На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Александр Сергеевич

НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ В МНОГОСВЯЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Специальность: 05.02.08 –технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2001

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный консультант: Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор, Дальский А.М.

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор, Безъязычный В.Ф.
Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор, Гречишников В.А.
тор технических наук,
фессор, Барзов А.А.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1572657
Васильев А.С. Направленное

1572657
Васильев А.С.
Направленное формиро
вание качества издел
2001 0.00
12.10.12 3-43

НПЦ ММПП "Салют"

2001 г. в 14^{30} час.
ета Д212.141.06 при Московском
ете им. Н.Э.Баумана по адресу:

ире, заверенный печатью, просим
ного секретаря диссертационного

2001 г.

в библиотеке Московского
ета им.Н.Э.Баумана.

Сгибнев А.В.

1572657

ъем 2 п.л. Тир. 100 экз.
пография МГТУ им.Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема обеспечения качества изделий машиностроения существовала всегда. Усложнение конструкций изделий машиностроения, условий их производства и эксплуатации требуют особого внимания к обеспечению качества современной техники. В 20 веке точность по определенным классам соединений элементов машин возросла до 2000 раз. Особые условия техника предъявляет к допустимым значениям параметров точности в прецизионном машиностроении (производство пневмо- и электроприводов, гироскопов, турбодетандеров, систем наведения и слежения и др.). Разработка технологических процессов изготовления изделий машиностроения неизменно связана с преодолением существенных трудностей. Достижение заданных значений показателей свойств и качества поверхностного слоя материала заготовки, необходимых для обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, часто находятся в противоречии с обеспечением заданных показателей геометрической формы. Традиционные подходы к технологическому обеспечению качества деталей изделий, основанные на суперпозиционном представлении процессов формирования свойств изделий в настоящее время себя не всегда оправдывают. Не достаточно разработано методик, позволяющих на стадии проектирования технологических процессов гарантировать получение заданных свойств изделий. До настоящего времени вопрос об учете многих одновременно действующих технологических факторов, взаимно влияющих друг на друга, не ставился, поскольку не были сформулированы даже общие подходы к решению проблемы. Возникло противоречие между многосвязным характером технологических взаимодействий, представляющим, в целом, известный факт, и суперпозиционным подходом к определению результатов этих взаимодействий, по сути игнорирующим эту многосвязность.

Сказанное подтверждает, что исследования, направленные на решение проблемы обеспечения качества изделий машиностроения, связанные с изучением основных закономерностей и характеристик многосвязного технологического формирования качества указанных изделий весьма актуальны.

Цель и задачи работы. Целью работы является обеспечение качества изделий машиностроения на этапе подготовки производства.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка основных положений теории многосвязных технологических сред. Определены базовые понятия, свойства и основные характеристики технологических сред и установлена их иерархия. Вскрыты основные закономерности трансформации свойств изделий в многосвязных технологических средах. Определены основные положения методологии создания многосвязных технологических сред для направленного

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

формирования показателей качества.

2. Исследование процессов формирования свойств изделий машиностроения в многосвязных технологических средах. Вскрыты и исследованы закономерности взаимного влияния свойств изделий в процессе их изготовления. Исследованы характеристики трансформации и сохранения свойств изделий при их изготовлении. Рассмотрены процессы формирования показателей качества изделий с учетом взаимного влияния и взаимодействия указанных показателей.
3. Моделирование взаимодействий в многосвязных технологических средах. Разработаны функциональные модели многосвязных технологических сред. Созданы программные комплексы моделирования многосвязных сред и выполнено имитационное моделирование процессов трансформации и сохранения свойств изделий в многосвязных технологических средах.
4. Разработка методического обеспечения направленного формирования качества изделий машиностроения. Созданы методики распределения уровней свойств изделий на этапах технологического процесса, определения характеристик и резервов технологических сред. Предложена методология проектирования технологических процессов изготовления изделий с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества.
5. Практическая реализация методологии направленного формирования качества изделий машиностроения. Выполнено оценивание взаимного влияния и взаимодействия характеристик технологических сред при изготовлении прецизионной детали (на примере изготовления кольца прецизионного подшипника). Разработаны методика и технологические регламенты направленного обеспечения качества деталей из триботехнических конструкционных материалов. Предложены рабочие методика и регламенты комплексного формирования многосвязной технологической среды изготовления высокоточного электрошпинделя.

Методы исследований. Использованы основные положения технологии машиностроения, теории технологического наследования, методы математического моделирования, системно-структурного анализа, теории принятия решений, теории автоматизированного проектирования. Экспериментальные исследования, связанные с обеспечением качества изделий машиностроения выполнялись на разработанных экспериментальных установках и в реальных производственных условиях. Исследования предложенного методического обеспечения, моделей и алгоритмов выполнялись на современной вычислительной технике с использованием средств графического отображения информации. Результаты исследований и предлагаемые технические решения прошли производственную проверку.

Научная новизна. Выявлены основные закономерности и разработаны характеристики формирования качества изделий в многосвязных технологических средах. Впервые разработана система

регламентирования условий многосвязного взаимодействия элементов сред и определены правила их использования при направленном формировании качества изделий.

Получены новые научные результаты, выносимые на защиту:

- базовые положения теории технологических сред;
- методы определения характеристик изменения и сохранения свойств изделий при взаимодействии с многосвязными технологическими средами;
- основные положения методологии создания многосвязных технологических сред для направленного формирования показателей качества;
- программные комплексы моделирования взаимодействий в многосвязных средах;
- методика определения оптимальных уровней свойств для каждого этапа сквозного технологического процесса изготовления изделий;
- метод определения ожидаемой точности изготовления деталей с учетом взаимного влияния первичных погрешностей;
- методика определения резервов технологических сред;
- методология проектирования технологических процессов с учетом закономерностей изменения и сохранения свойств предмета труда.

Практическая ценность работы состоит:

- в создании научно-методической базы направленного формирования качества изделий машиностроения;
- в создании программных комплексов моделирования взаимодействий в многосвязных средах, позволяющих оценивать возможность достижения заданного качества при формировании проектных технологических решений;
- в разработке метода расчета ожидаемых погрешностей изготовления деталей с учетом взаимного влияния формирующихся показателей качества и характеристик формирующих сред;
- в применимости предложенных методики и регламента к направленному обеспечению качества деталей из триботехнических композиционных материалов;
- в приложении методики и регламента к комплексному формированию многосвязной технологической среды изготовления высокоточного электрошпинделя;
- в возможности использования результатов в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 1201 "Технология машиностроения", а также на факультетах повышения квалификации специалистам машиностроения и приборостроения.

Реализация работы. Внедрены разработанные практические приложения научно-методической базы направленного формирования качества изделий машиностроения. Результаты работы представлены для реализации в виде методического, программно- математического обеспечения и практических рекомендаций по направленному

формированию качества изделий. Разработанные конструкторско-технологические мероприятия внедрены на Московском заводе скоростных прецизионных электроприводов в период с 1980 по 1993 г.г. при создании электро- и пневмоприводов для внутришлифовальных, координатно-шлифовальных станков. Достоверность внедрения подтверждена актами о внедрении и справками об использовании результатов исследований в технологических процессах изготовления прецизионных электро- и пневмоприводов.

Результаты работы, в совокупности с результатами других разработок, удостоены Премии Совета Министров СССР в области науки и техники " За разработку и внедрение в народное хозяйство гаммы высокооборотных электроприводов на основе технологического обеспечения их точности и надежности".

Результаты работы нашли применение в учебном процессе:

- подготовлен и читается курс лекций "Технология производства прецизионных изделий" для студентов специальности 1201 "Технология машиностроения ";
- материалы работы вошли в учебник "Технология машиностроения" в 2-х томах (1998 г.);
- материалы работы использованы в 2 учебных пособиях, 5 методических указаниях.

Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись по планам научно-технических программ: "Конверсия и высокие технологии 1997-2000 г.г.", "Машиностроение, механика и процессы управления", "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий", "Научные исследования высшей школы в области транспорта", а так же в рамках выполнения гранта Министерства образования РФ.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и получили одобрение на: Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность технологических комплексов ", Москва, 1978 г.; Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность и качество машин ", Москва, 1981 г.; Всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы технологии машиностроения ", Москва, 1986 г.; научно-технической конференции "Интенсификация-88 ", Горький, 1988 г.; 26-ой республиканской научно-технической конференции, Улан-Удэ, 1987 г.; Международной научно-технической конференции "Проблемы повышения качества машин", Брянск, 1994 г.; Международном научно-техническом семинаре "Качество поверхности", Брянск,1995 г.; юбилейной Международной научно-технической конференции, Тула, 1996 г.; 2-й Международной научно-технической конференции "Износостойкость машин", Брянск, 1996 г.; 3-й Международной научно-технической конференции , Брянск, 1998 г.; Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии", Москва, 1998 г.;

Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы повышения качества машиностроительной продукции", Владимир, 1999 г.; IV международном конгрессе " Конструкторско - технологическая информатика – 2000", Москва, 2000 г., International Scientific- technical Conference "Technology-2000" Oryol, 2000 г., сессии головного совета «Машиностроение» при Министерстве образования Российской Федерации по проблеме "Повышение качества машин и инструментов", Брянск, 2000 г.

Публикации. По теме работы опубликовано 30 основных работ. Материалы исследований использованы в учебнике. Под руководством автора выполнено 5 научно-исследовательских работ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка использованной литературы из 112 наименований и 7 приложений. Работа содержит 407 страниц, в том числе 337 страниц основного текста, 147 рисунков, 62 таблицы, а так же приложения на 70 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования научные положения и результаты, выносимые на защиту, а так же изложена структура работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения качества изделий машиностроения. Показано, что проблема обеспечения качества изделий машиностроения существовала всегда. Основная тенденция развития техники связана с существенным ужесточением параметров изделий машиностроения. Наиболее интенсивно ужесточаются параметры геометрической точности.

Основы технологического обеспечения точности созданы трудами А.П.Соколовского, В.М.Кована, В.С.Корсакова, Б.С.Балакшина. Значительный вклад в разработку теории точности и технологического обеспечения точности внесли известные ученые: Б.М.Базров, А.А.Барзов, В.Ф.Безъязычный, Б.В.Бойцов, С.А.Васин, А.М.Дальский, С.Н.Корчак, И.М.Колесов, В.А.Кудинов, А.А.Маталин, В.Г.Митрофанов, В.С.Мухин, А.Н.Овсеенко, В.Т.Портман, А.С.Проников, А.В.Пуш, Э.В.Рыжов, В.М.Смелянский, Ю.М.Соломенцев, Н.М.Султан-Заде, А.Г.Суслов, М.Л.Хейфец, А.С.Ямников, П.И.Ящерицин и др.

Обеспечение и повышение точности немыслимо без серьезных научных достижений в области создания металлорежущих станков и инструмента. В этой области необходимо выделить труды Г.Н.Васильева, В.А.Гречишникова, А.Е.Древаля, П.М.Чернянского, Б.И.Черпакова, М.А.Эстерзона и др.

В связи с ростом требований к точности машин на ведущее место выходит прецизионное машиностроение, для которого характерны особые

условия дальнейшего развития. Результаты исследований процессов управления точностью на этапах обработки заготовок и сборки представлены в трудах А.М.Дальского, П.Н.Орлова, Ш.М.Билека.

Основой для управления свойствами указанных изделий может рассматриваться теория технологической наследственности, разрабатываемая научными школами А.М.Дальского, Н.Д.Кузнецова, П.И.Ящерицина, В.И.Никитина. Теория технологической наследственности позволяет вскрыть связи и взаимообусловленность предшествующих и последующих технологических операций на всех этапах машиностроительного производства. Вместе с тем, аппарат количественного описания изменения свойств изделий при их изготовлении, используемый теорией технологической наследственности, нуждается в совершенствовании.

Отличительной особенностью существующих подходов к определению (оценки) и прогнозированию качества изготовляемой машиностроительной продукции является использование принципа суперпозиции, согласно которого каждый из действующих технологических факторов действуют независимо от других, а результат их совместного действия определяется их парциальной суммой, представляемой в той или иной форме.

Технологические системы многосвязны, объекты производства характеризуются нелинейностью, необратимостью и неравновесностью. Однако, применение принципа суперпозиции, по своей сути, сводит многосвязные взаимодействия, осуществляемые в технологических системах, к односвязным, игнорируя взаимное влияние технологических факторов. В частности, это проявляется в расчетно-аналитическом методе определения точности обработки, предложенном А.П.Соколовским и В.М.Кованом, и до сих пор используемом в производстве.

Рост требований к качеству изготовления элементов машин делает методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции малопригодными, так как эффект взаимного влияния факторов в данных условиях становится соизмеримым с результатами их прямого воздействия. Работами школы А.М.Дальского показано, что при изменении квалитета основного размера поверхности детали с IT14 до IT3 доля наследуемой составляющей в балансе показателя качества возрастает от 0 до 45 – 50% и более. Это, в свою очередь, убедительно указывает на то, что процесс изменения свойств изделий может рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов собственно изменения и сохранения указанных свойств.

Множественность свойств изделий, каждое из которых может характеризоваться соответствующим множеством показателей качества, является также проявлением многосвязности технологических факторов при формировании последних.

Свойства изделия формируются при его изготовлении взаимосвязано. Однако в производственной практике машиностроения этот факт учитывается слабо.

При проектировании технологических процессов чаще всего прослеживается изменение весьма ограниченного числа показателей качества (наиболее часто – точности размера и шероховатости). Изолированное рассмотрение процесса формирования локального множества выделенных показателей качества может привести к серьезным ошибкам при проектировании и реализации технологических процессов. Это связано с тем, что технологическое воздействие, проводимое с целью желаемого изменения некоторого-(ых) показателя-(ей) качества может вызвать абсолютно неприемлемое изменение других. Наиболее наглядно данный факт иллюстрируют процессы, связанные с изменением напряженного состояния в поверхностном слое. Последнее может вызвать нежелательное изменение (ухудшение) показателей качества, характеризующих геометрическую форму детали, а также иных показателей качества поверхностного слоя. Работами школы, возглавляемой А.Г. Сусловым, убедительно доказано взаимное влияние показателей качества поверхностного слоя при различных условиях их формирования.

Определение и оценка изменений показателей качества изделий в сквозных технологических процессах их изготовления с учетом взаимного влияния формирующихся показателей затруднена отсутствием аппарата описания трансформации свойств изделий, усугубляемым многосвязным характером взаимодействий формирующихся показателей. Для разработки такого аппарата необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств изделий.

Показано (Колесов И.М.), что аппарат описания трансформации свойств изделий может быть создан, если бы существовала возможность определения «передаточных функций» элементов технологического процесса. К сожалению, конкретных рекомендаций по методике определения указанных функций в современной технологической литературе не приводится.

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств могла бы способствовать замена множества технологических объектов, взаимодействующих с предметом производства, одним объектом – технологической средой при тождественности результатов взаимодействия. Формальное определение характеристик многосвязной технологической среды позволило бы при известных (заданных) результатах ее взаимодействия с предметом производства находить желаемые (или даже оптимальные) значения указанных характеристик, то есть осуществлять направленное формирование технологических сред. Технологическая среда должна предусматривать благоприятное развитие полезных свойств предмета производства и пресечение развития (барьеры) свойств, снижающих

качество изделий.

Технические трудности, связанные с описанием многосвязных взаимодействий при формировании множества показателей качества предмета производства при изготовлении изделия могут быть преодолены на основе применения современных информационных технологий и методологии принятия технологических решений, большой вклад в развитие которых внесли: В.И.Аверченков, В.Ф.Горнев, Н.М.Капустин, В.Ц.Зориктуев, И.П.Норенков, В.В.Павлов, В.Д.Цветков и др. Разрабатываемые в рамках исследования программные средства представляют собой средства автоматизированной поддержки технологических решений, принимаемых и реализующихся в производственно-технологическом цикле, включающем технологическую подготовку и непосредственное производство изделий машиностроения.

Проведенный анализ выявил наличие актуальной проблемы обеспечения качества изделий машиностроения. Ее актуальность возрастает в связи с ростом требований к качеству машин, обусловленным усложнением их конструкций, условий производства и эксплуатации. Сказанное позволяет сделать вывод об исключительной актуальности исследования основных закономерностей и характеристик многосвязного технологического формирования качества изделий машиностроения.

Основная научная идея работы:

1. Качество изделия в производственно-технологическом цикле формируется при взаимодействии предмета производства с технологическими средами различных уровней.
2. Процесс формирования качества предмета производства – совокупность процессов изменения и сохранения его свойств.
3. Технологические среды многосвязны, стохастичны, но относительно стабильны.
4. На каждом этапе процесса формирования качества изделия могут быть определены наиболее желательные значения характеристик изменения значения свойств предмета производства при взаимодействии с технологическими средами.
5. Значение характеристик изменения и сохранения свойств позволяет сформировать необходимые технологические среды и выполнить корректировку ранее принятых решений с целью гарантированного обеспечения качества изделий.

Предметная область работы – технологическая подготовка производства и изготовление изделий машиностроения инвариантно их классу и типу производства. Объект исследования – процесс формирования качества изделий (по технологическим переделам), на примере изготовления прецизионных изделий машиностроения.

Во второй главе изложены результаты исследования многосвязности в технологических средах.

Любой этап технологического процесса изготовления изделия сопровождается взаимодействиями различных технологических объектов.

Технологический объект (ТО) – любой из объектов, в результате взаимодействия которых происходит определение или изменения состояния предмета производства при изготовлении изделия. Множества ТО, взаимодействующих в процессе изготовления изделия образуют технологические системы. Различают (ГОСТ 27.202 – 83) технологические системы уровней операции, процесса, производственного подразделения, предприятия.

Технологическая среда – совокупность ТО, взаимодействующих с выделенным ТО на отдельном этапе изготовления изделия. Выделенным ТО могут быть: предмет производства (заготовка, сборочная единица); отдельная технологическая операция; процесс и т.д. Средой является всё, что не принадлежит выделенному ТО, но с чем у выделенного ТО имеется связь. Если в технологической системе уровня операции механической обработки выделяют ТО – заготовку, то технологическую среду уровня операции по отношению к ней образуют инструмент и приспособление (рис.1).

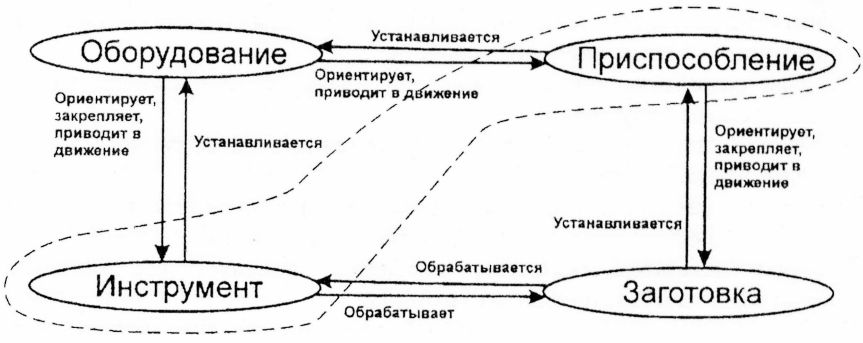


Рис. 1. Структура технологической системы и образование среды уровня операции механической обработки

Оборудование здесь не входит в состав среды прямо, но, приводя в движение приспособление и инструмент, опосредованно участвует в формировании среды. Технологическая среда может быть внутрисистемной или внешней (соответствующей другому уровню иерархии). Уровни рассмотрения сред соответствуют уровням представления технологических систем. Определены основные виды технологических сред уровней операций для различных переделов машиностроительного производства.

Технологические среды виртуальны, иерархичны и многосвязны как по совокупному влиянию на показатели качества предмета производства, так и по характеру взаимодействий в процессе формирования свойств изделий.

Многосвязность предполагает рассмотрение процесса формирования любого из совокупности свойств предмета производства как результата одновременных и предшествующих его взаимодействий со средами различных уровней, влияющих на выделенное свойство. Взаимодействие не рассматривается суперпозиционно. Свойства изделия определяются свойствами исходных заготовок и формирующей технологической средой сквозного процесса его изготовления. Показано, что формирование свойств изделия может рассматриваться как совокупность процессов их направленного изменения и сохранения.

Формируемые в ходе технологического процесса изготовления свойства (показатели качества) можно разделить на:

1. Изменяемые свойства.
2. Квазистабильные свойства.

Изменяемые свойства могут трансформироваться в зависимости от этапа процесса изготовления. Квазистабильные свойства, появившись на определенном этапе изготовления изделия, входят в состав множества его выходных свойств. Процесс изготовления не предусматривает прямого технологического воздействия на квазистабильные свойства, но они могут измениться в результате технологических (и связанных с ними) воздействий, направленных на изменение иных свойств.

При разработке аппарата описания трансформации свойств изделия (детали) введены допущения:

1. Качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории.
2. Любое (технологическое и связанное с ним) воздействие на заготовку изменяет все показатели качества (свойства) заготовки.
3. Любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества (свойства) заготовки.

Множество значений показателей качества изделия (детали) после выполнения j операции его изготовления $[K]_j$ определяется:

$$[K]_j = [K]_{j-1} + [\Delta K]_T + [\Delta K]_Y + [\Delta K]_P, \qquad (1)$$

где $[K]_{j-1}$ – множество (вектор-столбец) значений показателей качества, характеризующих состояние изделия (детали) после выполнения предшествующей $(j-1)$ операции; $[\Delta K]_T$ – множество изменения значений показателей качества изделия вследствие прямого воздействия технологических методов операции; $[\Delta K]_Y$ – множество изменения значений показателей качества изделия вследствие воздействия условий реализации технологических методов операции; $[\Delta K]_P$ – множество изменения значений показателя качества изделия (детали), связанных с предысторией.

Выражение (1) представимо в форме:

$$[K_i]_j = [K_i]_{j-1} + [k_i]_j\,[K_i]_{j-1} + [u_i]_j\,[K_i]_{j-1} + [k_{il}]\,[K_i]_{j\bullet}, \qquad (2)$$

где $[K_i]_j$ – вектор-столбец показателей качества изделия после выполнения j операции; $[K_i]_{j-1}$ – вектор-столбец показателей качества изделия после выполнения предшествующей $(j-1)$ операции; $[k_i]_j$ – матрица коэффициентов изменения показателей качества изделия при использовании j технологического метода; $[u_i]_j$ – матрица коэффициентов изменения показателей качества изделия, связанных с условиями реализации j технологического метода; $[k_{il}]$ – матрица коэффициентов, характеризующих изменение i показателя качества в зависимости от показателя качества l ($i \neq l$; $i,l = 1,\ldots,n$); n – общее число показателей качества изделия; $[K_i]_{j*}$ - вектор-столбец значений показателей качества изделия, сформированных до выполнения операции j, но проявляющихся в последней. Три первых слагаемых в (2) характеризуют взаимодействие с предметом производства многосвязной технологической среды уровня операции, а последнее – среды уровня процесса. На основе (2) предложены выражения для определения математических ожиданий и дисперсий значений $[K_i]_j$, учитывающие случайный характер входящих в рассматриваемое выражение величин. Выражение (2) может быть представлено в более компактных формах:

$$[K_i]_j = [m_i]_j [K_i]_{j-1} + [u_i]_j [K_i]_{j-1} + [k_{il}] [K_i]_{j*} \quad (3)$$

или

$$[K_i]_j = [S_i]_j [K_i]_{j-1} + [k_{il}] [K_i]_{j*}, \quad (4)$$

где $[m_i]_j$ – матрица значений коэффициентов оперативного изменения i показателя качества при использовании j технологического метода; $[S_i]_j$ – матрица значений коэффициентов изменения i показателя качества при взаимодействии предмета производства со средой уровня операции, реализующей j технологический метод. Для сред, реализующих методы механической обработки $S_i \leq 1$, для методов химико-термической обработки $S_i > 1$. Элементы матриц $[S_i]_j$, $[k_{il}]$ являются основными характеристиками трансформации показателей качества предмета производства при взаимодействии с технологическими средами соответствующего уровня. Их значения зависят от состояния образующих среду объектов.

Выполнен теоретический анализ и разработаны общие методики определения характеристик технологических сред. На базе (3), (4) разработан математический аппарат описания трансформации свойств детали (как комплекса взаимосвязанных поверхностей) в процессе ее изготовления. Для каждого конкретного представления многосвязной технологической среды соответствующего уровня и конкретного характера связей, образующих ее объектов могут быть определены взаимосвязи характеристик среды и показателей качества предмета производства.

Для эффективного применения предложенного аппарата необходимо наличие:

1. Развитого информационного обеспечения – значений элементов матриц

$[S_i]_j$, $[k_{il}]$ для различных реализаций многосвязных технологических сред различных уровней.

2. Правил применения формальных выражений трансформации свойств.
3. Концепции формирования модели сквозного технологического процесса изготовления изделия.

Значение характеристик технологических сред и закономерностей их изменения позволяет сформировать основную задачу направленного формирования свойств (показателей качества) изделия: при известных входных (начальных) и выходных (конечных) свойствах предмета производства определить наиболее оптимальную с точки зрения трансформации свойств технологическую среду. Разработана концепция и общеметодический подход к обеспечению направленного формирования оптимальных свойств изделий (рис.2).

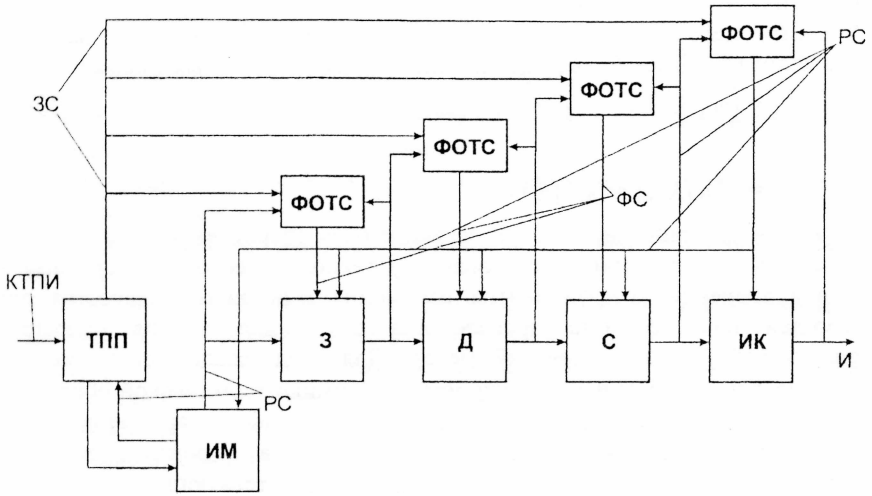


Рис. 2. Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий: И – изделие; ЗС, РС, ФС – заданные, реальные, формируемые свойства изделия; ТПП – технологическая подготовка производства; ИМ – изготовление исходных материалов; З – изготовление заготовок; Д – изготовление деталей; С – сборка; ИК – испытание и контроль; КПТИ – конструктивно-технологические параметры изделия; ФОТС – формирование оптимальных технологических сред

Важнейшей особенностью подхода является формирование для каждого этапа (передела) сквозного процесса изготовления изделия оптимальной технологической среды, обеспечивающей наиболее

рациональное распределение значений показателей качества по переделам и придающей процессу формирования качества изделия необходимую направленность. Изменяя среду или ее характеристики, можно управлять формируемыми свойствами изделий. Рассматривается трансформация всей совокупности показателей качества, определяющих свойства изделия. На основе сравнения характеристик сред базового технологического процесса и желаемых могут быть определены необходимые корректирующие воздействия по изменению состава, структуры и условий взаимодействия как элементов технологических сред, так и последних с предметом производства.

Реализация концепции невозможна без применения вычислительной техники и современных информационных технологий.

Третья глава посвящена изложению результатов исследования процессов формирования свойств изделий машиностроения в многосвязных технологических средах.

Разработано методическое обеспечение, позволяющее определять коэффициенты:

а) оперативного изменения i показателя качества при использовании j технологического метода – $(m_i)_j$;

б) изменение i показателя качества изделия, связанного с условиями реализации j технологического метода – $(u_i)_j$;

в) изменение i показателя качества при взаимодействии со средой уровня операции, реализующей j технологический метод – $(S_i)_j$.

Оперативно формирующая составляющая $(K_i)_j^{on}$ значения показателя K_i:

$$(K_i)_j^{on} = (m_i)_j (K_i)_{j-1} + (u_i)_j (K_i)_{j-1}. \qquad (5)$$

Если метод не реализован $(m_i)_j = 1$, $(u_i)_j = 0$, иначе $0 < (m_i)_j \le 1$. Изменение знака и значения показателя качества происходит в результате совокупного изменения коэффициентов $(m_i)_j$ и $(u_i)_j$. Для каждого технологического метода найдены штатные условия реализации, определяющие значения $(m_i)_j$. Коэффициент $(m_i)_j$ учитывает штатные условия реализации метода (в частности – штатные экономические условия обработки), а $(u_i)_j$ – отличающиеся от штатных, а также иные условия, дополнительно характеризующие среду (базирование и закрепление заготовки, упругие характеристики элементов технологической системы и т.д.).

Аналитическое определение коэффициентов $(m_i)_j$, $(u_i)_j$, $(S_i)_j$ невозможно, поэтому они определялись статистической обработкой экспериментального материала. Для конкретного метода слагаемое $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ в (5) выделялось в систематическую составляющую (C):

$$\left[(K_i)_j^{on}\right]_r = (m_i)_j \left[(K)_{j-1}^{on}\right]_r + C, \qquad (6)$$

где r – индекс реализации метода.

При определении значений $(m_i)_j$ использовались методики: максимального пересечения множеств входных и выходных значений

показателей качества; усреднение границ диапазонов. При известных $(m_i)_j$ значения $(u_i)_j$ определялись в соответствии с:

$$\left[(u_i)_j\right]_r = \frac{\left[(K_i)_j^{on}\right]_r}{\left[(K_i)_{j-1}^{on}\right]_r} - (m_i)_j. \qquad (7)$$

При известных $(m_i)_j$, $(u_i)_j$:

$$(S_i)_j = \frac{(K_i)_j^{on}}{(K_i)_{j-1}^{on}}. \qquad (8)$$

приведены таблицы усредненных значений коэффициентов оперативного изменения свойств $(m_i)_j$ для основных технологических методов обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, а также плоскостей Установлено, что оптимальная погрешность определения коэффициентов оперативного изменения показателей качества обрабатываемых заготовок для методов абразивной обработки в среднем в 3 раза выше, чем для лезвийной, что свидетельствует о большей чувствительности соответствующих технологических сред к изменению условий реализации и состояния образующих их объектов. На рис. 3 представлено графическое сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размеров (m_{IT}) для группы методов точения и шлифования деталей из конструкционных углеродистых сталей. Среднее значение относительной погрешности определение величины m_{IT} составило 2,5%, а m_{Ra} – 11,0%. Зависимости характеристик технологических сред уровня операции от состояния образующих их объектов адекватно представляются с помощью линейных регрессионных моделей или кусочно-линейно аппроксимируются при относительной погрешности не превышающей 10% (рис.4,5). Разработаны библиотеки моделей взаимосвязи характеристик технологических сред и параметров состояния их объектов.

Взаимное влияние свойств проявляется через механизм их сохранения. Данное положение было проверено при выполнении исследования влияния сохранения свойств на качество поверхностного слоя деталей машин.

Установлено, что сохранение и взаимное влияние свойств особенно проявляются при плосковершинной алмазно-абразивной обработке, полировании и суперфинише, когда снимаемый припуск находится в пределах исходной высоты неровностей шероховатости.

Вскрыты количественные зависимости для определения значений характеристик сред, разработаны рекомендации по выполнению операций отделочной обработки.

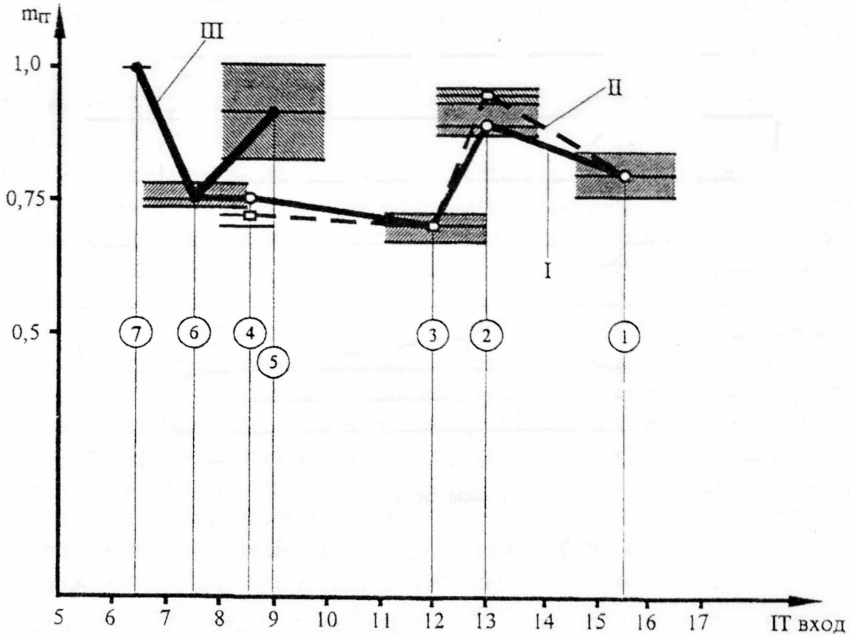


Рис. 3. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_{IT}) для методов обработки наружных цилиндрических поверхностей: 1, 2, 3, 4 – точение черновое, получистовое, чистовое, тонкое; 5, 6, 7 – шлифование предварительное, окончательное, тонкое; I, III – методика максимального пересечения множеств; II – методика усреднения границ

Многосвязность технологических сред, различие физических процессов, сопровождающих взаимодействие сред с предметом труда, являются основной причиной отсутствия единого методического подхода к определению элементов матрицы $[k_{il}]$ в (2) – (4). Коэффициенты сохранения и взаимного влияния формируемых свойств k_{il} определялись при реализации сквозного технологического процесса изготовления изделия при непрерывном мониторинге состояния качества предмета производства.

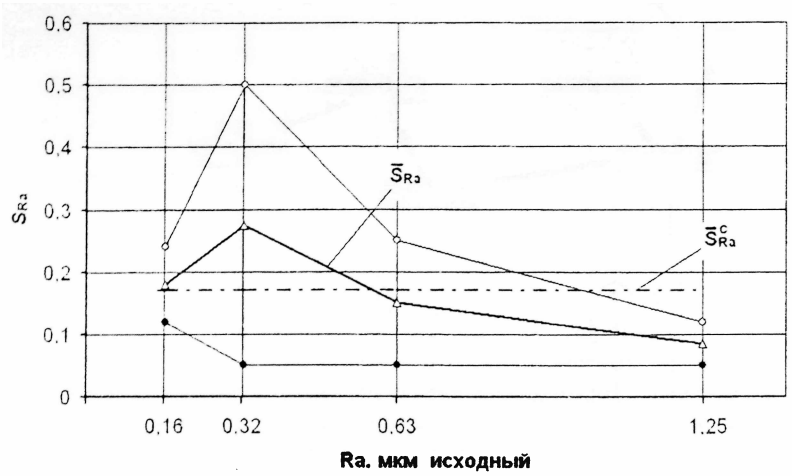


Рис. 4. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при суперфинише: $\overline{S}_{Ra}$ – среднее арифметическое значение; $\overline{S}^{c}_{Ra}$ – усредненное постоянное значение

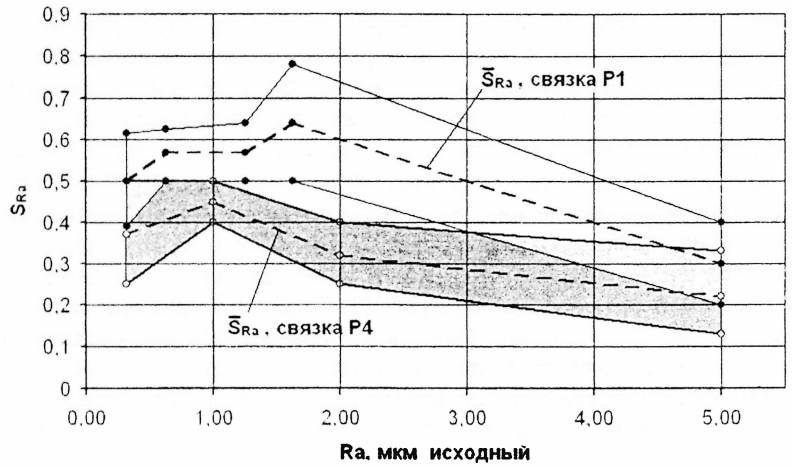


Рис. 5. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при шлифовании абразивной лентой: $\overline{S}_{Ra}$ – среднее арифметическое значение коэффициента

Первичное значение k_{il} для начальной фазы процесса:

$$k_{il} \approx \frac{(K_i)_1 - S_{ii}(K_i)_0}{(K_l)_0}, \qquad (9)$$

где $(K_i)_{0.1}$ – значение показателя K_i до и после выполнения операции; $(K_l)_0$ – значение показателя K_l до начала выполнения операции; S_{ii} – коэффициент изменения показателя качества при взаимодействии предмета производства с технологической средой уровня операции. В отличие от m_i, u_i коэффициенты k_{il} имеют физическую размерность.

Определенные на основе предложенной методики первичные значения коэффициентов сохранения и взаимного влияния показателей пригодны для использования в составе информационного обеспечения направленного формирования качества изделий, но требуют проверки в системах моделирования трансформации свойств и последующей корректировки. На примере реализации технологического процесса изготовления кольца прецизионного подшипника проиллюстрирована методика определения характеристик сохранения и взаимного влияния свойств изделий. Показано, что предложенный аппарат описания трансформации показателей качества с учетом их взаимодействия и взаимного влияния в многосвязных технологических средах адекватен реальным процессам формирования свойств изделий машиностроения и может быть использован для прогнозирования ожидаемых значений показателей качества, формирования и корректировки технологических решений. Применение предложенного подхода позволяет в 2 – 5 раз уменьшить относительную погрешность предварительного определения значения показателя качества по сравнению со значением, полученным на основе известных закономерностей технологии машиностроения.

Рассмотрение взаимного влияния технологических факторов при взаимодействии технологических сред с предметом производства позволило внести соответствующие уточнения в расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности механической обработки, разработанный научными школами А.П.Соколовского и В.М.Кована. Показано, что возникающие при обработке заготовки погрешности взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга и суммарную погрешность обработки. Составляющие погрешности формируются как в результате взаимодействия заготовки с технологической средой уровня операции, так и с технологической средой уровня процесса.

Разработан математический аппарат определения значений составляющих и суммарной погрешности обработки. Для первых справедливо:

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} 1 & a_{\Delta Y,\varepsilon} & a_{\Delta Y,\Delta H} & a_{\Delta Y,\Delta u} & a_{\Delta Y,\Delta T} \\ a_{\varepsilon,\Delta Y} & 1 & a_{\varepsilon,\Delta H} & a_{\varepsilon,\Delta u} & a_{\varepsilon,\Delta T} \\ a_{\Delta H,\Delta Y} & a_{\Delta H,\varepsilon} & 1 & a_{\Delta H,\Delta u} & a_{\Delta H,\Delta T} \\ a_{\Delta u,\Delta Y} & a_{\Delta u,\varepsilon} & a_{\Delta u,\Delta H} & 1 & a_{\Delta u,\Delta T} \\ a_{\Delta T,\Delta Y} & a_{\Delta T,\varepsilon} & a_{\Delta T,\Delta H} & a_{\Delta T,\Delta u} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{Дj}, \qquad (10)$$

где $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_j^T$ - вектор-столбец значений составляющих погрешностей (погрешность вызываемая упругими деформациями; погрешность установки; погрешность настройки; погрешность вызываемая размерным износом; погрешность вызываемая тепловыми деформациями), определяемых с учетом взаимного влияния; a_{**} - коэффициенты трансформации погрешностей, учитывающие взаимное влияние погрешностей; $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)_{Дj}^T$ – вектор-столбец детерминированных значений составляющих погрешностей, определенных на основе традиционного расчетно-аналитического метода.

Квадрат итогового значения суммарной погрешности (Δ) определяем в форме:

$$\Delta^2 = \left[\lambda_i P_i\right]^T \left[P_i\right], \qquad (11)$$

где λ_i – коэффициенты, определяющие форму кривой распределения составляющей погрешности P_i; T – символ транспонирования. Коэффициенты трансформации погрешностей определялись с учетом схем их формирования, при настройке:

а) вне технологической системы;

б) в технологической системе.

Для определения коэффициентов трансформации разработаны оригинальные методики, учитывающие не только характер взаимовлияющих погрешностей, но и условия взаимодействия технологических сред. В силу физических особенностей процессов изготовления деталей машиностроения между многими погрешностями может устанавливаться не только корреляционная, но даже и функциональная связь. Для фиксированных условий были определены детерминированные значения коэффициентов трансформации в (10). Относительная погрешность определения коэффициентов составила не более ± 2,5%. Выполнено сравнение результатов расчетов суммарной погрешности по традиционному и предлагаемому методам с экспериментально полученными данными. При расчете по традиционному методу для квалитетов менее IT8 значение относительной погрешности резко возрастает и составляет 13% – 35%. Предлагаемый метод формирует умеренно пессимистический прогноз при относительной погрешности 7% - 14%. Таким образом, учет многосвязности

технологических сред при определении суммарной погрешности обработки позволяет более чем в 2 раза повысить точность существующего метода расчета.

В четвертой главе рассмотрена методология моделирования взаимодействий в многосвязных технологических средах.

Автоматизированная генерация технологических сред заданного уровня относительно выделенного объекта принципиально возможна на основе их функциональных моделей, созданных с применением CALS – технологий. Разработаны функциональные модели многосвязных технологических сред, позволяющие в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять редукцию ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных при сохранении корректности и адекватности.

Эффективность предложенного аппарата описания трансформации свойств изделий определяется достаточностью информационного обеспечения, основу которого составляют данные о значениях характеристик трансформации свойств для соответствующих условий взаимодействия технологических сред различных уровней с предметом производства. Разработка информационного обеспечения, отвечающего требованиям корректности и адекватности описания трансформации свойств усложняется ввиду случайного характера взаимодействия предмета производства со средами различных уровней.

Для решения поставленных задач использован метод имитационного моделирования и разработан интерактивный программный комплекс – детерминированный имитатор наследственных связей (DINS), позволяющий создавать, дополнять и редактировать базы данных коэффициентов трансформации свойств; анализировать в диалоговом режиме гипотезы о влиянии технологической предыстории на показатели качества обрабатываемых поверхностей; обрабатывать результаты экспериментальных исследований трансформации свойств изделия; представлять результаты работы в наглядной графической форме. В основе математического и методического обеспечения работы комплекса – аппарат описания трансформации свойств изделий (деталей), представляемый соотношениями (1) – (4).

Комплекс потенциально пригоден для решения исследовательских задач изучения процессов изменения и сохранения свойств изделий машиностроения при их формировании.

Комплекс работает в среде табличного процессора Microsoft Excel версии 7.0 и выше под управлением операционной системы Windows 95/98. язык программирования Visual Basic for Application (VBA).

Имитатор наследственных связей DINS состоит из двух рабочих книг (файлов) Microsoft Excel – Dins.xls и History.xls. Рабочая книга Dins.xls содержит базу данных технологических операций, базу данных (марочник)

конструкционных материалов, формы и диалоговые окна интерактивного пользовательского интерфейса и VBA-модули, обеспечивающие управление работой системы и обслуживания баз данных.

Последовательность технологических операций обработки изделий задается с помощью интерактивного VBA-модуля формирования маршрута обработки. Модуль работает с базой данных технологических операций, из которой пользователь выбирает необходимые операции и выстраивает их в определенной последовательности. При этом возможны замена одной операции на другую, исключение из маршрута той или иной операции, включение в маршрут дополнительной операции. В ходе формирования маршрута для каждого технологического перехода из базы данных извлекается соответствующий набор коэффициентов изменения показателей качества.

Подготовленная таким образом информация о маршруте обработки совместно с данными об изделии и свойствах исходной заготовки передается в рабочую книгу History.xls (рис.6). модули данной книги обеспечивают расчеты ожидаемых значений показателей качества с учетом технологической предыстории, а также графическое отображение результатов анализа, интерактивное задание и последующую корректировку информации о влиянии технологической предыстории предмета производства.

Для автоматизированного определения вида, метода изготовления и свойств исходных заготовок разработан не имеющий аналогов программный комплекс «Эксперт свойств исходных заготовок» (EXPERT), осуществляющий указанное на основе анализа свойств материалов детали, ее конструктивно-технологических параметров, а также технологических особенностей производства.

Разработанные комплексы позволяют оценивать и анализировать влияние на сформированные показатели качества предмета производства многосвязных технологических сред уровней операций и процессов за счет направленного изменения структурно-параметрических характеристик последних.

Пятая глава посвящена рассмотрению методического обеспечения направленного формирования качества изделий машиностроения.

Разработанный аппарат описания трансформации свойств изделий позволяет желаемым образом распределять уровни свойств изделия по этапам технологического процесса его изготовления. Для любой части сквозного технологического процесса изготовления изделия и для любого из свойств последнего на основании разработанной методики может быть определен и при необходимости оптимизирован желательный уровень значений соответствующих показателей качества.

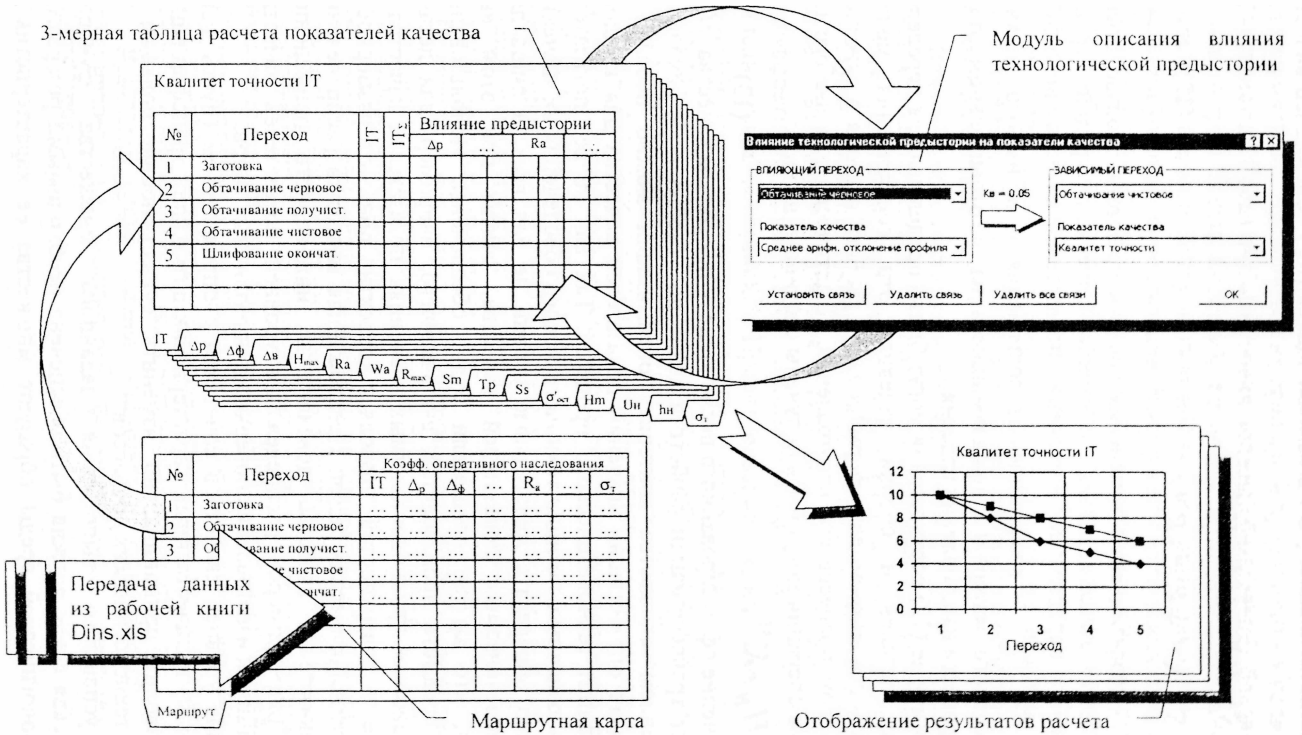


Рис. 6. Структура рабочей книги History.xls детерминированного имитатора наследственных связей (DINS)

Так, например, по завершении заготовительного передела достигнутые значения квазистабильных (K_c^3) и изменяющихся (K_v^3) показателей качества определяться:

$$\begin{cases} K_c^3 = S_c^3 \cdot K^M + k_c^{3,M} \cdot K^M \\ K_v^3 = S_v^3 \cdot K^M + k_v^{3,M} \cdot K^M \end{cases}, \qquad (12)$$

где S_c^3, S_v^3 – коэффициенты изменения свойств предмета производства в результате его взаимодействия с технологической средой уровня заготовительного передела; K^M – значения показателей качества исходного материала; $k_C^{3,M}, k_v^{3,M}$ - коэффициенты сохранения и взаимного влияния свойств исходного материала, проявляющиеся на заготовительном этапе сквозного процесса изготовления изделия.

Аналогичные (12) соотношения могут быть определены для переделов изготовления деталей и сборки изделия. Эти соотношения можно рассматривать как макромодель формирования свойств изделия в сквозном технологическом процессе его изготовления. Практически для любого (N) этапа, группы операций могут быть получены соотношения вида:

$$K_N = H_N \cdot K^M, \qquad (13)$$

где K_N – значение сформированного после этапа N показателя качества; H_N – коэффициент трансформации свойств изделия по отношению к исходным (K^M). Введением множества критериев оптимизации можно перейти к решению задач оптимизации значений показателей качества для каждого этапа (операции) технологического процесса. Так как не все показатели качества равнозначны с позиции технологического обеспечения их значений целесообразно определять желательные уровни не для всех, а лишь для трудно обеспечиваемых показателей качества, считая при этом «по умолчанию», что другие показатели будут обеспечены. Использование «паспорта» предмета производства, включающего, например, для детали данные о наиболее труднодостижимых значениях показателей качества и общем числе ее поверхностей, позволяет корректно понизить размерность решаемых технологических задач. Предложенная методика распределения уровней показателей качества доведена до инженерного применения. Рассмотрен ряд примеров распределения уровней показателей качества между операциями изготовления поверхностей различных типов.

Распределение уровней свойств в сочетании с определением (пусть даже приближенным) количественных характеристик возможной трансформации свойств позволит принципиально изменить существующие подходы к построению технологических процессов.

Для успешного выполнения заданного множества функций технологическая среда должна быть обеспечена необходимыми резервами. Резерв технологической среды образуют множества ее характеристик и

значений последних, не использующиеся при выполнении средой заданных функций и условий их реализации. Оценка среды по каждому из ее параметров может проводиться на основании предложенных количественных характеристик. Среда любого уровня должна обязательно обладать резервом по параметрам (возможностям), величина которого должна оптимально соответствовать множеству выполняемых функций и диапазону возможных изменений условий их реализации. Выбор технологических сред и любого из технологических объектов, обладающих рациональными резервами, может эффективно осуществляться на базе предложенного аппарата оценки качества соответствующих технологических решений. Формирование резерва среды может выполняться по каждому из отдельно взятых ее параметров и должно учитывать как стохастический характер последних, так и их взаимодействие.

Важнейшей характеристикой, как резерва, так и его использования является допуск. Методика определения резерва среды уровня операции обработки рассмотрена на примере определения настроечных размеров.

Проектирование технологических процессов изготовления изделий с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества малоэффективно вне его автоматизации на базе современной вычислительной техники. Проектирование единичных маршрутных технологических процессов (МТП) изготовления деталей желательно осуществлять в режиме автоматизированного синтеза при минимальном диалоге пользователя с системой. Разработана стратегия разрешения проблемы автоматизированного синтеза МТП с учетом закономерностей изменения, сохранения и взаимного влияния формируемых показателей качества, которая предусматривает:

1. Выполнить синтез МТП в автоматизированном режиме на основе общетехнологических принципов и правил. Получить основные характеристики маршрута.
2. Приняв за основу структуру сформированного МТП, выполнить прогноз изменения показателей качества с учетом закономерностей трансформации свойств.
3. В случае, если желательный уровень значений показателей качества не достигнут – выполнить необходимую корректировку МТП.

Разработаны концептуальная и функциональная модели автоматизированной системы синтеза МТП изготовления деталей. Синтез МТП осуществляется, как правило, в автоматическом (пакетном) режиме по разработанной методике, базирующейся на не окончательности и адаптируемости первичных технологических решений.

В шестой главе даны примеры практической реализации методологии направленного формирования качества изделий машиностроения.

Выполнена оценка взаимного влияния и взаимодействия характеристик технологических сред при изготовлении прецизионной детали (на примере кольца прецизионного подшипника). Номинальный внешний диаметр кольца $D = 210$ мм, внутренний диаметр $d = 177$ мм, ширина кольца 52 мм. Материал заготовки – сталь ШХ15 (σ_B = 740 МПа, σ_T = 420 МПа), твердость по Бринеллю НВ = 158. изготовление кольца осуществлялось в соответствии с предварительно разработанным технологическим процессам. Выполнялось моделирование процесса обработки заготовки кольца подшипника в среде конечно-элементного пакета ANSYS 5.5.3. Конечно-элементная модель формировалась из трехмерных 8-и узловых твердотельных гексагональных элементов *SOLID 45*. На местах контакта заготовки с кулачками размещались контактные элементы *TARGE 170* и *CONTA 174*. При моделировании процесса обработки торцевой поверхности откликом являлось значение погрешности формы торца, а при обработке внутренней цилиндрической поверхности – значение погрешности ее формы (отклонение от цилиндричности). Варьируемыми факторами в эксперименте были: значения сил резания; значения сил закрепления; относительный размер заготовки $(D-d)/2D$. С целью установления моделей взаимосвязи значений функции отклика и варьируемых факторов моделировались полные факторные эксперименты, выполнявшиеся по различным планам.

Доказана необходимость учета при определении суммарной погрешности обработки поверхностей прецизионных деталей взаимного влияния характеристик формирующей среды: суммарная погрешность формы торцевой и внутренней цилиндрической поверхностей при обработке кольца прецизионного подшипника, рассчитанная на основе принципа суперпозиции меньше погрешности, при определении которой учитывалось взамное влияние характеристик технологической среды, на 15% - 30%. Показано, что суммарная погрешность обработки может достоверно определяться и моделироваться на базе разработанного аппарата описания трансформации свойств изделий и применяющихся в машиностроении программных средств.

Приложения основных положений теории технологической среды и принципов проектирования технологических процессов с учетом закономерностей изменения и сохранения свойств предмета производства позволили разработать комплексную методику создания технологической среды, обеспечивающей формирование оптимальных характеристик антифрикционных свойств и износостойкости деталей из триботехнических конструкционных материалов (ТКМ) с макроструктурой. При создании формирующей среды последовательно осуществляются:

1. Выбор пары материалов, входящих в ТКМ.
2. Расчет оптимальной высоты регулярного рельефа, обеспечивающего самосмазывание при достижении рабочей температуры поверхности скольжения.

3. Определение триботехнического показателя регулярного рельефа для твердой составляющей ТКМ (наполнителя).
4. Предварительный выбор режимов обработки по общемашиностроительным нормативам.
5. Определение величины возмущающей силы как разности между силами резания на твердом и мягком участках ТКМ.
6. Вычисление необходимой жесткости технологической оснастки как элемента формирующей технологической среды.
7. Определение допустимой скорости резания.
8. Проверка характеристик технологической оснастки и характеристик режима обработки по условиям обеспечения затухания колебаний и минимальным значениям волнистости.
9. Корректировка полученных решений.
10. Поверочный расчет по результатам корректировки, фиксация достигнутых значений характеристик среды.

Методика прошла практическую апробацию в производственных условиях и продемонстрировала высокую надежность достижения заданных характеристик качества предмета производства.

Приложения направленного формирования качества прецизионных изделий рассмотрено на примере комплексного создания многосвязной технологической среды изготовления высокоточного электрошпинделя (с частотой вращения до 250000 об/мин).

Выполнен макроанализ факторов, влияющих на работоспособность шпинделей. Действия части указанных факторов было учтено и компенсировано при конструктивной доработке изделий. Это относится к требованиям, предъявляемым к конструкциям подшипниковых узлов и допускам на изготовление их наиболее ответственных деталей.

На основе положений теории технологической среды разработаны требования к основным компонентам технологической среды создания высокоточного электрошпинделя, включая оборудование, инструмент, приспособления, требования к сборочным операциям (очистка; отбраковка, доводка торцев, контроль) (рис.7).

Выполнен анализ базовой технологии с использованием аппарата описания трансформации свойств и выполнена его корректировка. Скорректированный процесс позволяет изготавливать валы шпинделей с допусками размеров посадочных поверхностей в пределах 2 –3 мкм и шероховатостью Ra 0,04 – 0,16 мкм. При формировании среды уровня процесса особое внимание уделено подготовке технологических баз и уточнению желательных уровней значений показателей качества после выполнения каждой технологической операции.

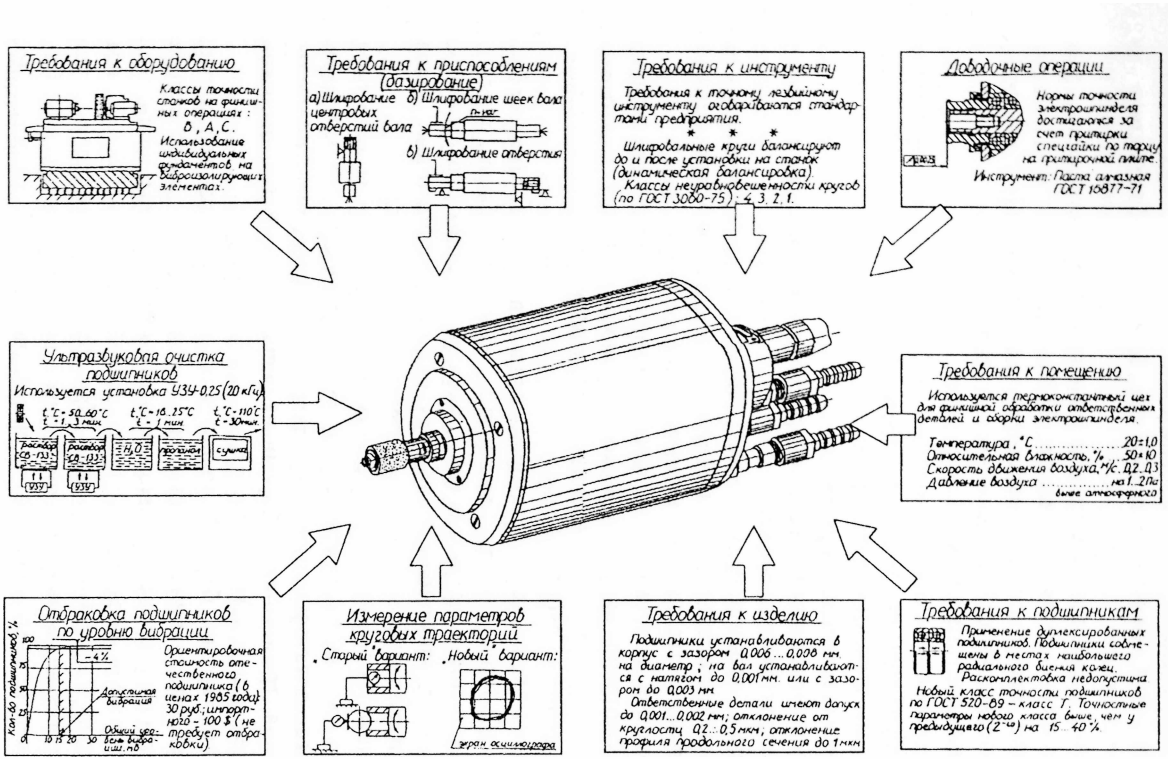


Рис. 7. Формирование технологической среды создания высокоточного электрошпинделя

При формировании технологических сред уровня операции обработки уточнены требования к характеристикам инструмента, технологическим базам и режимам обработки. Используемая технология учитывала наследственный характер возникновения и передачи погрешностей.

При формировании сред уровней технологического процесса и операции сборки учитывались: влияние местных деформаций корпусов на форму дорожек качения подшипников; погрешности резьб и их деформаций и т.д. Предложена зависимость радиальных перемещений поверхности отверстий под подшипники от конструктивных и технологических параметров узла и от упругих свойств материала корпуса.

Наиболее точной характеристикой поведения вала шпинделя при его вращении является правильность траектории оси вращения. Для регистрации геометрической оси вращения шпинделя при больших частотах вращения и малых перемещениях была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис.8). Установлена качественная и количественная связь между деформацией наружного кольца подшипника и траекторией движения вала шпинделя (рис.9). На круглограммах и траекториях заметно их геометрическое сходство.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Трансформация свойств изделий может характеризоваться использованием линейных зависимостей при допущениях: качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории; любое воздействие на заготовку изменяет все ее показатели качества; любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества заготовки.
2. Разработанное методическое обеспечение позволяет с достаточной для практического использования точностью определять коэффициенты оперативного изменения показателей качества обрабатываемой заготовки, а также коэффициентов изменения показателей качества последних при взаимодействии с многосвязной технологической средой уровня операции.
3. При моделировании технологических процессов зависимости характеристик сред от состояния образующих их объектов адекватно представляются с помощью линейных регрессионных моделей или кусочно-линейно аппроксимируются при относительной погрешности не превышающей 10%.
4. Предложенный методический подход и аппарат описания трансформации показателей качества с учетом их взаимодействий и взаимного влияния в многосвязных технологических средах адекватен реальным процессам формирования свойств изделий машиностроения и может быть использован для прогнозирования ожидаемых значений

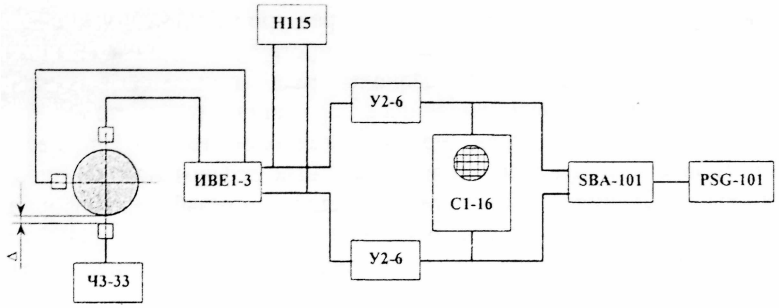
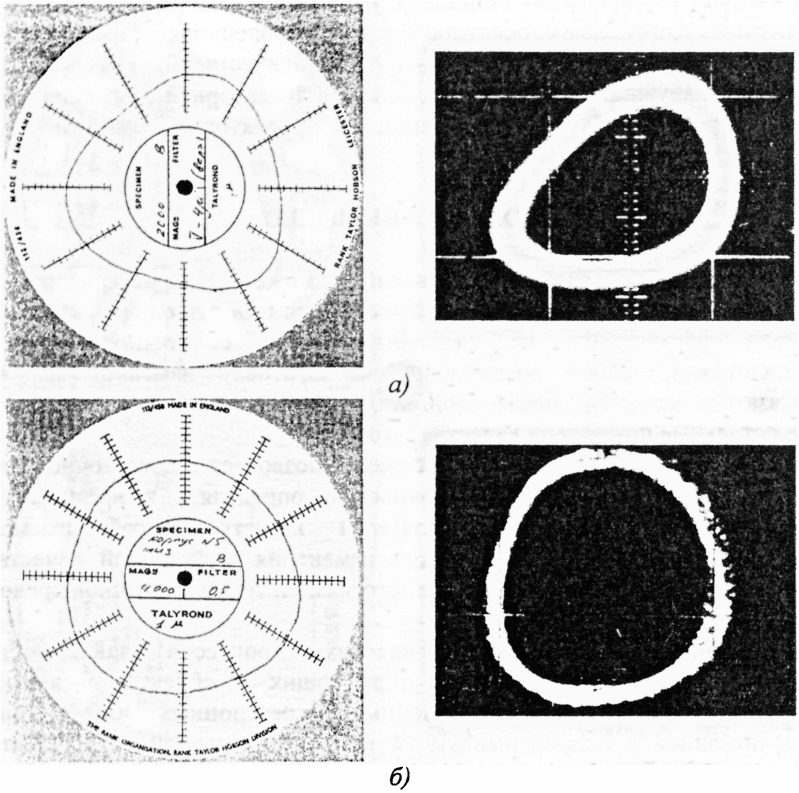


Рис. 8. Схема установки для определения траектории движения шпинделя (Δ – зазор)



а)

б)

Рис. 9. Результаты исследований влияния погрешностей сборки на выходные параметры изделия: а) n=3; Δ = 4 мкм; Θ = 3 мкм; б) n=6; Δ = 1,25 мкм; Θ = 0,4 мкм (n – число болтов; Δ и Θ – отклонения от круглости дорожки качения подпятника и траектории движения шпинделя соответственно)

показателей качества. Применение предложенного подхода позволяет в 2-5 раз уменьшить относительную погрешность предварительного определения значений показателя качества по сравнению со значениями, полученными на основе известных закономерностей технологии машиностроения.

5. Составляющие погрешности формируются как в результате взаимодействия заготовки с технологической средой уровня операции, так и с технологической средой уровня процесса.
6. Вид, метод изготовления и свойства исходных заготовок надежно определяются в автоматизированном режиме с помощью не имеющего аналогов программного комплекса "Эксперт свойств исходных заготовок", осуществляющем указанное на основе анализа свойств материалов детали, ее конструктивно-технологических параметров, а также технологических особенностей производства.
7. Исследование процессов трансформации свойств предмета производства в многосвязных технологических средах может выполняться с использованием разработанного оригинального программного комплекса "Детерминированный имитатор наследственных свойств", позволяющего формировать базы характеристик трансформации свойств, анализировать влияние технологической предыстории на формирующиеся свойства и представлять результаты в удобной для исследователя форме.
8. Для любой части технологического процесса изготовления изделия и для любого из свойств последнего на основании разработанной методики может быть определен и при необходимости оптимизирован желательный уровень значений соответствующих показателей качества, последовательное достижение которых гарантирует заданное итоговое качество изделия.
9. Эффективность разработки технологических процессов изготовления изделий с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества повышается использованием автоматизации на базе современной вычислительной техники. Режим работы автоматизированной системы проектирования процессов изготовления изделий машиностроения по разработанной методологии предусматривает пакетный синтез и последующую интерактивную корректировку маршрутных технологических процессов с учетом закономерностей изменения, сохранения и взаимного влияния формируемых свойств изделий.
10. Установлено, что для прецизионных деталей количественные показатели точности, рассчитанные на основе принципа суперпозиции меньше тех же показателей, при определении которой учитывалось взаимное влияние характеристик технологической среды, на 15% - 30%.

11. Разработанные методическое, информационное и программное обеспечение, оригинальная методология технологического проектирования позволяют направленно обеспечивать заданное качество изделий машиностроения инвариантно их функциональному назначению, что подтверждено многочисленными практическими внедрениями, нашедшими применение в промышленности и получившими государственное признание.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Васильев А.С. Сборочные погрешности деталей типа колец // Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. – 1976. – № 202. – С.117–121.
2. Васильев А.С. Контроль качества высокооборотных шпиндельных узлов //Металлорежущий и контрольно–измерительный инструмент: Сб. НИИМАШ. (М.). – 1978. – Вып.3. – С.19–22.
3. Кулешова З.Г., Васильев А. С. Расчетное определение формы осей собираемых деталей с учетом силового взаимодействия //Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. – 1978. – № 281. – С.37–51.
4. Васильев А.С., Наумавичус Р.Р., Каупелис Р.Р. Стенд для исследования вибраций скоростных шпиндельных узлов //Машины, приборы, стенды: Каталог МВТУ им.Н.Э.Баумана. – 1978. – № 6. – С.54.
5. Васильев А.С., Кулешова З.Г., Исследование сборочных погрешностей корпуса //Известия вузов. Машиностроение. – 1978. – № 7. – С.125–128.
6. Измерение АЧХ бесконтактных емкостных измерителей перемещений /Р.Р. Каупелис, Р.Р. Наумавичус, А.С. Васильев и др. //Метрология. – 1979. – №2. – С.42–45.
7. Васильев А.С. Исследования сборочных погрешностей деталей типа валов //Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. – 1980. – № 341. – С.63–70.
8. Кулешова З.Г., Васильев А. С. Экспериментальные исследования деформации гильз при их закреплении по боковой поверхности //Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. – 1983. – № 405. – С.108–117.
9. Дальский А.М., Сергеев А.Д., Васильев А.С. Технологическое обеспечение точности и надежности высокооборотных электроприводов // Машиностроитель. – 1985. – № 2. – С.19–20.
10. Васильев А.С., Боксбергер В.Ф. Многоцелевая сборочная установка //Передовой производственный опыт: Информационный сб. ВНИИТЭМР. (М.). – 1988. – Вып.6. – С.21–22.
11. А.с. СССР, № 1470489. Способ сборки конических соединений с натягом / А.М.Дальский, А.С.Васильев, В.Ф. Боксбергер //Открытия, изобретения... – 1989. – №13.
12. Васильев А.С., Деревягин С.И. Технологическое управление точностью взаимного расположения прецизионных деталей при сборке по плоским поверхностям //Труды МГТУ им.Н.Э.Баумана. – 1989. – № 535. – С.131–140.

13. Васильев А.С., Ходус В.В. Устройство для контроля эксплуатационных характеристик поверхностей трения на токарных станках //Передовой производственный опыт: Информационный сб. ВНИИТЭМР. – 1990. – Вып.6. – С.21–22.
14. Ходус В.В., Васильев А.С. Изготовление и эксплуатационные свойства деталей из триботехнических композиционных материалов //Машиностроительное пр–во. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: Обзор. информ. / ВНИИТЭМР. – 1991. – Вып.1.– 48 с.
15. Ходус В.В., Васильев А.С. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей из композитов с макроструктурой //Труды МГТУ им.Н.Э.Баумана. – 1992. – № 559. – С.24–31.
16. Васильев А.С. Сборочные погрешности прецизионных изделий в условиях технологического наследования //Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1994. – № 4. – С. 74–80.
17. Дальский А.М., Васильев А.С., Кондаков А.И. Технологическое наследование и направленное формирование эксплуатационных свойств изделий машиностроения //Известия вузов. Машиностроение. – 1996. – № 10 –12. – С.70 –76.
18. Васильев А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах //Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.
19. Технологическое обеспечение функционирования цилиндрических соединений с микрометрической точностью. Отчет по теме ГБ 3 – 522 (заключительный) / МГТУ. Рук. Васильев А.С.. –ГР № 01980002106; инв.№ 02980001625. – М., 1997. – 18 с.
20. Кондаков А.И., Васильев А.С. Проектирование маршрутов изготовления деталей с учетом технологического наследования //Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 10– 12. – С.31–41.
21. Технология машиностроения: Учебник для вузов, В 2-х т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – Т.1. – Основы технологии машиностроения /В.М.Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М.Дальского. – 564 с., ил.
22. Технология машиностроения: Учебник для вузов, В 2-х т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – Т.2. – Производство машин /В.М.Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. Г.Н.Мельникова. – 640 с., ил.
23. Кондаков А.И., Васильев А.С. Системное моделирование взаимодействий в технологических средах //Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 4–6. – С.92– 100.
24. Дальский А.М., Кондаков А.И., Васильев А.С. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства //Производственные технологии. (Липецк). – 1998. –Вып. 1. – С. 42–44.

25. Васильев А.С. Суммарная погрешность обработки и взаимное влияние ее составляющих //Известия вузов. Машиностроение. – 1999. – №2–3. – С. 89–96.
26. Васильев А.С. Определение количественных характеристик оперативной трансформации свойств изделий в технологических средах //Известия вузов. Машиностроение. – 1999. – № 4. – С.42–47.
27. Суслов А.Г., Васильев А.С., Сухарев С.О. Влияние технологического наследования на качество поверхностного слоя деталей машин //Известия вузов. Машиностроение. – 1999. – № 1. – С.69– 76.
28. Разработка методологических основ перепрофилирования машиностроительных производств: Учебное пособие / А.М.Дальский, А.И.Кондаков, А.В.Мухин, А.С.Васильев – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 95 с., ил.
29. Дальский А.М., Кондаков А.И., Васильев А.С. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства //Вестник машиностроения. – 1999. – № 3. – С. 45–48.
30. Дальский А.М., Кондаков А.И., Васильев А.С. Формирование номенклатуры конверсируемых производств на базе оценок технологического подобия //Производственные технологии. (Липецк). – 1999. –Вып. 2. – С. 20–21.
31. Васильев А.С. Имитационное моделирование трансформации свойств изделий машиностроения //Наука–производству. – 2000. –№ 4(29). – С. 46–49.
32. Dalsky A.M., Vassilyev A.S. Technological support of highrotation precizion drives quality. Fundamental and applied technological problems of machine bulding //Technology–2000: Transactions collection of Internatioal Scientific-technical Conference / Under general editorship V.A.Golenkov. – Oryol, 2000.– C.12–15.
33. Васильев А.С. Формирование качества изделия машиностроения в многосвязных технологических средах //Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2000. – № 3(40). – С.14–23.
34. Васильев А.С. Направленное формирование качества деталей машин //Конструкторско – технологическая информатика–2000: Труды IV международного конгресса, В 2-х т. – М.: 2000. –Т.1– С.93–95.