абсолютная температура;  $p$  — давление;  $S$ ,  $V$ ,  $\mu_i$  — мольные значения энтропии, объема и химического потенциала соответственно;  $\Delta w_i$  — мольная доля  $i$ -го компонента системы.

Рассмотрение каждого компонента в условиях ВиМХО, проведенное на основе методологического подхода, предложенного в работе [3], показало, что первое слагаемое является мольным приращением связанной энергии  $\Delta S$ , необратимый рост которой при любых неравновесных процессах постулируется вторым законом термодинамики. Согласно интерпретации Больцмана изменение мольной энтропии

$\Delta S = R \ln \left( \frac{w_2}{w_1} \right)$ , где  $w_1$ ,  $w_2$  — термодинамические вероятности начального и конечного состояний системы. Если предположить, что производство энтропии в системе при ВиМХО оценивается продолжительностью механохимического синтеза процесса формирования покрытия, то термодинамический вес системы можно оценить из соотношения

$$w_2/w_1 = t/t_0, \quad (4)$$

где  $t$  — время пребывания системы в состоянии механохимического синтеза;  $t_0$  — период тепловых колебаний атомов.

В уравнении (3) подразумевается, что система совершает работу против сил внешнего давления, поэтому элементарная работа  $p dV$  здесь является положительной. Эффективность формирования вибрационных механохимических покрытий обеспечивается за счет ударно-импульсного механического воздействия свободнодвижущихся инденторов рабочей среды на обрабатываемую поверхность. Силовое воздействие инденторов приводит к повреждаемости кристаллических решеток окисных пленок и тем самым способствует активации протекания химических и физико-химических процессов, а также к повышению адгезионной прочности поверхности, модифицированной путем нанесения покрытия, повышая ее эксплуатационные свойства. Вклад механических сил в приращение внутренней энергии системы складывается из потенциальной энергии  $E_{\text{упр}}$ , обусловленной внешними и внутренними (остаточными) упругими напряжениями, и энергии  $E_{\text{пл}}$ , накопленной при пластической деформации, т. е.  $p dV = \Delta E_{\text{упр}} + \Delta E_{\text{пл}}$ . Изменение мольной потенциальной энергии, обусловленной упругими деформациями, составляет

$$\Delta E_{\text{упр}} = V_m \cdot 10^{-6} \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (5)$$

где  $V_m$  — молярный объем, мм<sup>3</sup>/моль;  $\sigma$  — эффективное напряжение, МПа;  $E$  — модуль упругости, МПа.

Упругая энергия не накапливается в материале с течением времени, поэтому текущее значение  $E_{\text{упр}}$  является функцией мгновенного значения напряжений. Поскольку при ВиМХО воздействие инденторов рабочей среды на поверхность с концентраторами напряжений в виде шероховатости носит динамический характер, то при обосновании эффективного напряжения в зоне локального контакта необходимо учитывать коэффициент динамичности  $n_d$  и коэффициент перегрузки  $k_p$ , т. е.  $\sigma = \sigma_{\text{ст}} n_d k_p$ , где  $\sigma_{\text{ст}}$  — статическое напряжение материала подложки. Кроме того, следует отметить экспериментально установленный факт, обосновывающий эффективность ВиМХО. Несмотря на то, что при упругих деформациях упругая энергия не накапливается в материале с течением времени,  $E_{\text{упр}}$  не равна нулю, так как имеют место микропластические деформации.

В отличие от  $E_{\text{упр}}$  работа  $E_{\text{пл}}$ , затраченная на пластическую деформацию, с течением времени накапливается в материале, а переданная при этом термодинамической системе, находящейся на границе "покрытие—подложка", механическая энергия равна мольной работе неупругих сил, которая эквивалентна площади под истинной кривой "напряжение—деформация":

$$\Delta E_{\text{пл}} = V_m \cdot 10^{-6} \sigma \Delta \varepsilon, \quad (6)$$

где  $\Delta \varepsilon$  — относительное изменение пластической деформации системы за время пребывания системы в состоянии механохимического воздействия  $t$ .

Относительное изменение пластической деформации в процессе обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования свободнодвижущимися инденторами (характеризующимися малой степенью деформации:  $\Delta \varepsilon \leq 0,3$ ), разновидностью которых является виброударная обработка, может быть оценено с помощью соотношения  $\Delta \varepsilon = d/D$ , где  $d$  — диаметр пластического отпечатка, формируемого на поверхности при ее соударении с индентором рабочей среды диаметром  $D$ .

Частичный переход энергии деформирования в теплоту можно учесть при помощи коэффициента аккумуляирования механической энергии  $k_{\text{а.м}}$ , который показывает долю запасаемой энергии относительно всей затраченной работы ( $k_{\text{а.м}} = 0,2 \dots 0,3$ ). В этом случае

$$\Delta E_{\text{пл}} = k_{\text{а.м}} V_m \cdot 10^{-6} \sigma d/D. \quad (7)$$

С учетом уравнений (5)...(7) получим

$$pdV = \Delta E_{упр} + \Delta E_{пл} = V_m \cdot 10^{-6} \frac{\sigma^2}{2E} + k_{ам} V_m \cdot 10^{-6} \frac{\sigma d}{D} = V_m \cdot 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + k_{ам} \frac{\sigma d}{D} \right). \quad (8)$$

Анализ значений энергий, вносимых упругими силами и накопленными в результате пластической деформации, показывает, что первое слагаемое в правой части (8) значительно меньше второго. Однако из этого не следует, что энергией упругих напряжений можно пренебречь. Экспериментальные исследования процессов формирования основных групп вибрационных механохимических покрытий показали, что для получения ВиМХП первой группы требуются значительные силовые воздействия инденторов рабочей среды, обеспечивающие пластическую деформацию поверхностного слоя, в результате которой происходит внедрение диспергированных микрочастиц материала покрытия в поверхность, и как следствие, образование покрытия. В этом случае энергией упругих напряжений можно пренебречь и первое слагаемое в правой части уравнения (8) не учитывать. При получении ВиМХП второй группы определяющая роль в их формировании должна принадлежать как упругим деформациям, так и пластическим. Первые активируют окисные пленки, вторые разрушают их и укрепляют адгезионные связи покрытия с подложкой. Для формирования ВиМХП третьей группы механическую работу инденторов рабочей среды вполне достаточно обеспечить на уровне упругих деформаций, так как образование покрытия осуществляется за счет протекания химической реакции в поверхностном слое материала и задача механических сил — активировать этот процесс. При проектировании технологии ВиМХО механическая составляющая процесса нанесения требуемого покрытия управляется выбором материала и размеров инденторов рабочей среды.

Третье слагаемое в правой части уравнения (3), имеющее размерность энергии, характеризует вклад в накопление внутренней энергии системы немеханических обратимых сил, обусловленных в основном при ВиМХО протеканием в поверхностном слое материала химических процессов. Это слагаемое представляется в виде суммы членов, содержащих химические потенциалы компонентов, участвующих в формировании покрытия, и описывает в общем виде химическую работу, затрачиваемую на изменение состава системы:

$$A_{хим} = \sum \mu_i \Delta w_i \quad (9)$$

Если химическую работу рассматривать как работу собственно химической реакции, то в неравновесных

химических реакциях — процессах, в которых одни химические формы вещества превращаются в другие, химические потенциалы определяют термодинамическое сродство — суммарную совокупность действующих химических сил, характеризующую стремление реакции к состоянию равновесия. В соответствии с методом Льюиса выражение, описывающее изменение химического потенциала, имеет вид

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i, \quad (10)$$

где  $\mu_i$  — стандартный химический потенциал компонента системы;  $\mu_i^0 = H/N_A$ ;  $H$  — энтальпия компонента;  $N_A$  — число Авогадро;  $a_i$  — относительная активность компонента в системе,  $a_i = \gamma_i c_i$ ;  $\gamma_i$  — коэффициент активности,  $c_i$  — концентрация компонента.

Из выражения (10) следует, что активность, так же как и сам химический потенциал, является мерой тенденции компонента системы перейти в другую фазу. При этом химические потенциалы разделяются на две составляющие — постоянную (стандартную), зависящую только от температуры, и переменную, так или иначе зависящую от концентрации вещества в системе. Вместе с тем в работе [3] показано, что как сами химические потенциалы, так и стандартное сродство могут быть представлены через стандартную энтальпию и стандартную энтропию реакции, т.е. через изменения энтальпии  $\Delta H^0$  и энтропии  $\Delta S^0$  в химической реакции веществ, находящихся в стандартных состояниях. Эти изменения определяются соответственно парциальными (а для чистых веществ удельными) мольными энтальпиями и энтропиями участников реакции в стандартных состояниях. Данное обстоятельство позволяет работу химической реакции, протекающей в поверхностном слое при ВиМХО и затрачиваемой на повышение потенциальной внутренней энергии модифицированного в процессе ВиМХО локального объема на границе "покрытие — подложка", выразить через изменение свободной энергии Гиббса  $\Delta G^0$ , кДж/моль:

$$A_{хим} = -\Delta G^0 = -(-\Delta H^0 - T\Delta S^0), \quad (11)$$

где  $\Delta H^0 = \sum \nu_i h_i^0$ ;  $\Delta S^0 = \sum \nu_i s_i^0$ ;  $\nu_i$  — стехиометрический коэффициент;  $h_i^0$  — энтальпия моля компонента;  $s_i^0$  — мольная энтропия компонента.

Соотношение энтальпийного и энтропийного членов в формуле (11) при разных температурах определяет влияние температуры на положение равновесия реакции. Очевидна противоположная направленность влияния энтальпийной и энтропийной составляющих на стандартное сродство, а следовательно, и на направление химической реакции. С понижением температуры роль энтропийной составляющей существенно снижается.

С учетом метода избыточных величин Гиббса, интерпретации энтропии Больцманом, известных из теории сопротивления материалов выражений для оценки энергий упругих и пластических деформаций, а также выражения (11), устанавливающего изменение свободной энергии в локальном микрообъеме в процессе химического взаимодействия компонентов покрытия, получено условие, раскрывающее механизм формирования покрытий в условиях вибрационных технологических систем и определяющее энергетическое состояние локальных микрообъемов на границе "покрытие — подложка", модифицированных в процессе ВиМХО:

$$TR \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) + V_m \cdot 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + k_a \frac{\sigma d}{D} \right) - \Delta G^0 = U_0. \quad (12)$$

Энергетическое условие (12) учитывает вклад в процесс формирования ВиМХП повышения связанной энергии за счет роста энтропии (первое слагаемое), увеличения энергии упругопластических искажений кристаллической решетки в результате механического воздействия инденторов рабочей среды (второе слагаемое), изменения внутренней энергии поверхностного слоя, модифицированного в результате химического взаимодействия контактирующих сред. Роль каждого из них в кинетике формирования классификационных групп вибрационных механохимических покрытий согласно предложенной модели (12) схематично проиллюстрирована на рис. 2, из которого видно, что основной вклад в процесс формирования ВиМХП первой группы вносит деформационное слагаемое, монотонно растущее

со временем. Формирование ВиМХП второй группы — результат деформационного и химического слагаемых. При формировании ВиМХП третьей группы ведущая роль принадлежит химической составляющей модели.

### Оценка адгезионной прочности ВиМХП

Основным показателем качества любого покрытия, наносимого на поверхность металла, является адгезия, которая характеризует прочность схватывания между двумя материалами, возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных веществ, приведенных в соприкосновение. Основными характеристиками адгезии являются энергия адгезии, прочность сцепления и сила адгезии. В работе [4], посвященной исследованию характеристик адгезии контактирующих материалов с покрытиями, установлено, что энергия адгезии  $E_a$  и адгезионная прочность "покрытие—подложка" связаны между собой следующим соотношением:

$$\tau_a = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \sqrt{E_a E}, \quad (13)$$

где  $h$  — толщина покрытия, а зависимость между силой адгезии  $E_a$  и адгезионной прочностью можно определить по формуле

$$E_a = \pi \tau_a^2 r^2, \quad (14)$$

где  $r$  — радиус индентора при вершине склерометрической иглы.

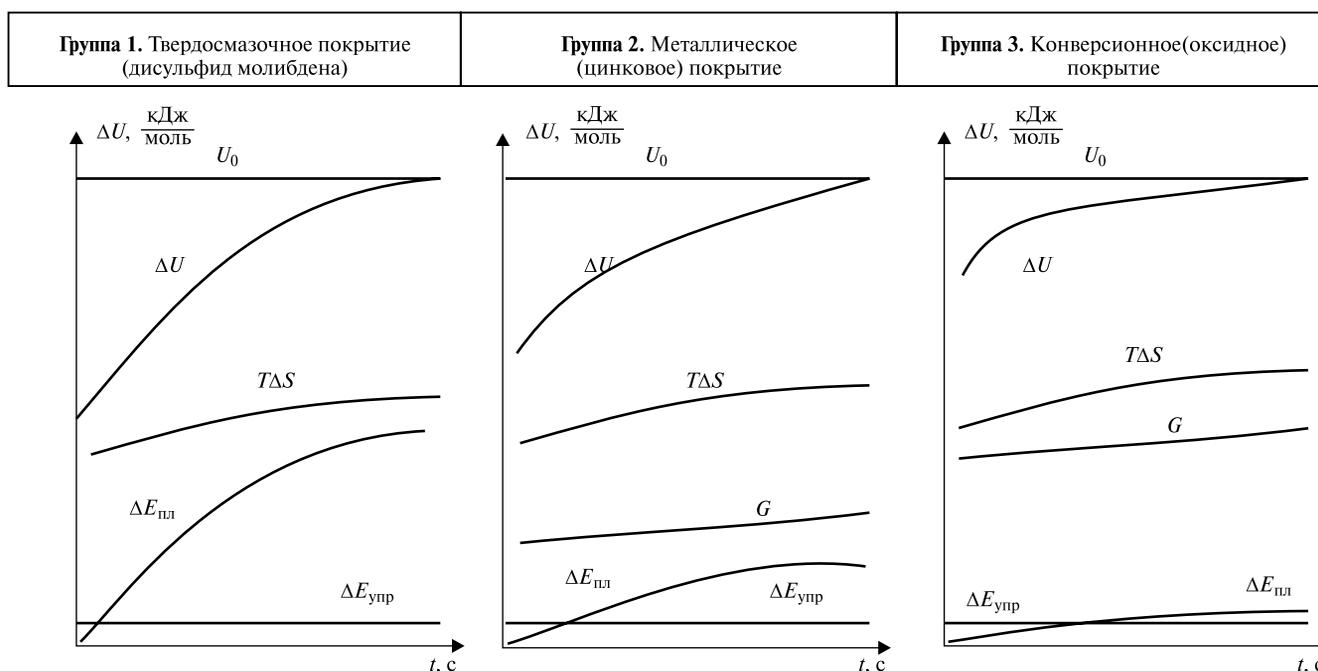


Рис. 2. Схема накопления энергии в локальном объеме поверхности на границе "покрытие — подложка" при ВиМХО

Адгезионная прочность ВиМХП  $\tau_a$

ВиМХП	Материал подложки	Вид индентора	Время обработки $t_n$ , мин	Толщина покрытия $h$ , мкм	$\tau_a$ , МПа	
					Эксперимент	Расчет
Al(OH) <sub>3</sub>	Al	Полиэтиленовые шарики диаметром 5мм	20	5	200...220	232
Zn	Fe	Фарфоровые шарики диаметром 5 мм	60	16	310...340	297
MoS <sub>2</sub>	Fe	Стальные шарики диаметром 2...5 мм	60	5	300...320	—

Количественной характеристикой адгезии является работа адгезии  $W_a$  — работа, необходимая для обратимого изотермического разделения двух приведенных в контакт конденсированных фаз по площади единичного сечения. Ее можно представить в следующем виде:

$$W_a = E_a N, \quad (15)$$

где  $E_a$  — средняя энергия единицы связи, обеспечивающей адгезию модифицированного путем механохимического синтеза локального микрообъема на границе раздела контактирующих сред;  $N$  — число связей, приходящихся на единицу площади контакта "покрытие — подложка".

Если приравнять мольную энергию, определяющую условия образования модифицированного локального микрообъема на границе раздела "покрытие — подложка", к средней энергии единицы связи, обеспечивающей его адгезию  $U_0 = E_a$ , то на основе энергетического условия (12) получим расчетно-аналитическую модель технологической системы вибрационной механохимической обработки, обеспечивающей получение покрытия на поверхности материала, требуемой по условиям эксплуатации прочности,

$$R \ln \left( \frac{t}{\tau_a} \right) + V_m \cdot 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + k_a \frac{\sigma d}{D} \right) - \Delta G^0 = E_a. \quad (16)$$

Определив таким образом энергию адгезии, можно по формулам (13) и (14) рассчитать прочность сцепления и силу адгезии ВиМХП с поверхностью металла. В таблице приведены экспериментальные и расчетные значения адгезионной прочности покрытий, полученных в процессе ВиМХО.

### Заключение

Полученная расчетно-аналитическая модель технологической системы вибрационной механохимической обработки (16) позволяет на стадии

технологической подготовки производства решить ряд оптимизационных технологических задач, связанных с выбором эффективных условий нанесения покрытий различного функционального назначения, обеспечивающих требуемое по условиям эксплуатации качество поверхности деталей. Так, например, исходя из адгезионной прочности покрытия, используя расчетно-аналитическую модель, можно оценить продолжительность процесса ВиМХО  $t_n$ , с, по формуле

$$t_n = t_0 \exp \left[ \frac{E_a - V_m \cdot 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + \frac{\sigma d_{np}}{D} \right) + \Delta G^0}{RT} \right]. \quad (17)$$

Предложенная формула получена из предположения, что в момент времени  $t = t_n$ , когда пластическая деформация становится предельной для данного материала, т.е.  $d = d_{np}$ , а активность компонентов системы достигает термодинамической константы равновесия  $K$  (согласно [3]  $\prod_{i=1}^n (a_i)^{v_i} = K$ ), процесс формирования вибрационного механохимического покрытия завершается.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования. Ростов-н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2007. 156 с.
2. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.
3. Кокотов Ю.А. Химический потенциал. СПб., АНИИ Россельхозакадемии, 2010. 412 с.
4. Костюк Г.И., Мелкозёрова О.М. Оценка адгезионных характеристик контактирующих материалов с покрытиями // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 3 (80). С. 16—22.



## Технологическое обеспечение требуемой точности детали

*Введение в технологическую науку понятий "конструкторская размерная база", "конструкторский размер", "технологический размер" позволяет придать однозначность правилам выбора технологических баз, что очень важно для практики технологического проектирования. Предлагаемая модель формирования технологического размера позволяет четко систематизировать все элементарные погрешности, возникающие при обработке, связав их с этапами технологической операции и создаваемыми на них размерами установки, статической и динамической настройки. На основе модели разработан алгоритм проектирования технологической операции и формирования технологической системы для ее реализации, которые гарантированно обеспечат достижение заданной точности конструкторского размера.*

**Ключевые слова:** точность при механической обработке, технологический размер, технологическая система, выбор технологических баз, управление точностью.

*Introduction to technological science of the concepts "design dimensional base", "design size", "technological size" allows to give unambiguity to rules of a choice of technological bases that is very important for practice of technological design. The offered model of formation of the technological size allows to systematize accurately all elementary errors arising when processing, having connected them with stages of technological operation and the amount of installation, static and dynamic control created on them. On the basis of model the algorithm of design of technological operation and formation of technological system is developed for its realization which with guarantee will provide achievement of the set accuracy of the design size.*

**Keywords:** accuracy when machining, technological size, technological system, choice of technological bases, management of accuracy.

Достижение заданной точности изделий машиностроения при изготовлении является основным средством обеспечения требуемого их качества и, как следствие, конкурентоспособности. Наука и практика технологии машиностроения накопили достаточно обширный опыт решения разных задач обеспечения точности. Сегодня этот опыт нуждается в систематизации и обобщении. В настоящей статье мы делаем попытку такой систематизации применительно к технологическим процессам обработки деталей.

Все размеры, которыми описывается конструктивная форма детали, с точки зрения объекта описания можно разделить на две группы:

1) размеры, описывающие каждую поверхность в отдельности, — это размер поверхности, требуемая точность которого задается допуском, макрогеометрия поверхности, задаваемая допуском формы (цилиндричность, плоскостность и т.д.), микрогеометрия поверхности, задаваемая параметрами шероховатости ( $Ra$  или  $Rz$  и др.);

2) размеры взаимного расположения поверхностей (линейные и угловые размеры между двумя поверхностями, их соосность, параллельность и др.).

Возможности технологического обеспечения каждой группы размеров оказываются разными. Требуемая точность размерного описания каждой поверхности обеспечивается выбором либо одного метода обработки, либо последовательности нескольких методов обработки. Наука и практика технологии машиностроения накопили достаточную информацию о возможностях каждого метода обработки и о правилах построения плана обработки поверхности в зависимости от требуемой точности ее размерного описания [3, 4, 7, 8] и др. Справочная литература содержит рекомендации о типовых планах обработки поверхностей. Эта информация достаточна для практикующего технолога, проектирующего технологический процесс обработки конкретной детали.

Заданные конструктором размеры взаимного расположения поверхностей в конструктивной форме детали и их точность обеспечиваются в технологических процессах чаще всего соответствующим выбором технологических баз (ТБ). Важно иметь правила такого выбора ТБ, на основе которых практикующий технолог может принять обоснованное и однозначное решение, а во время обучения

будущему технологу можно будет убедительно объяснить, как этот выбор сделать. Учебники и учебные пособия по учебным дисциплинам "Основы технологии машиностроения" и "Технология машиностроения" содержат такую рекомендацию: для достижения наибольшей точности заданных конструктором размеров следует совмещать технологическую базу с конструкторской и измерительной базами [2, 5, 6, 8], некоторые авторы рекомендуют технологическую базу совмещать с основной конструкторской [5]. Большинство авторов эту рекомендацию называют "принципом совмещения баз". Считается, что при соблюдении этого принципа технолог может "... полностью использовать заданный конструктором допуск" [5].

К сожалению, пользуясь этим правилом в такой редакции, сделать однозначный выбор технологических баз практически невозможно.

Во-первых, потому что согласно ГОСТ 21495—76 конструкторская база может быть основной или вспомогательной, и в конструктивной форме практически каждой детали есть и та и другая — тогда с какой базой следует совмещать технологическую?

Например, для корпуса червячного редуктора обязательно задан размер межосевого расстояния между отверстиями под подшипники червяка и червячного колеса. Точность этого размера назначается конструктором в результате расчета размерной цепи, описывающей формирование межосевого расстояния передачи. Точность межосевого расстояния (допуск  $\pm f_a$ ) зависит от степени точности червячной передачи, вида сопряжения и регламентирована ГОСТ 9774—81. В этой размерной цепи размер между осями отверстий в корпусе является составляющим звеном, а исходное (замыкающее) звено — межосевое расстояние червячной передачи. Основная база корпуса редуктора в направлении межосевого расстояния отверстий — плоскость основания. Если эту поверхность при обработке отверстий в соответствии с приведенной выше рекомендацией принять в качестве технологической базы, то окажется, что межосевое расстояние  $K$  получается после обработки двух отверстий в лучшем случае на двух технологических переходах одной операции, в других случаях — на технологических

переходах обработки каждого отверстия на своей отдельной операции, как это показано на рис. 1.

Можно ли при этом на размеры  $T_1$  и  $T_2$ , получаемые на разных операциях, назначить допуски в соответствии с приведенной рекомендацией, равные допуску заданного конструктором размера  $K$ ? Ниже мы покажем, что нет и почему.

Во-вторых, согласно ГОСТ 21495—76 измерительная база используется при измерении, т.е. когда деталь уже изготовлена и технологическая база использована. В это время речь может идти о выборе измерительной базы и вряд ли она будет совмещаться с технологической.

Вместе с тем возможно придать принципу совмещения баз однозначность. Для этого нужно разделить понятия "конструкторский размер", которым конструктор задает положение поверхности в конструктивной форме детали, и "технологический размер", который получает технолог, обеспечивая этим заданную точность конструкторского размера.

Описывая положение поверхности в конструктивной форме детали, конструктор использует другую поверхность, ее ось или точку симметрии, от которой он и задает размер расположения. По сути, эта другая поверхность исполняет роль конструкторской базы, так как используется при проектировании для определения положения другой поверхности. Предлагается дополнить классификацию конструкторских баз по назначению, установленную ГОСТ 21495. Базирование и базы в машиностроении, третьей разновидностью, дав ей название "конструкторская размерная база". Конструкторская размерная база (КРБ) — это база, принадлежащая детали и используемая для определения положения относительно ее другой поверхности в конструктивной форме детали. Конструкторская размерная база позволяет определить понятие "конструкторский размер" — это размер, описывающий положение поверхности в конструктивной форме детали относительно КРБ.

При обработке поверхности для достижения заданного ее положения в конструктивной форме детали технолог для установки заготовки в технологическую систему (ТС) использует технологическую базу (ТБ) и получает технологический размер, который описывает положение обработанной поверхности относительно используемой при ее обработке технологической базы (на рис. 1 это размеры  $T_1$  и  $T_2$ ). В зависимости от выбора технологической базы этот размер может быть или не быть равным конструкторскому.

Используя предлагаемые понятия, принцип совмещения баз можно сформулировать следующим образом: для достижения наибольшей точности конструкторского размера расположения поверхности следует при ее обработке в качестве технологической базы использовать конструкторскую размерную базу. Справедливость этого правила легко показать на простом примере. На рис. 2, а показано, что в некотором корпусе необходимо обработать отвер-

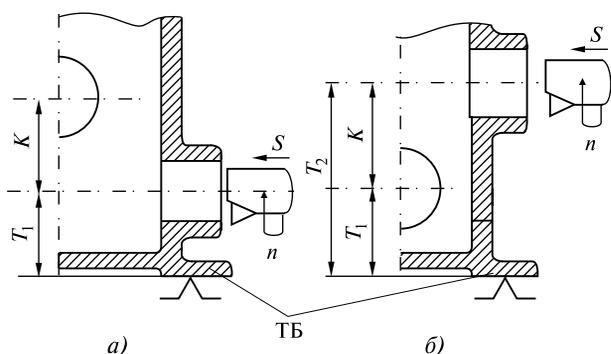


Рис. 1. Схемы обработки отверстий под подшипники в корпусе червячного редуктора

стие, положение которого задано конструктором размером  $K$  относительно плоскости основания, которая выполняет функцию КРБ. Связанные размером  $K$  плоскость КРБ и отверстие обрабатываются в двух ТС: фрезерной, схема которой приведена на рис. 2, б, и расточной, возможные варианты которой приведены на рис. 2, в и г. Требуемые показатели точности отверстия (диаметр, форма, шероховатость) обеспечиваются выбранным методом обработки, например чистовым растачиванием. Условия достижения этих показателей и результат одинаковы в обоих вариантах выполнения расточной операции.

Различие в вариантах заключается в используемых в каждом случае технологических базах: в варианте, приведенном на рис. 2, в в качестве технологической базы в направлении размера  $K$  технолог использует конструкторскую размерную базу — плоскость основания лапок, а в варианте, приведенном на рис. 2, г, — верхнюю плоскость корпуса, т.е. поверхность, отличную от КРБ, не совпадающую с ней.

Технолог выбором технологической базы для обработки отверстия может поставить себя в одну из двух ситуаций, и эти ситуации различаются по признаку совмещения при обработке отверстия технологической базы с конструкторской размерной базой. Различный выбор технологической базы для выполнения одной и той же операции приводит к существенным последствиям для достижимой точности заданного конструктором размера  $K$ .

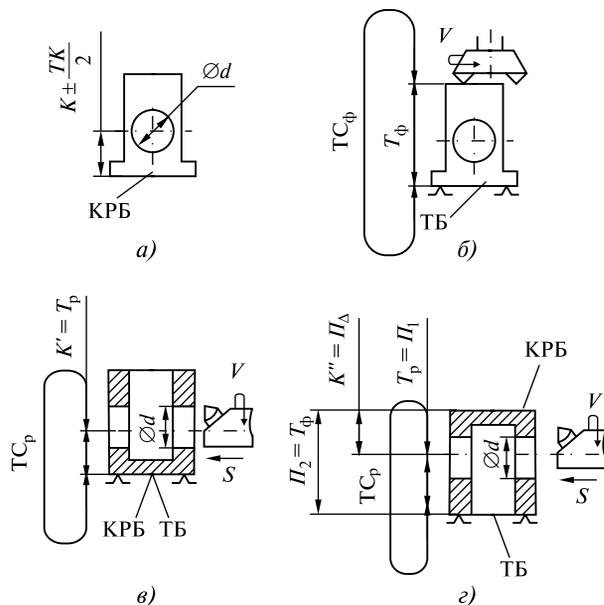


Рис. 2. Варианты достижения точности конструкторского размера  $K$  при различных схемах базирования корпуса на операции растачивания:

$TK$  — допуск размера, заданного конструктором;  $TC_p$  — технологическая система расточной операции;  $T_p$  — технологический размер при растачивании;  $TC_{\phi}$  — технологическая система фрезерной операции;  $T_{\phi}$  — технологический размер при фрезеровании;  $V$  — скорость резания;  $S$  — подача

В первом варианте при совмещении ТБ с КРБ (рис. 2, в) конструкторский размер  $K'$  получается равным технологическому размеру расточной операции  $T_p$ .

Величина и погрешность такого размера определяются только используемой для обработки технологической системой и условиями ее работы. Технологический размер и его погрешность не зависят от предшествующих или последующих операций, где обрабатываются другие поверхности детали, он формируется как замыкающее звено некоторой технологической размерной цепи, составляющими звеньями которой являются внутренние размеры используемой ТС.

На рис. 2 технологические размерные цепи, описывающие формирование технологических размеров, условно показаны дугами, хордами которых является технологический размер  $T_p$ . Итак, при совмещении ТБ с КРБ (растачивание отверстия по схеме, приведенной на рис. 2, в) заданный конструктором размер  $K$  получается равным технологическому размеру  $T_p$ ;  $K = K' = T_p$ . Из этого следует, что технолог может задать допуск технологического размера равным допуску конструкторского размера, т.е.

$$\omega K = \omega T_p \text{ и } TT_p = TK, \quad (1)$$

и для обеспечения требуемой точности размера  $K$  на операции растачивания необходимо обеспечить выполнение условия

$$\omega T_p \leq TK. \quad (2)$$

Во втором варианте (при несовмещении ТБ с КРБ, как на рис. 2, г) после растачивания отверстия на детали также образуется размер  $K = K''$ , однако его величина формируется уже как замыкающее звено  $\Pi_{\Delta}$  некоторой внешней по отношению к технологической системе расточного станка размерной цепи  $\Pi$ , составляющие звенья которой получаются на разных операциях обработки детали. Технологический размер  $T_p = \Pi_1$  в этом случае отличается от  $K$  и, оставаясь замыкающим для внутренней технологической размерной цепи технологической системы расточного станка, теперь уже входит первым составляющим звеном в размерную цепь  $\Pi$ . Вторым составляющим звеном цепи  $\Pi$ , как это видно из рис. 2, г, является размер  $\Pi_2$  между выбранной ТБ (верхней плоскостью корпуса) и КРБ (плоскостью основания лапок). В соответствии с теорией размерных цепей в этом случае погрешность конструкторского размера  $K''$

$$\omega K'' = \omega \Pi_{\Delta} = \omega \Pi_1 + \omega \Pi_2 = \omega T_p + \omega \Pi_2. \quad (3)$$

Размер  $\Pi_2$  получен на детали ранее, при выполнении фрезерной операции (см. рис. 2, б) и являлся технологическим размером на этой операции, т.е.

$$P_2 = T_\phi \text{ и } \omega P_2 = \omega T_\phi. \quad (4)$$

С учетом (3) достигаемая во втором варианте точность конструкторского размера определяется погрешностью

$$\omega K = \omega K'' = \omega T_p + \omega T_\phi, \quad (5)$$

равной сумме погрешностей технологических размеров на двух операциях: фрезерной  $\omega T_\phi$  и расточной  $\omega T_p$ . При выполнении операций фрезерования и растачивания технолог должен обеспечить выполнение условий

$$\omega T_\phi \leq TT_\phi \text{ и } \omega T_p \leq TT_p. \quad (6)$$

Это означает, что для достижения заданной конструкторской точности размера  $K$  во втором варианте необходимо будет назначить особые, более жесткие, допуски на технологические размеры обеих операций, отвечающие уравнению (5), записанному в полях допусков, т.е.

$$TK = TT_p + TT_\phi. \quad (7)$$

Конечно же, выполнение при обработке условий (6) во втором варианте с технической и экономической точки зрения представляет технологу гораздо больше трудностей, чем выполнение условия (2) при первом варианте базирования на расточной операции.

Конструктивная форма детали образована совокупностью множества поверхностей, взаимное расположение которых описано конструкторскими размерами, заданными от разных КРБ. Технологию необходимо выбрать ТБ для обработки каждой поверхности, и не всегда он может следовать принципу совмещения баз.

Используя предлагаемые понятия, можно обосновать и правила выбора ТБ по всему технологическому процессу для достижения заданной точности размеров расположения всех поверхностей в конструктивной форме детали. Положение каждой поверхности в чертеже детали описано конструкторским размером. Не обсуждая здесь соображения, которыми руководствуется конструктор при выборе КРБ для каждой поверхности, обратим внимание на то, что эти размеры могут быть расположены друг за другом, образуя "цепь", если для описания положения каждой поверхности используется новая КРБ, как показано на рис. 3, а, б (в практике бытует термин "цепной способ задания размеров"), либо заданы от одной КРБ, как показано на рис. 3, в, г (в практике в этом случае говорят о "координатном способе задания размеров"). Технолог, выбирая ТБ для обработки каждой поверхности, может следовать либо не следовать принципу совмещения баз. В результате выбора ТБ технолог может оказаться в одной из ситуаций, показанных на рис. 3 и в таблице.

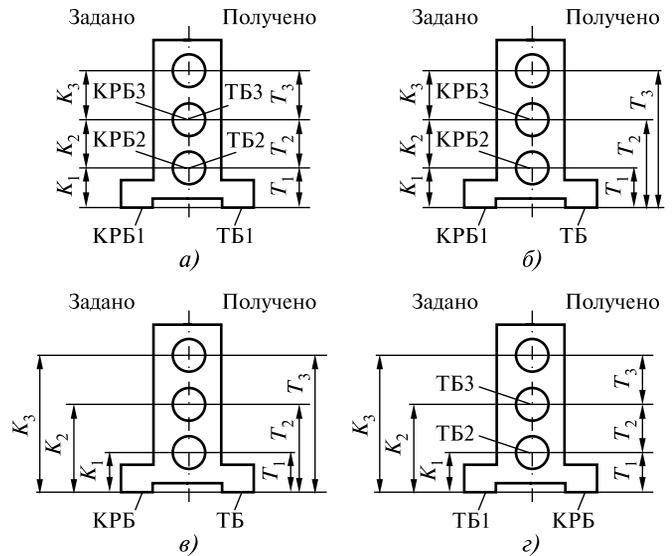


Рис. 3. Варианты технологического обеспечения конструкторских размеров расположения поверхностей

**Варианты технологического обеспечения конструкторских размеров расположения поверхностей**

Номер ситуации	Способ задания размеров конструктором	Способ получения размеров технологом
I (см. рис. 3, а)	Цепной	Цепной
II (см. рис. 3, б)	Цепной	Координатный
III (см. рис. 3, в)	Координатный	Координатный
IV (см. рис. 3, г)	Координатный	Цепной

В ситуациях I и III принцип совмещения баз соблюдается, поэтому каждый технологический размер и его допуск равны конструкторским. В ситуации I каждая поверхность обрабатывается при установке на новую ТБ, что требует другого приспособления, а возможно, и другой ТС. Это приведет к дополнительным материальным затратам на технологическую оснастку и к повышенным затратам времени на весь технологический процесс. Поэтому с организационно-экономической точки зрения ситуация II предпочтительнее, так как не требует переустановок на другую ТБ для обработки следующей поверхности, т.е. технологический процесс обработки детали в целом окажется более эффективным.

В ситуациях II и IV принцип совмещения баз не соблюдается и, следовательно, необходимо рассчитать и назначить технологические размеры для обеспечения требуемой точности расположения каждой обрабатываемой поверхности. В ситуации II каждый конструкторский размер обеспечивается получением двух технологических размеров, которые рассчитываются из технологических размерных цепей, аналогичных приведенной на рис. 2, г. Допуски этих размеров должны удовлетворять уравнению (6). Но при этом достигаются организационно-экономические

преимущества, характерные для ситуации III. Это делает ситуацию II привлекательной. Для ситуации IV характерны, во-первых, организационно-экономические недостатки, присущие ситуации I, и, во-вторых, необходимость назначения технологических размеров, как в ситуации II, с той лишь разницей, что таких размеров в технологической размерной цепи конструкторского размера может быть и более двух (например, размер  $K_3$  на рис. 3,  $z$  обеспечивается получением трех технологических размеров). Это приводит к повышенным требованиям к их точности, к дополнительным затратам на достижение их более высокой точности или даже к невозможности ее достижения. Поэтому ситуацию IV следует считать недопустимой.

Сравнительный анализ вариантов обеспечения точности конструкторских размеров расположения поверхностей позволяет обосновать важнейший принцип выбора технологических баз для всех операций технологического процесса — принцип единства баз. Он гласит: при выборе технологических баз необходимо стремиться использовать при обработке всех или большинства поверхностей детали одну и ту же (единую) технологическую базу (ЕТБ). Этот анализ также вооружает практикующего технолога достаточно простой методикой обоснованного назначения технологических размеров и их допусков. Однако этого недостаточно. Конечным результатом проекта технологии должна быть технологическая система, обеспечивающая возможность достижения точности технологического размера. Для того чтобы такую ТС выбрать или спроектировать, необходимо знать механизм формирования технологического размера, выявить роль каждой составляющей ТС (станка, приспособления, инструмента, заготовки) в образовании его погрешности, дать количественную оценку этих ролей. Для этого нужна модель формирования технологического размера за время обработки поверхности в ТС. Такой моделью может служить размерная цепь, замыкающим размером которой является технологический размер. Покажем это на примере, приняв за основу предложенное Б.С. Балакшиным разделение обработки в одной ТС на три независимых этапа — *установку, статическую и динамическую настройки*. На каждом этапе формируется свой размер, который становится составляющим звеном внутренней размерной цепи ТС.

Содержание и роль этапов в образовании технологического размера хорошо иллюстрируется примером фрезерования плоскости, положение которой на призматической детали задано конструкторскими размерами  $A_k$  и  $\varphi_k$  (рис. 4, *a*).

*Первый этап* — это установка. Под установкой понимают часть технологической операции, включающую действия, направленные на введение заготовки в кинематические и размерные цепи ТС, а также на придание ей определенного положения.

Технологическая база для фрезерования плоскости в примере выбрана в соответствии с принципом

совмещения баз. Такая схема базирования приведена на рис. 4, *б*. Поэтому технологические размеры равны конструкторским, т.е.  $A_t = A_k$  и  $\varphi_t = \varphi_k$ . Поверхности технологической базы заготовки материализуют ее собственную систему координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ .

В качестве выбранной системы координат используем систему  $OXYZ$ , построенную на исполнительных поверхностях установочных элементов приспособления (рис. 4, *в*). При базировании обеспечивается контакт в опорных точках 1...5 технологической базы заготовки с исполнительными поверхностями установочных элементов приспособления. Достигнутое при этом положение фиксируется силовым замыканием — силой зажима  $Q$ . Идеальным для этих процессов в примере, приведенном на рис. 4, является совмещение системы координат заготовки  $X_1O_1Y_1Z_1$  и приспособления  $OXYZ$ , т.е., когда размеры установки в каждом координатном направлении равны нулю. В силу ряда причин полного совмещения координатных систем при установке реальных заготовок не происходит. Эта ситуация для координатного направления  $Z$ , в котором предстоит получить на детали размеры  $A_t = A_k$  и  $\varphi_t = \varphi_k$ , показана на рис. 4, *г*.

Таким образом, в результате выполнения этапа установки в технологической системе формируются размеры установки  $A_y$  и  $\varphi_y$ . Конечно же, при установке партии заготовок эти размеры получают рассеяние. Поля их рассеяния называют погрешностями установки  $\omega_{A_y}$  и  $\omega_{\varphi_y}$  и в общем случае обозначают  $\omega_y$ .

Эти поля порождаются четырьмя причинами, и их величина есть функция соответствующих этим причинам элементарных погрешностей:

$$\omega_y = f(\omega_{ТБ}, \omega_{изг}, \omega_{изн}, \omega_{НБ}, \omega_3), \quad (8)$$

где  $\omega_{ТБ}$  — погрешность изготовления технологической базы заготовки, которой материализуется собственная система координат заготовки;  $\omega_{изг}$ ,  $\omega_{изн}$  — погрешность изготовления и допустимый износ установочных элементов приспособления, которыми материализуется выбранная система координат;  $\omega_{НБ}$  — погрешность неопределенности базирования (если в схеме базирования заготовки допущена неопределенность базирования);  $\omega_3$  — погрешность закрепления.

Так как все составляющие элементарные погрешности представляют собой поля рассеяния случайных величин, то погрешность установки для каждого конкретного случая можно определить их квадратичным суммированием.

*Второй этап* — статистическая настройка. Под статистической настройкой понимают совокупность действий, направленных на придание режущим кромкам рабочего инструмента определенного начального положения в неработающей (находящейся в статическом состоянии) технологической системе.

Положение режущих кромок инструмента определя-

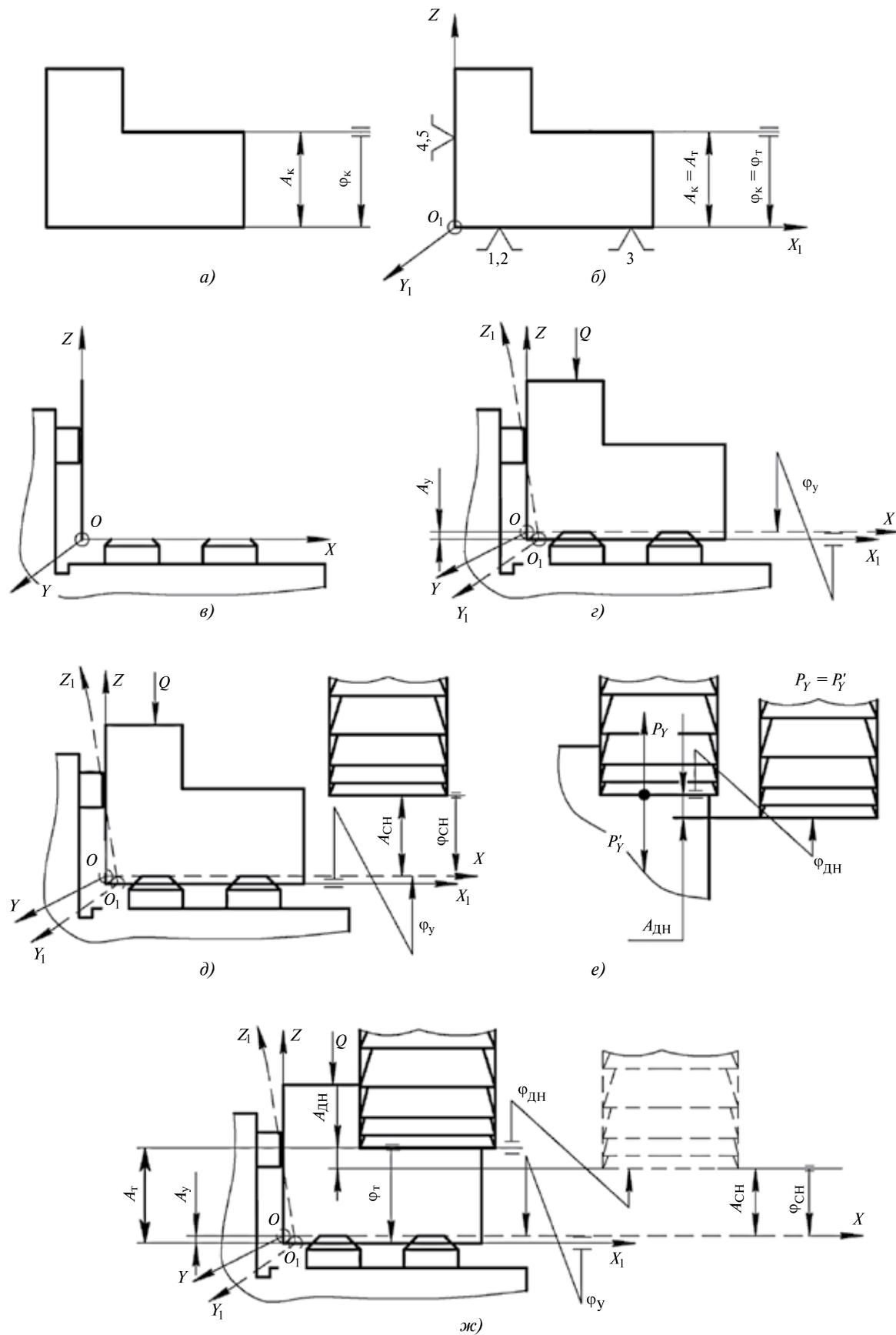


Рис. 4. Схема построения размерной цепи — модели формирования технологического размера

ется относительно тех же исполнительных поверхностей приспособления (или станка), которые использовались на этапе установки для определения положения заготовки, т.е. относительно плоскостей координатной системы  $OXYZ$ .

В примере, приведенном на рис. 4, *д*, положение инструмента в координатном направлении  $Z$  в статическом состоянии технологической системы определено размерами статической настройки  $A_{CH}$  и  $\varphi_{CH}$  относительно исполнительных поверхностей установочных элементов приспособления. Эти размеры формируются как замыкающие звенья внутренних размерных цепей статической настройки ТС. Составляющими звеньями этих цепей являются размеры оборудования (в примере это параллельность оси шпинделя плоскости зеркала стола), приспособления (в примере это параллельность плоскости установочных элементов  $OYX$  плоскости основания приспособления), инструмента (в примере это параллельность рабочих кромок фрезы оси базового отверстия), размер установки инструмента (в примере это параллельность оси базового отверстия фрезы оси шпинделя станка). Образующиеся поля рассеяния  $\omega A_{CH}$  и  $\omega \varphi_{CH}$  называют погрешностями статической настройки, в общем случае обозначаемыми  $\omega_{CH}$ .

*Третий этап* — динамическая настройка. Динамическая настройка — это собственно обработка, т.е. непосредственное взаимодействие режущих кромок инструмента с материалом заготовки. В результате этого этапа на детали создается новая поверхность, заданная конструктором.

Взаимодействие режущих кромок инструмента с материалом заготовки сопровождается всей совокупностью явлений, присущих процессу резания. В результате изменяется взаимное положение заготовки и инструмента, достигнутое в статическом состоянии технологической системы на первых двух этапах. Все эти изменения взаимного положения заготовки и инструмента можно придать инструменту, сохранив положение заготовки и других частей технологической системы, которые они имели в статике. Тогда результат этих изменений можно описать размерами  $A_{дн}$  и  $\varphi_{дн}$ , которые определяют положение режущей кромки инструмента во время обработки относительно положения этой же кромки в статике (рис. 4, *е*). Эти сконструированные размеры называют размерами динамической настройки. Они позволяют достаточно удобно провести анализ причин, вызывающих изменение взаимного положения заготовки и инструмента, и их роли в формировании технологического размера на детали.

Размеры  $A_{дн}$  и  $\varphi_{дн}$  не сохраняют свою величину даже при обработке одной заготовки, тем более в партии заготовок, что приводит к образованию их полей рассеяния за время обработки партии заготовок. Поля рассеяния  $\omega A_{дн}$  и  $\omega \varphi_{дн}$  размеров  $A_{дн}$  и  $\varphi_{дн}$  называют погрешностями динамической настройки и в общем случае обозначают  $\omega_{дн}$ .

В результате выполнения всех трех этапов получаем

обработанную деталь с технологическими размерами  $A_T$  и  $\varphi_T$ . Из схемы, приведенной на рис. 4, *ж*, видно, что эти размеры образуют вместе с размерами  $A_y, A_{CH}, A_{дн}$  и  $\varphi_y, \varphi_{CH}, \varphi_{дн}$  замкнутые контуры. Эти замкнутые контуры отвечают определению размерной цепи, так как размеры  $A_y, A_{CH}, A_{дн}$  и  $\varphi_y, \varphi_{CH}, \varphi_{дн}$  образуются в технологической системе в разное время и независимо друг от друга, и каждый из них участвует в решении поставленной технологической задачи: создать на готовой детали размеры  $A_T = A_k$  и  $\varphi_T = \varphi_k$ . Эти размерные цепи и представляют собой модели формирования технологических размеров. На основании теории размерных цепей

$$A_T = \xi_y A_y + \xi_{CH} A_{CH} + \xi_{дн} A_{дн};$$

$$\alpha_T = \xi_y \varphi_y + \xi_{CH} \varphi_{CH} + \xi_{дн} \varphi_{дн};$$

$$\omega A_T = \omega A_y + \omega A_{CH} + \omega A_{дн};$$

$$\omega \alpha_T = \omega \varphi_y + \omega \varphi_{CH} + \omega \varphi_{дн}$$

или в общем виде

$$\omega A_T = \omega_y + \omega_{CH} + \omega_{дн}, \quad (9)$$

т.е. погрешность технологического размера при обработке есть сумма погрешностей установки, статической и динамической настроек. Из (9) следует, что повышения точности обработки, т.е. уменьшения погрешности технологического размера, можно добиться, уменьшая погрешности установки, статической и динамической настройки. Ясно, что наибольшего эффекта можно добиться при уменьшении всех трех слагаемых. Для реализации этого необходимо знать причины появления погрешностей  $\omega_y, \omega_{CH}, \omega_{дн}$  и возможные меры воздействия на их величину.

Описанная выше модель формирования технологического размера, а также результаты многолетних и многочисленных исследований, посвященных получаемой в технологических процессах точности обработки деталей, позволяют сегодня представить последовательность работ по проектированию технологической операции и ТС для ее реализации, обеспечивающих достижение требуемой точности технологического размера, а также описать их содержание.

Последовательность работ, обеспечивающих при проектировании технологической операции получение требуемой точности конструкторского размера, приведена в виде алгоритма на рис. 5.

В ходе проектирования технологического процесса на этапе выбора технологических баз, используя принципы совмещения и единства баз для обработки каждой поверхности, разрабатывается схема базирования заго-

товки (блок 2 алгоритма, приведенного на рис. 5). Схема базирования позволяет определить технологические размеры, обеспечивающие получение заданного конструктором размера расположения обработанной на операции поверхности. Если технологическая база совмещена с конструкторской размерной, то конструкторский размер получается как технологический на проектируемой операции (блок 4 алгоритма), если же принцип совмещения баз не выдержан, то конструкторский размер получается в результате выполнения двух операций — проектируемой и одной из предыдущих — и образуется как замыкающее звено размерной цепи, в которой составляющими являются два технологических размера, получаемые на этих операциях (блок 5 алгоритма).

В любом случае рассчитывается и затем назначается допуск технологического размера на проектируемой операции (блоки 6 и 7 алгоритма).

Дальнейшая разработка операции должна обеспечить условие, приведенное в блоке 8 алгоритма. Это условие означает, что надо либо выбрать из числа имеющихся, либо сконструировать и спроектировать технологическую систему, позволяющую получить на выходе поле рассеяния технологического размера, не превышающее заданное в результате выполнения блоков 6 и 7 поле допуска. Как построить такую технологическую систему?

Погрешность технологического размера складывается из погрешностей установки, статической и динамической настроек (блок 9 алгоритма).

Поскольку схема установки заготовки на операции определена, может быть рассчитана погрешность установки (блок 10 алгоритма). Точность технологической базы  $\omega_{ТБ}$  известна, требования к точности установочных элементов приспособления  $\omega_{изг}$  могут быть заданы. Параметры режима резания определены, поэтому сила зажима может быть рассчитана, и, следовательно, может быть рассчитана погрешность закрепления  $\omega_3$ . Если в схеме базирования предусмотрена неопределенность базирования, то может быть определена и погрешность  $\omega_{НБ}$  как минимальный зазор в посадке соединения заготовка—установочный элемент приспособления (например, в соединении базовое отверстие заготовки — цилиндрический палец).

Рассчитанная погрешность установки может быть принята за допуск размера установки (блок 11 алгоритма). Назначив допуск размера установки, можно определить часть допуска технологического размера, которая остается для компенсации погрешностей статической и динамической настроек (блок 12 алгоритма).

Имеющиеся сегодня сведения о соотношении погрешностей статической и динамической настроек, входящие в определяемую в блоке 12 сумму и приве-

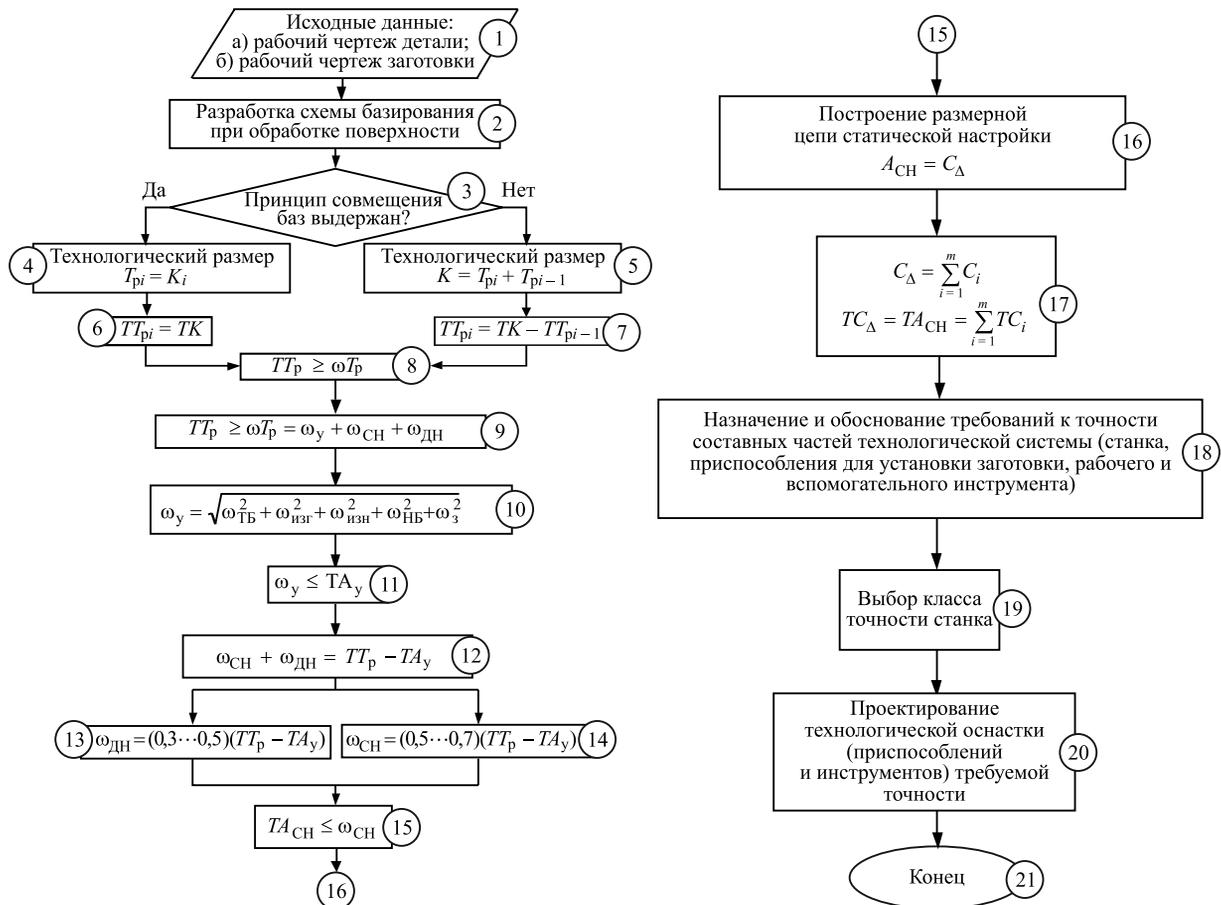


Рис. 5. Алгоритм обеспечения требуемой точности конструкторского размера при проектировании технологической операции

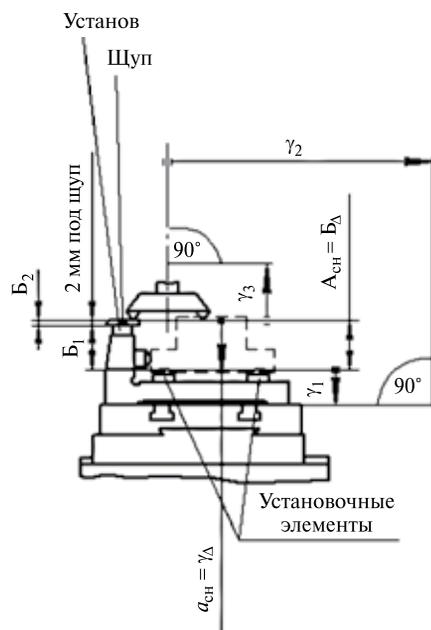


Рис. 6. Размерные цепи статической настройки технологической системы вертикально-фрезерной операции

денные в блоках 13 и 14 алгоритма, позволяют выделить с некоторым приближением погрешность статической настройки  $\omega_{сн}$  и на этой основе назначить допуск размера статической настройки (блок 16 алгоритма).

Размер статической настройки образуется как замыкающее звено технологической размерной цепи используемой на операции технологической системы. Поэтому блок 18 алгоритма предусматривает построение такой размерной цепи, замыкающее звено которой и есть размер статической настройки (блок 17 алгоритма). В алгоритме эта цепь условно обозначена буквой *C* (блок 17). Примеры таких размерных цепей приведены на рис. 6.

Решением прямой задачи определенный в блоке 15 алгоритма допуск размера статической настройки распределяется между составляющими звеньями размерной цепи, которые представляют собой размеры составляющих элементов технологической системы — станка, рабочего инструмента, приспособлений для установки заготовки и для установки рабочего инструмента. Это позволяет, во-первых, обосновать требуемую точность технологического оборудования, рабочего инструмента, приспособлений (блоки 17, 19, 20 алгоритма) и, во-

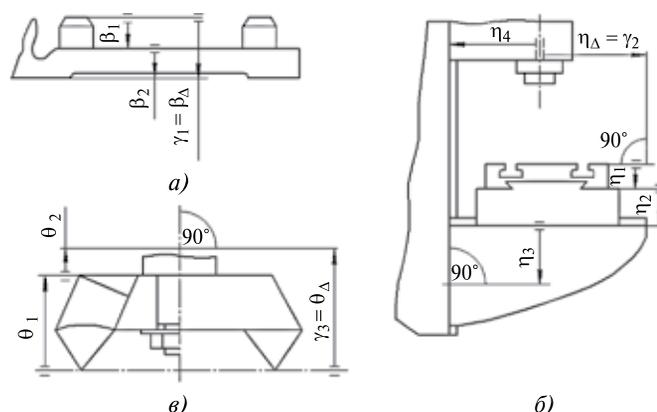


Рис. 7. Размерные цепи подсистем технологической системы вертикально-фрезерной операции:

*a* — размерная цепь формирования в приспособлении звена  $\gamma_1$ ; *б* — размерная цепь формирования в станке звена  $\gamma_2$ ; *в* — размерная цепь формирования звена  $\gamma_3$  при установке фрезы

вторых, создает основу для обоснованного назначения размерной точности проектируемых приспособлений и рабочих инструментов в ходе расчетов производных размерных цепей, примеры которых приведены на рис. 6, 7.

В результате проведенных расчетов и обоснований формируется технологическая система, которая с высокой вероятностью обеспечит достижение точности технологического размера, гарантирующей заданную точность конструкторского размера.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения. М.: Высш. шк., 2001.
2. Технология машиностроения: учебник для вузов / Л.В. Лебедев и др. М.: Изд. центр "Академия", 2006. 528 с.
3. Мельников А.С. Технология машиностроения: основы достижения качества машин. Ростов-н // Д.: Изд. центр ДГТУ, 2009. 430 с.
4. Мельников А.С., Тамаркин М.А. Инженерное обеспечение качества машин. Ростов-н // Д.: Изд. центр ДГТУ, 2011. 230 с.
5. Сулов А.Г. Технология машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2007. 430 с.
6. Технология машиностроения: учеб. пособие для вузов. В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков и др.; под ред. С.Л. Мурашкина. М.: Высш. шк., 2003.
7. Физико-технологические основы методов обработки / Бабичев А.П. и др.; под ред. А.П. Бабичева. Ростов-н // Д.: Феникс, 2006. 409 с.
8. Тимирязев В.А., Вороненко В.П., Схиргладзе А.Г. Основы технологии машиностроительного производства. СПб.: Изд-во "Лань", 2012. 442 с.

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

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19; факс: (499) 269-48-97.

Технический редактор *Беликова Е.И.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 04.06.2015 г. Подписано в печать 15.07.15 г. Формат 60×88 1/8.

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

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru