

Преимственность решений при математическом моделировании, конструкторско-технологическом проектировании, производстве и эксплуатации сложных технических систем базируется на принципах передачи свойств в жизненном цикле изделий. Компьютерная поддержка жизненного цикла изделий с использованием CALS-технологий требует разработки сквозных математических моделей наследования комплекса показателей качества изделий.

Применение синергетической концепции позволяет сформировать математическую модель технологического и эксплуатационного наследования показателей качества, описывающую различные режимы поведения при производстве и применении технических систем. Использование математической модели при компьютерном проектировании предоставляет широкие возможности для сокращения затрат при изготовлении и эксплуатации конструктивно-сложных изделий машиностроения.

УДК 536.75+658.512:621.002

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАСЛЕДОВАНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

*академик, д-р техн. наук, проф. П.И. ЯЩЕРИЦЫН
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск),
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, В.С. ТОЧИЛО*

*(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. А.М. ДАЛЬСКИЙ, д-р техн. наук, проф. А.С. ВАСИЛЬЕВ,
д-р техн. наук, проф. А.И. КОНДАКОВ
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
д-р техн. наук, доц. С.А. КЛИМЕНКО
(Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев)*

На основе синергетического подхода рассмотрены модели утраты работоспособности узлов трения. С позиций технологического наследования эксплуатационных показателей предложены мероприятия по управлению качеством изделий. Разработана математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем. Изучены особенности управления процессами совмещенной и комбинированной обработки, формирующими комплекс физико-механических и геометрических параметров качества. На основе статистического анализа предложен метод управления многофакторными процессами, использующий комплексные диаграммы.

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий [1,2]. Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [3, 4].

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом - технологической или эксплуатационной средой при тождественности результатов такой замены. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения его показателей качества и осуществлять направленное формирование технологической и эксплуатационной среды. Эти среды должны предусматривать благоприятное развитие полезных свойств и пресечение развития свойств, снижающих качество изделий путем использования технологических и эксплуатационных барьеров [5, 6].

1. Синергетический подход к техническим системам

Трудности описания многосвязных взаимодействий при формировании и изменении показателей качества изделия в процессах изготовления и эксплуатации машины могут быть преодолены на основе применения синергетической концепции, использующей понятие устойчивости мод непрерывной случайной величины, под которыми понимают такие значения показателя, при которых плотность его рас-

пределения имеет максимумы [7]. Согласно синергетическому подходу в процессе развития устойчивые моды подстраиваются под неустойчивые моды и могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых показателей - степеней свободы технологической и эксплуатационной системы. Получающиеся в результате такого сокращения показателей уравнения группируются в универсальные классы вида [8]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} U^* = G(U^*, \nabla U^*) + D \nabla^2 U^* + F(\tau),$$

где U^* – контролируемый показатель; τ – текущее время; G – нелинейная функция U^* и градиента U^* ; D – коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или распространение волны, при его мнимом значении; F – флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием со средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида также описывают фазовые переходы, которые в соответствии с синергетической концепцией происходят в результате самоорганизации [7]. Процесс самоорганизации описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (Π), сопряженному (C) ему полю и управляющему (Y) параметру [9].

Единственная степень свободы – параметр порядка – описывает только квазистатические фазовые переходы. В системах, значительно удаленных от состояния равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение, а процесс самоорганизации складывается в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем [7, 8]. Поэтому, кроме релаксации к равновесному состоянию в течение времени τ^p , при участии двух степеней свободы могут реализовываться как режим запоминания, так и автоколебания, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние. В результате состояние технологической и эксплуатационной системы характеризуется несколькими режимами [5, 6, 9]:

1) релаксационным – при времени релаксации параметра порядка, намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ($\tau_{\Pi}^p > \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_C^p$);

2) с запоминанием – при переходе из неупорядоченного состояния в «замороженный» беспорядок, реализуемым в случае, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ($\tau_{\Pi}^p \ll \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_C^p$);

3) автоколебательным – при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_Y^p$ или $\tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$);

4) стохастическим – возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ($\tau_Y^p \gtrsim \tau_{\Pi}^p \gtrsim \tau_C^p$).

Таким образом, при моделировании технологического и эксплуатационного наследования возможно понижение размерности задачи описания передачи показателей качества до трех степеней свободы среды в процессах обработки и изнашивания изделия. Моделирование процессов передачи на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического и эксплуатационного процессов через использование обратных связей [3, 10].

2. Анализ процессов изнашивания поверхностей

При анализе процессов изнашивания деталей машины и их сопряжений целесообразно рассматривать вектор [2]:

$$\varphi(X, t) = [\xi_{u_1}(X, t), \dots, \xi_{u_i}(X, t), \dots, \xi_{u_n}(X, t)],$$

где $\xi_{u_i}(X, t)$ – скорость изнашивания i -той детали (сопряжения) в момент времени t при нагрузочном воздействии X на узел машины.

Тогда принимается, что процесс изнашивания обладает последствием, если модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят не только от модуля и направления вектора X в данный момент времени, но и от модуля и направления вектора X в моменты времени $\tau < t$, а также от величины износа U трущихся поверхностей за отрезок времени $[0, t]$ (здесь U – n -мерный вектор: $U = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)$; у которого u_i – величина износа i -той детали) [2, 3]:

$$u_i(t) = \int_0^t \xi_{u_i}(\tau) d\tau.$$

Для процесса изнашивания без последствия характерно то, что модуль и направление вектора $\varphi(X, t)$ в момент времени t зависят от модуля и направления вектора X только в данный момент.

В зависимости от времени τ_p , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают два вида последствия: первого и второго рода [2, 11]. Последствие первого рода характеризуется тем, что изменения в процессе утраты работоспособности изделия, обусловленные предысторией нагрузочного воздействия X , сохраняются в течение всего срока службы изделия τ_0 , т.е. $\tau_p \geq \tau_0$. Если $\tau_p < \tau_0$, то имеет место процесс с «затухающей памятью» – последствие второго рода.

Зависимости интенсивности изнашивания узлов трения машин от продолжительности работы t (рис. 1) отличаются друг от друга видом связей между управляющим параметром – нагрузочным воздействием X и сопряженным с ним изнашиванием интенсивностью J .

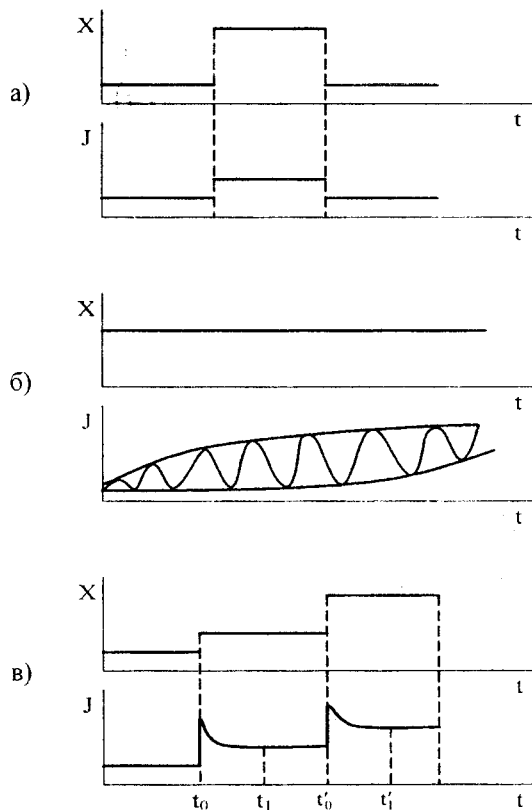


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания J узлов трения от длительности работы t :

- а – интенсивность изнашивания зависит только от величины нагрузочного воздействия X в момент времени t ;
- б – зависит от времени работы t при постоянном X ; в – зависит от времени работы t при ступенчатом изменении X на отрезках времени $[t_0, t_1]$, $[t'_0, t'_1]$ и т.д.

Выбор параметра порядка H в каждом конкретном случае зависит от задач исследования (определения долговечности, сравнения износостойкости, оценки динамических свойств системы с учетом изнашивания ее элементов и др.). Не исключено, что для одной и той же детали, но для различных показателей, процесс утраты работоспособности может иметь или не иметь последствие при постоянной интенсивности изнашивания J трущихся поверхностей. Это обусловлено видом связи (линейной или нелинейной) между определяющим параметром H , по которому производится оценка ресурса работоспособности исследуемого изделия и накопленным износом U [2, 3].

Рассмотрим различные связи между внешними воздействиями и параметрами системы f_H , а также между характеристиками процесса утраты работоспособности g_H .

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения без последствия (см. рис. 1, а). В случае, когда сопряженная параметру порядка H интенсивность изнашивания J зависит только от величины нагрузочного воздействия X :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t)); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Если процесс изнашивания рассматривать как непрерывный стохастический процесс [12], то можно получить условие изнашивания без последействия. При постоянных условиях трения приращение износа $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$ не зависит от времени (процесс с независимыми приращениями), следовательно, скорость изнашивания $\xi_{ин} = dU/dt$ стационарна в период времени τ [2, 3]. Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с запоминанием: $(\tau_{п}^p \ll \tau_{в}^p \text{ и } \tau_{п}^p \ll \tau_{с}^p)$.

Однако процессы утраты работоспособности деталей в периоды приработки и катастрофического разрушения поверхностных слоев не могут быть описаны с помощью приведенных уравнений, так как интенсивность изнашивания J в эти периоды не является постоянной, а зависит от величин накопленного износа U трущихся поверхностей.

Модели процессов утраты работоспособности узлов трения с последствием первого рода (рис. 1, б). В случаях, когда интенсивность изнашивания J зависит как от величины нагрузочного воздействия X , так и от величины накопленного износа U , к рассматриваемому моменту времени t :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X(t), U(t), t), \end{cases}$$

а при учете обратной связи нагрузочного воздействия X^* с износом U :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X^*(t), U(t), t); \\ H(t) = g_H(X^*(t), U(t), t); \\ X^*(t) = q_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Изменения в период времени τ интенсивности изнашивания J трущихся сопряжений при постоянном нагрузочном воздействии на входе технической системы X могут быть вызваны двумя группами причин [2, 3]:

- не учитывающими обратную связь нагрузки X с износом U , такими как различие физико-механических свойств материала по глубине поверхностного слоя изделия, обусловленное технологией изготовления; старение смазочных материалов, приводящее к ухудшению их трибологических свойств, к изменению теплового режима работы сопряжения, а в некоторых случаях и к смене видов изнашивания трущихся поверхностей; увеличение в процессе эксплуатации концентрации абразивных частиц, продуктов износа и т.п.;

- учитывающие изменения зависимости q_H нагрузочного воздействия X^* на детали узла трения в результате износа сопряжения U , которые связаны с увеличением зазоров в трущихся сопряжениях; с трансформацией макрогеометрии поверхностей трения при изнашивании и короблении деталей; с изменением контактной жесткости подвижных стыков и др.

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с последствием первого рода относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между величинами параметра порядка $H_i(\Delta t)$ и $H_{i-1}(\Delta t)$ даже при сравнительно больших $\tau = t_{i-1} - t_i$. Здесь $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$; $H_{i-1}(\Delta t) = H(t_{i-1} + \Delta t) - H(t_{i-1})$, $t_i < t_{i-1}$.

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, характеризуются автоколебательным ($\tau_{п}^p \geq \tau_{в}^p$ или $\tau_{п}^p \geq \tau_{с}^p$) и стохастическим ($\tau_{в}^p \geq \tau_{п}^p \geq \tau_{с}^p$) режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы.

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода (см. рис. 1, в). Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [2, 11]. В переходный период $[t_n, t_1]$ интенсивность изнашивания J отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_n , и от значения, соответствующего новому уровню X_1 :

$$J(t) = \begin{cases} f_H(X_1, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), t_0 \leq t \leq t_1; \\ f_H(X_1, t), t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами [2, 3]: эксплуатационной наследственностью материалов, деформируемых в процессе трения поверхностных слоев деталей; изменением эпюры удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим «вторичной приработкой» трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между величиной нагрузочного воздействия и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях.

Исходя из представлений о природе явлений последствия второго рода можно заключить, что с позиции вероятностного анализа [12] процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i-1}(\Delta t)$ [2, 3].

В этой связи их следует рассматривать как релаксационные ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\gamma}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\epsilon}^p$) с характерным периодом $[t_0, t_1]$.

Таким образом, понижение размерности задачи описания передачи свойств изделий в технологических и эксплуатационных процессах производится путем выделения параметров порядка и определения режимов состояния системы. После этого на каждом из режимов целесообразно рассмотреть взаимосвязи основных показателей качества изделия с определяющим параметром порядка и условия их устойчивого формирования [13].

Показатели качества поверхностей изделий. Показатели качества изделий машиностроения, являющиеся основными, делятся на две категории [1, 3]: к первой относятся те, которые характеризуются наследственными явлениями, связанными со свойствами материалов изделий; ко второй - связанные с геометрическими параметрами их поверхностей.

Показатели обеих категорий в многосвязных технологических и эксплуатационных средах взаимно влияют друг на друга. Геометрические параметры изделий, такие как их конфигурации и размеры могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоев. И, наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров высокоточных деталей. Это свидетельствует о взаимной связи и обусловленности явлений, сопровождающих технологические и эксплуатационные процессы.

Наиболее полно наследование основных показателей качества раскрывается при рассмотрении последовательности процессов с синергетических позиций совместного действия технологических факторов при взаимном влиянии показателей [3, 10].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях (рис. 2) в процессе эксплуатации изменяются [2, 3]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей. В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняется шероховатость и структура поверхностного рельефа, волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допускаемых значений, принятых при изготовлении, практически до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по параметрам точности.

Показатель качества изготовления	Период процесса изнашивания		
	приработка	нормальное изнашивание	ускоренное изнашивание
Точность размеров и форма (неплоскостность, некруглость и др.)	[заштрихованный участок]		
Волнистость	[заштрихованный участок]		
Шероховатость	[заштрихованный участок]		
Остаточные напряжения	[заштрихованный участок]		
Структура основного материала	[заштрихованный участок]		
Структура поверхностных слоев	[заштрихованный участок]		
Структура поверхностного рельефа	[заштрихованный участок]		

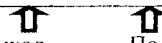

 Выход детали из строя Полное разрушение поверхности

Рис. 2. Схема изменения начальных показателей качества изделий в процессе эксплуатации (заштрихованные участки характеризуют длительность сохранения начальных значений геометрических параметров, остаточных напряжений и структуры материала в пределах допускаемых отклонений)

3. Направленное формирование показателей качества

Отличительной особенностью существующих подходов к определению и прогнозированию точности и других показателей качества изготавливаемой машиностроительной продукции является использование принципа суперпозиции, согласно которой каждый из действующих технологических факторов действует независимо от других, а результат совместного действия определяется их парциальной суммой, представляемой в той или иной форме [14, 15].

Технологические системы многосвязны, объекты производства характеризуются нелинейностью, необратимостью и неравновесностью. Однако применение принципа суперпозиции сводит многосвязные взаимодействия, осуществляемые в технологических системах, к односвязным, игнорируя взаимное влияние технологических факторов [3, 16].

Рост требований к качеству изготовления элементов машин делает методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции, малоприменимыми, так как эффект взаимного влияния факторов соизмерим с результатами их прямого воздействия. Процесс изменения свойств изделий должен рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов, собственно изменения и сохранения свойств [3,6].

Множественность свойств изделий, каждое из которых может характеризоваться соответствующим множеством показателей качества, является также проявлением многосвязности технологических факторов при формировании качества изделия. Свойства изделия формируются при его изготовлении взаимосвязанно. Однако в производственной практике машиностроения этот факт учитывается недостаточно. Изолированное рассмотрение процесса формирования локального множества выделенных показателей качества может привести к серьезным ошибкам при проектировании и реализации технологических процессов [14, 15].

Концептуальный подход. 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 [6, 16].

Математический аппарат методологии базируется на следующих основных положениях [3, 16]:

- качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории и множество показателей качества детали является результатом предыстории;
- любое технологическое и связанное с ним воздействие на заготовку изменяет все показатели качества заготовки;
- любой показатель качества, изменяясь, изменяет все остальные показатели качества заготовки.

Значение характеристик технологических сред и закономерностей их изменения позволило сформировать основную задачу направленного формирования показателей качества изделия: при известных начальных и конечных свойствах предмета производства определить наиболее оптимальную с точки зрения трансформации свойств технологическую среду.

В результате предложен общеметодический подход к обеспечению направленного формирования оптимальных свойств изделий (рис. 3).

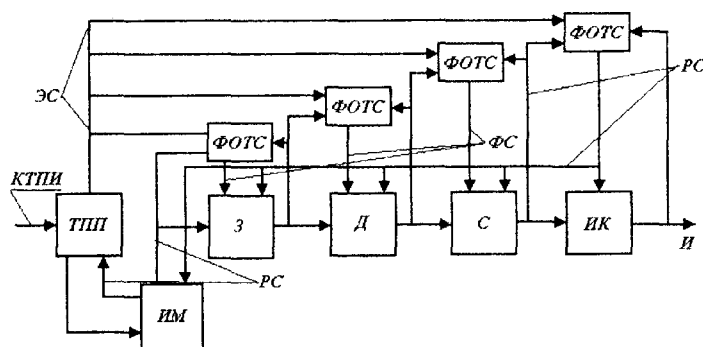


Рис. 3. Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий:
 И - изделие; ЗС, РС, ФС - соответственно заданные, реальные, формируемые свойства изделия;
 ТПП - технологическая подготовка производства; ИМ - изготовление исходных материалов;
 3 - изготовление заготовок; Д - изготовление деталей; С - сборка; ИК - испытание и контроль;
 КТПИ - конструктивно-технологические параметры изделия;
 ФОТС - формирование оптимальных технологических сред

Важнейшей особенностью подхода является формирование для каждого технологического 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.

Модель многосвязных взаимодействий. 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.

На базе концептуального подхода предложено определять следующие коэффициенты [3, 16]:

- коэффициент оперативного изменения i -того показателя качества при использовании j -того технологического метода – $(m_i)_j$;
- изменения i -того показателя качества изделия, связанного с условиями реализации j -того технологического метода – $(u_i)_j$;
- изменения i -того показателя качества при взаимодействии со средой уровня операции, реализующей j -тый технологический метод – $(S_i)_j$.

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

$$(K_i)_j^{on} = (m_i)_j (K_i)_{j-1} + (u_i)_j (K_i)_{j-1},$$

где $(K_i)_j$ – множество значений показателей качества изделия после выполнения операции его изготовления с учетом закономерностей технологической наследственности; $(K_i)_{j-1}$ – множество значений показателей качества, характеризующих состояние изделия после выполнения предыдущей операции.

Если метод не реализован $(m_i)_j = 1$, $(u_i)_j = 0$, иначе $0 < (m_i)_j \leq 1$. 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 определяют статистической обработкой экспериментального материала.

Для конкретного метода слагаемое $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ выделяется в систематическую составляющую C :

$$[(K_i)_{j-1}]_r = (m_i)_j [(K_i)_{j-1}]_r + C,$$

где r – индекс реализации метода.

При определении значений $(m_i)_j$ используются методики максимального пересечения множества входных и выходных значений показателей качества, а также усреднения границ диапазонов (рис. 4).

При известных $(m_i)_j$ значения $(u_i)_j$ определяются в соответствии с

$$[(u_i)_j]_r = [(K_i)_{j-1}]_r / [(K_i)_{j-1}]_r - (m_i)_j.$$

При известных $(m_i)_j$, $(u_i)_j$

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

используются таблицы усредненных значений коэффициентов оперативного изменения свойств $(m_i)_j$ для основных технологических методов обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, а также плоскостей.

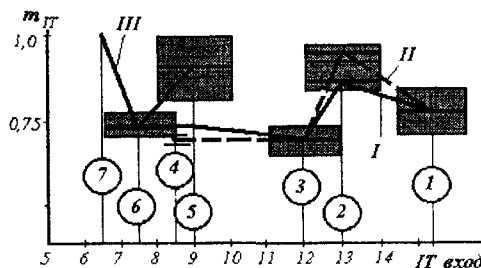


Рис. 4. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_{ij}) для методов обработки наружных цилиндрических поверхностей:

1, 2, 3, 4 – соответственно точение черновое, получистовое, чистовое, тонкое;

5, 6, 7 – соответственно шлифование предварительное, окончательное, тонкое;

I, II – методика максимального пересечения множеств; II – методика усреднения границ

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.

Среднее значение относительной погрешности определения величины m_{IT} коэффициента оперативного изменения точности размеров для группы методов точения и шлифования деталей из конструкционных углеродистых сталей составило 2,5 %, а шероховатости 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. 5, 6).

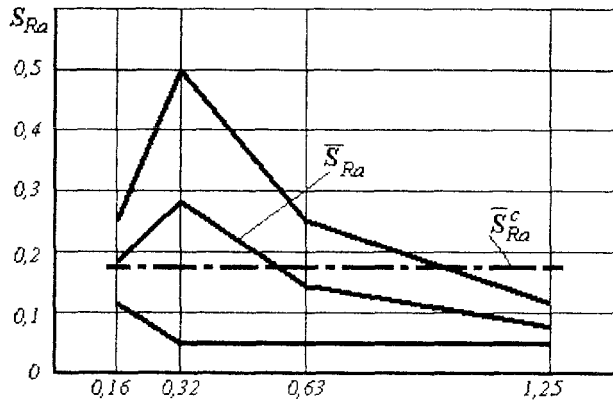


Рис. 5. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при суперфинише: \bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение; \bar{S}_{Ra}^c – усредненное постоянное значение

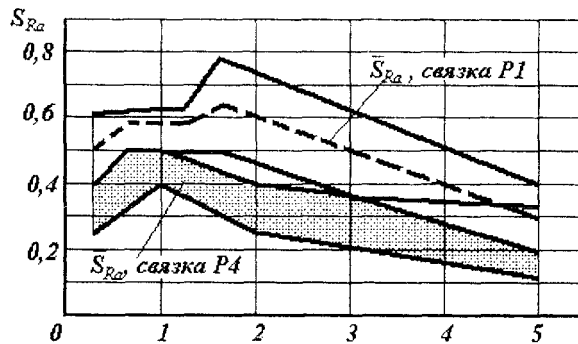


Рис. 6. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при шлифовании абразивной лентой (\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение коэффициента)

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.

Многосвязность технологических сред, различие физических процессов, сопровождающих взаимодействие сред с предметом труда, является основной причиной отсутствия единого методического подхода к определению элементов матрицы $[K_{ij}]$. Коэффициенты сохранения и взаимного влияния формируемых свойств k_{ij} определяются при реализации сквозного технологического процесса изготовления изделия при непрерывном исследовании состояния качества предмета производства.

Первичное значение k_{ij} для начальной фазы процесса:

$$k_{ij} \approx \frac{(K_i)_1 - S_{ij}(K_i)_0}{(K_i)_0},$$

где $(K_i)_{0,1}$ – значение показателя K_i до и после выполнения операции; $(K_i)_0$ – значение показателя K_i до начала выполнения операции; S_{ij} – коэффициент изменения показателя качества при взаимодействии предмета производства с технологической средой уровня операции.

В отличие от $m_i u_i$ коэффициенты k_{ij} имеют физическую размерность.

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 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 [3, 16].

Расчетно-аналитический метод. Рассмотрение взаимного влияния технологических факторов при взаимодействии технологических сред с предметом производства позволяет внести соответствующие уточнения в расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности механической обработки. 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.

В результате разработан математический аппарат определения значений составляющих и суммарной погрешности обработки. Для первых справедливо

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} 1 & a_{\Delta Y, \varepsilon} & a_{\Delta Y, \Delta H} & a_{\Delta Y, \Delta u} & a_{\Delta Y, \Delta T} \\ a_{\varepsilon, \Delta Y} & 1 & a_{\varepsilon, \Delta H} & a_{\varepsilon, \Delta u} & a_{\varepsilon, \Delta T} \\ a_{\Delta H, \Delta Y} & a_{\Delta H, \varepsilon} & 1 & a_{\Delta H, \Delta u} & a_{\Delta H, \Delta T} \\ a_{\Delta u, \Delta Y} & a_{\Delta u, \varepsilon} & a_{\Delta u, \Delta H} & 1 & a_{\Delta u, \Delta T} \\ a_{\Delta T, \Delta Y} & a_{\Delta T, \varepsilon} & a_{\Delta T, \Delta H} & a_{\Delta T, \Delta u} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{ij}$$

где $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)^T_j$ – 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; $(\Delta Y, \varepsilon, \Delta H, \Delta u, \Delta T)^T_{ij}$ – вектор-столбец детерминированных значений, составляющих погрешностей, определенных на основе традиционного расчетно-аналитического метода.

Квадрат итогового значения суммарной погрешности Δ определяется в форме

$$\Delta^2 = [\lambda_i P_i]^T [P_i],$$

где λ_i – коэффициенты, определяющие форму кривой распределения составляющей погрешности P_i ; T – символ транспонирования.

Учет многосвязности технологических сред при определении суммарной погрешности обработки позволяет более чем в 2 раза повысить точность существующего метода расчета [16].

Разработанный аппарат описания трансформации свойств изделий позволяет желаемым образом определять 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. Так, например, по завершении заготовительного передела достигнутые значения квазистабильных K_c^3 и изменяющихся K_v^3 показателей качества определяются следующим образом:

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

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 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:

$$K_N = H_N \cdot K^M,$$

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 желаемые уровни не для всех, а лишь для труднообеспечиваемых 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.

Технологический алгоритм. Распределение уровней свойств в сочетании с определением количественных характеристик возможной трансформации свойств позволяет принципиально изменить существующие подходы к построению технологических процессов [3].

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

С учетом влияния всего цикла изготовления детали на ее эксплуатационные свойства разработан алгоритм, в соответствии с которым по требуемым эксплуатационным свойствам рекомендуются значения параметров состояния поверхностного слоя готовой детали и формируется технологический процесс ее изготовления, обеспечивающий указанные параметры, назначаются режимы резания, характеристики инструмента и оборудования, марка СОТС (смазочно-охлаждающая технологическая среда), обеспечивающие необходимые параметры состояния поверхностного слоя заготовки и полуфабриката на каждом этапе обработки (рис. 7).

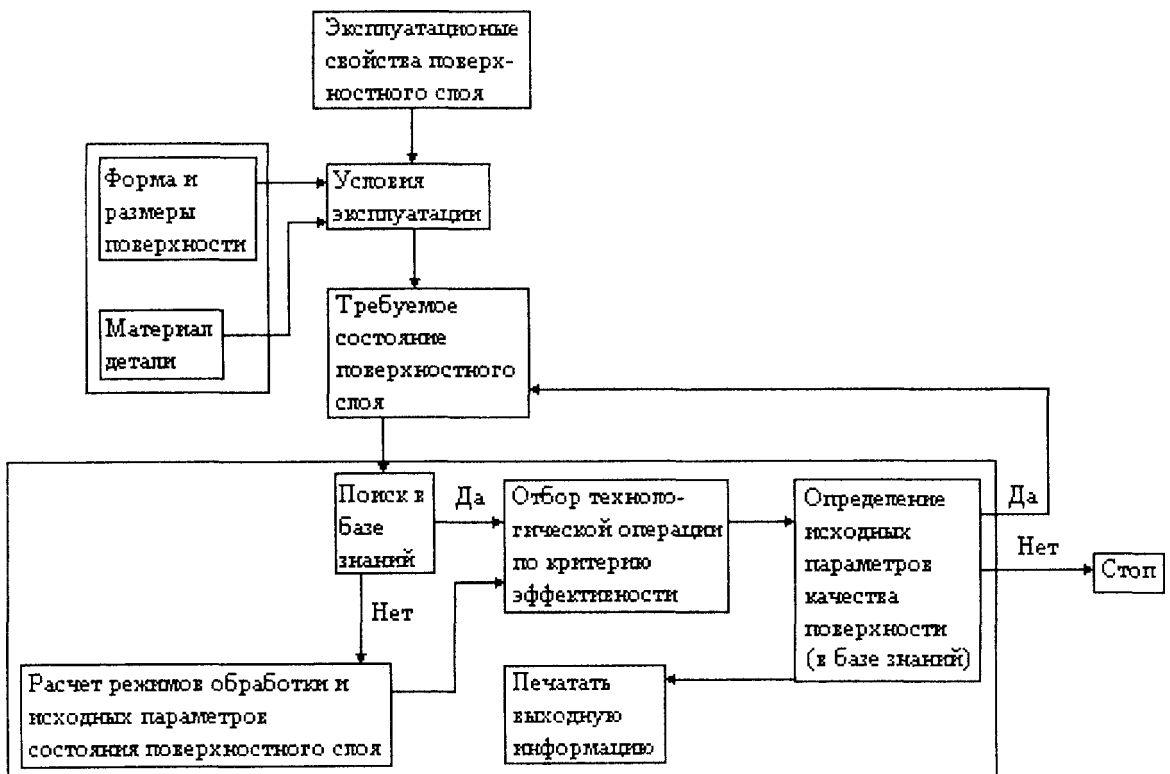


Рис. 7. Технологический алгоритм

Технологический алгоритм включает следующие этапы:

- исходя из эксплуатационных свойств и условий эксплуатации элементарных поверхностей детали устанавливаются требования к состоянию поверхности детали;
- на основании математических моделей или в базе данных по требуемому состоянию поверхностного слоя определяются режимы обработки, инструмент, оборудование, СОТС, необходимые для реализации окончательной обработки заданной детали;
- по параметрам состояния поверхностного слоя определяются режимы обработки, инструмент, оборудование, СОТС, необходимые для реализации предыдущей операции (перехода) обработки.

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. Стратегия разрешения проблемы автоматизированного синтеза МТП с учетом закономерностей изменения, сохранения и взаимного влияния формируемых показателей качества, предусматривает:

- выполнение синтеза МТП в автоматизированном режиме на основе общетехнологических принципов и получение основных характеристик маршрута;
- прогнозирование изменения показателей качества с учетом закономерностей трансформации свойств на основе структуры сформированного МТП;
- выполнение необходимой корректировки МТП в случае, если желательный уровень значений показателей качества не достигнут.

Автоматизированная генерация технологических сред заданного уровня относительно выделенного объекта принципиально возможна на основе их функциональных моделей, созданных с применением CALS-технологий. Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять редукцию ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных при сохранении корректности и адекватности [3].

Снижение чувствительности технологических и эксплуатационных сред к изменению условий реализации режимов производства и применения изделий позволяет с наименьшими затратами осуществлять направленное формирование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения.

4. Управление процессами интенсивной обработки

Управление основными технологическими и эксплуатационными факторами с использованием статистических методов контроля [17] позволяет обеспечить показатели качества изделий в пределах рекомендуемых значений.

В этой связи на предприятии прежде всего требуется определить процессы производства и обслуживания, результаты которых не могут быть проверены с помощью последующего мониторинга и измерений. К ним относятся процессы, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции или после предоставления услуги. Поэтому на предприятии необходимо определить перечень специальных процессов [18], установить методы их оценки с точки зрения достижения планируемых результатов путем определения критериев, требований к оборудованию и персоналу, методики подтверждения качества и управления специальными процессами, используя специализированные методы измерения и контроля, формы и порядок регистрации параметров качества [19].

Специальные процессы условно можно разделить на две категории:

- относящиеся к производству (сварка, наплавка, нанесение покрытий, термомеханическая и другая обработка);
- относящиеся к контролю и испытаниям (бесконтактный контроль физико-механических характеристик, испытания на износостойкость, обкатка, испытательный пробег и т.п.) [20].

Совмещенная и комбинированная обработка. Внедрение управления качеством предполагает эффективное использование статистических методов контроля, наиболее широкое применение среди которых нашли контрольный листок, гистограмма, диаграмма рассеяния (поле корреляции), расслоение (стратификация), диаграмма Парето, диаграмма «причины - результат», контрольная карта, а также применения планов выборок и контроля, сравнений и предпочтений факторов, корреляции их рангов, дисперсии оценок, регрессии параметров и критериев их комплексного оценивания [21,22].

Однако использование традиционных методов контроля для управления специальными многофакторными процессами не эффективно вследствие особой сложности взаимосвязей технологических факторов и эксплуатационных параметров в процессах, совмещающих в одном методе обработки различные технологические операции, а в рамках операции комбинацию разнообразных технологических воздействий [23].

Для изучения путей управления специальными процессами на первом этапе была рассмотрена совмещенная обработка - нанесение покрытия с его поверхностным деформированием [24], у которой, чередуя материалы наносимого покрытия, последовательно сокращалось сначала число контролируемых параметров, а затем технологических факторов, чтобы предложить схему управления комплексом основных параметров совмещенной обработки, используя наиболее значимые и наименее взаимосвязанные факторы [3, 23].

На втором этапе было исследовано управление комбинированной упрочняюще-размерной обработкой наплавленного покрытия [25], для которой при разнообразных технологиях предварительного нанесения различных материалов обрабатываемого покрытия, последовательно сокращалось число технологических факторов, чтобы предложить схему управления комплексом параметров комбинированной обработки [3, 23].

На заключительном этапе были проанализированы взаимосвязи контролируемых параметров и регулируемых факторов на схемах управления и предложена методика управления специальными процессами совмещенной и комбинированной обработки.

Для анализа управления технологическим процессом совмещенной обработки была рассмотрена электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием [24], обеспечивающая не только формирование поверхности детали с улучшенными геометрическими параметрами, но и упрочнение поверхностного слоя, повышение его физико-механических характеристик [20].

Изучались зависимости регламентируемых параметров электромагнитной наплавки различных ферропорошков с поверхностным пластическим деформированием (рис. 8): физико-механического (твердость) $Y_1 = HRC$; геометрического (шероховатость) $Y_2 = Ra$, мкм; эксплуатационного (относительная износостойкость) $Y_3 = \varepsilon$; производительности (нанесение покрытия) $Y_4 = Q$, г/дм² от основных технологических факторов электромагнитной обработки: силы разрядного тока $X_1 = I$; магнитной индукции в рабочем зазоре $X_2 = B$ и совмещенной механической обработки: подачи инструмента $X_3 = S$; скорости вращения детали $X_4 = V$ и усилия деформирования $X_5 = P$.

Для анализа управления комбинированной обработкой было рассмотрено упрочняющее ротационное резание с нагревом – оплавлением срезаемого слоя предварительно нанесенного износостойкого покрытия [25], используемое после восстановления деталей напылением и наплавкой, совмещающее операции термообработки покрытий с удалением дефектного поверхностного слоя резанием и упрочняющим деформированием обрабатываемой поверхности [27]. Для временного снижения прочности дефектного слоя покрытий используется дополнительный нагрев или технологическое тепло наплавки, а для удаления припуска и деформирования поверхности применяется ротационный инструмент.

Изучались зависимости регламентируемых параметров упрочняюще-размерной ротационной обработки плазменной наплавки хромоникелевым порошком, газопламенной наплавки хромоникелевым порошком и вибродуговой наплавки стальной проволокой с плазменным нагревом (рис. 9): физико-механических (твердость и поверхностный наклеп) $Y_1 = HRC$ и $Y_2 = U_n$, %; геометрических (волнистость и шероховатость) $Y_3 = Sm_w$ и $Y_4 = Ra$, мкм; производительности инструмента (определяется отношением скорости дополнительного V_r и главного V движения ротационного резца) $Y_5 = K$ от основных технологических факторов: $X_1 = I$ – силы тока плазменной дуги; $X_2 = L$ – расстояние от пятна нагрева до режущей кромки инструмента; $X_3 = S$ – скорости подачи инструмента; $X_4 = V$ – скорости главного движения и $X_5 = l$ – глубины резания.

Методология управления процессами. Диаграммы рассеяния контролируемых параметров $Y_1, \dots, Y_4, \dots, Y_n$ совмещенной и комбинированной обработки показали отсутствие их линейной корреляции с технологическими факторами $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$, а результаты расслоения гистограмм $Y_1, \dots, Y_k, \dots, Y_n$, по факторам не позволили существенно снизить дисперсию, что указало на тесную взаимосвязь $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$. Поэтому в качестве статистической модели обработки применялись квадратичные функции, а для их построения и оценивания использовали дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ.

Квадратичные уравнения

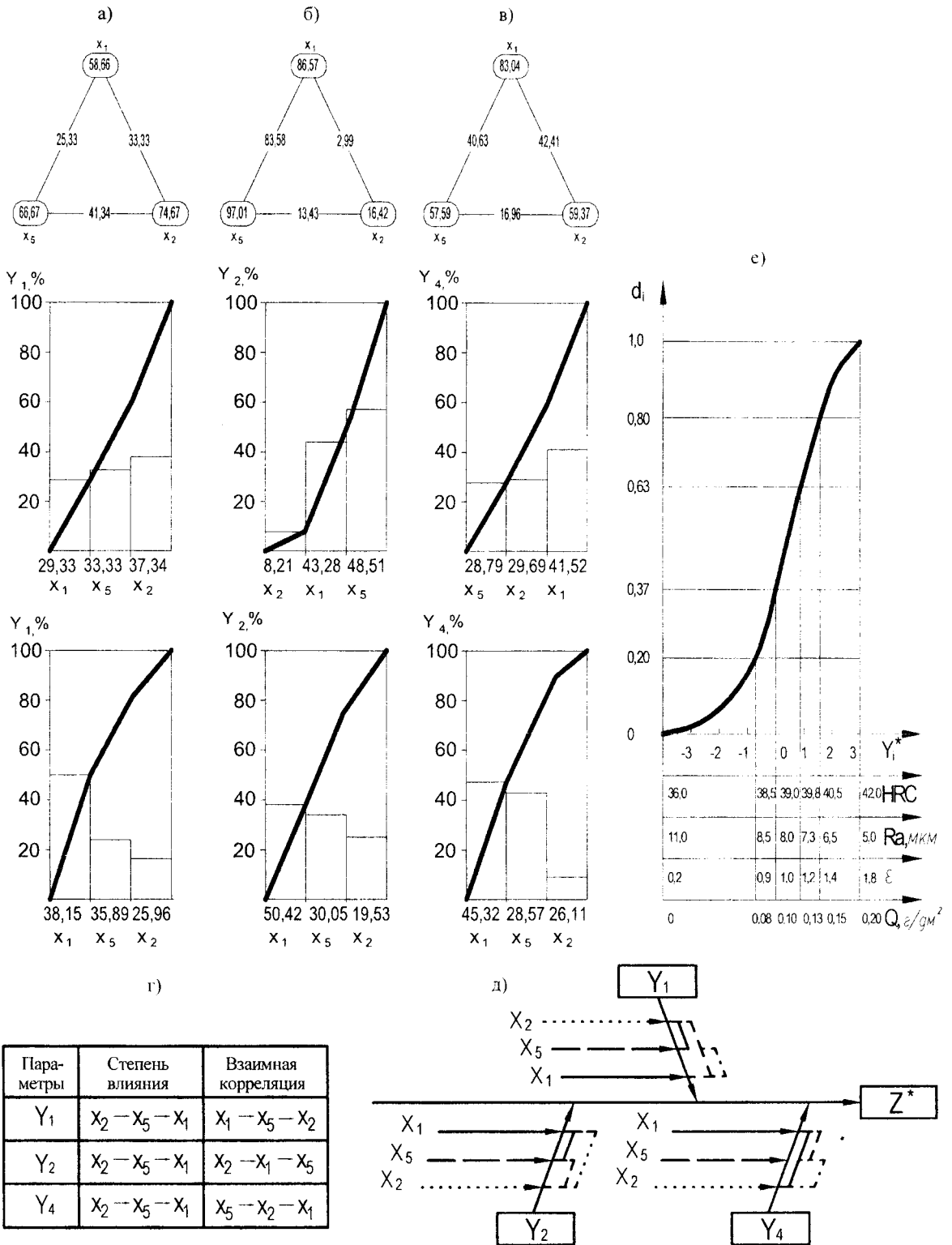
$$Y_i = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i + \sum_{i,j=1}^m b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} X_i^2,$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии (получали с помощью математического планирования экспериментов, для которого вследствие существенной нелинейности параметров и тесной корреляции факторов применяли центральный композиционный рототабельный равномерный план второго порядка) [20, 23].

Значимость коэффициентов регрессии определяли по критерию Стьюдента, а адекватность модели оценивали по критерию Фишера.

Изучение коэффициентов b_{ij} , описывающих взаимодействие факторов $X_i X_j$ на многоугольниках предпочтений, дало возможность определить значимость взаимной корреляции факторов по диаграммам Лоренца, в которых $X_i X_j$ ранжируются в порядке возрастания, а их значения, в отличие от многоугольни-

ков, разделены на 2 (чтобы в сумме получить 100 %). Анализ линейных коэффициентов b_i (а также нелинейных b_{ii}) полученных математических моделей по диаграммам Парето, в которых X_i (а также X_i^2) ранжируются в порядке убывания, позволил выявить степень влияния факторов на исследуемые параметры (см. рис. 8, а - в; рис. 9, а - д).



Параметры	Степень влияния	Взаимная корреляция
Y_1	$X_2 - X_5 - X_1$	$X_1 - X_5 - X_2$
Y_2	$X_2 - X_5 - X_1$	$X_2 - X_1 - X_5$
Y_4	$X_2 - X_5 - X_1$	$X_5 - X_2 - X_1$

Рис. 8. Управление специальным процессом наплавки упрочняющего покрытия ферропорошком, совмещенной с поверхностным деформированием по комплексу параметров: HRC (а), Ra (б), Q (в), с учетом влияния и взаимосвязи факторов (г), на диаграмме «причины - результат» (д), по обобщенной функции желательности (е)

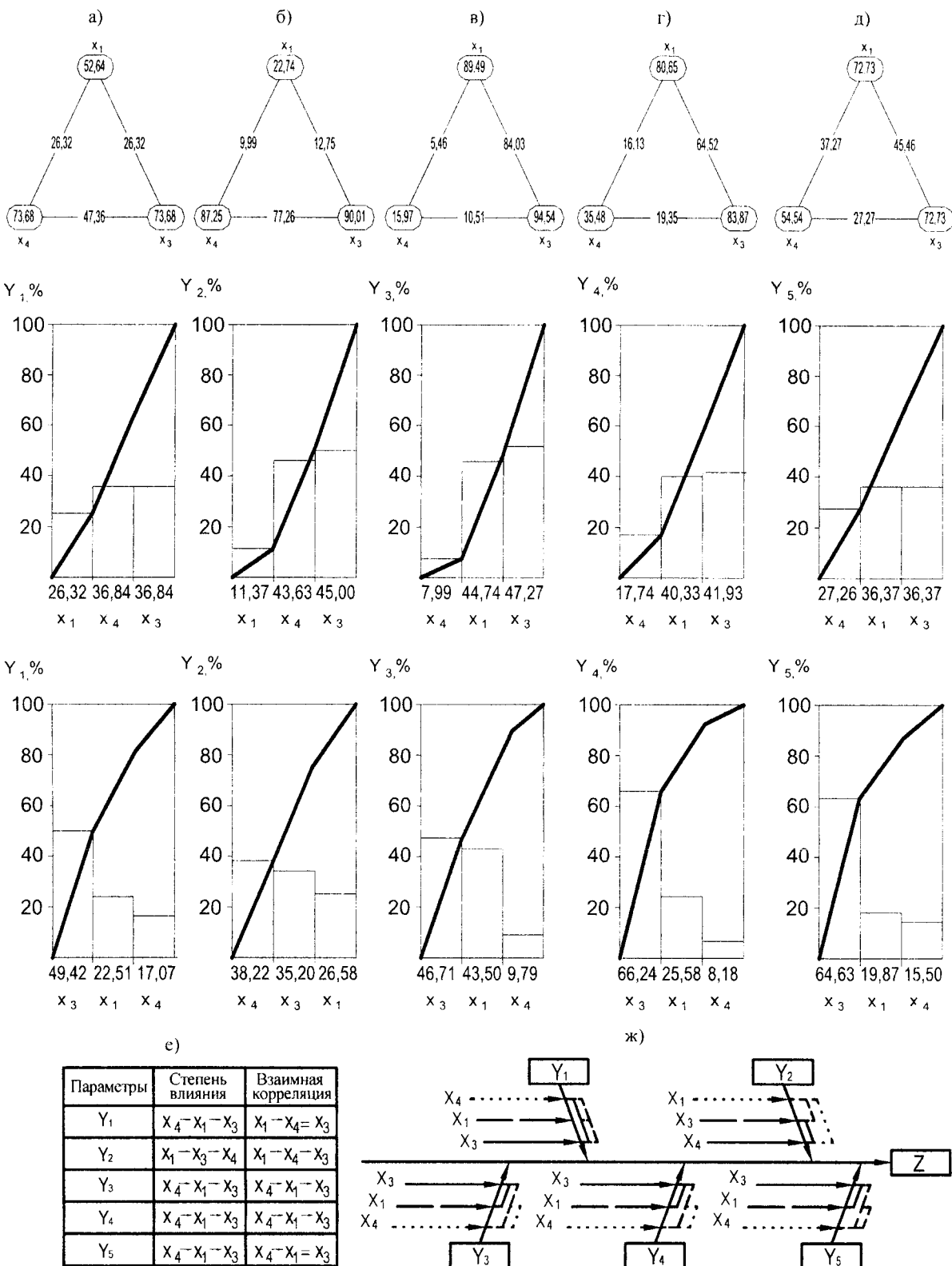


Рис. 9. Управление специальным процессом комбинированной упрочняюще-размерной термомеханической обработки износостойкого покрытия хромоникелевым порошком по комплексу параметров: HRC (а), U_n (б), Sm_w (в), Ra (г), K (д), с учетом влияния и взаимосвязи факторов (е), на диаграмме «причины – результат» (ж)

Для различных параметров $Y_1, \dots, Y_k, \dots, Y_n$ с учетом степени влияния и значимости взаимной корреляции, факторы $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$ в порядке предпочтения (\rightarrow) или при его отсутствии ($=$) располагались в ряды (см. рис. 8, г; рис. 9, е).

Так как для управления параметрами Y_k (в различных строках на рис. 8, г; рис. 9, е) целесообразно использовать наиболее влиятельные и наименее коррелированные с другими факторы, то выбирались такие X_i (из разных столбцов рис. 8, г; рис. 9, е), расстояние между которыми минимально.

Для комплексной оптимизации параметров качества и управления технологическим процессом применяли диаграмму «причины – результат» (см. рис. 8, д; 9, ж), для которой в качестве цели рассматривали обобщенную функцию желательности Харрингтона [20, 23]:

$$Z = \sqrt[n]{d_1 \dots d_k \dots d_n},$$

где $d_k = \exp[-\exp(-Y_k)]$.

Для желательностей d_k предлагали шкалы (см. рис. 8, е), составленные исходя из значимости параметров Y_k и рассмотренных на диаграмме «причины – результат» возможностей их регулирования технологическими факторами X_i .

На диаграммах (см. рис. 8, д; 9, ж) в качестве главных причин указывались параметры Y_k , которые в свою очередь обусловлены факторами X_i . Для каждой причины в порядке значимости согласно диаграммам Парето выделялись три первоочередных фактора и в соответствии с многоугольниками предпочтений указывались три основные взаимосвязи факторов.

Согласно ранжированию параметров определяли регулируемые диапазоны на шкалах желательностей (см. рис. 8, е). Комплексную оптимизацию многофакторного технологического процесса, представленного уравнениями квадратичной регрессии, проводили методом спирального координатного спуска по обобщенной функции желательности Z и сравнивали ее с результатами оптимизации отдельных параметров Y_k .

По результатам оптимизации параметров, с учетом анализа диаграмм «причины – результат» сокращали число контролируемых параметров, исключая наиболее коррелированные, и количество регулируемых факторов, не рассматривая наименее влиятельные из них (см. рис. 8, д; 9, ж).

Статистический анализ параметров качества. Сравнивая диаграммы управления при последовательном снижении числа параметров для совмещенной обработки (см. рис. 8, д) с диаграммами при последовательном сокращении числа управляющих факторов для комбинированной обработки (см. рис. 9, е) и учитывая связи в технологической системе, можно сделать выводы о принципиальных различиях и сходстве в управлении специальными процессами, формирующими в первую очередь физико-механические (см. рис. 8) или геометрические (см. рис. 9) параметры качества, а затем оставшийся комплекс эксплуатационных свойств [28 - 30].

При совмещенной обработке прослеживается строгая иерархия технологических воздействий. Так, при электромагнитной наплавке с поверхностным деформированием от термоэлектрических через механические к электромагнитным воздействиям их влияние падает. Это становится заметным (см. рис. 8, д) при исключении из рассмотрения взаимовлияния воздействий через факторы, определяющие производительность обработки (V и S). Комбинированная обработка демонстрирует, как, например, при ротационном резании с нагревом, тесную взаимосвязь термоэлектрических и механотермических воздействий. Только исключая влияние масштабных факторов (t и L), можно выделить (см. рис. 9, ж) иерархию минимального числа термомеханических воздействий.

В технологической системе с взаимозависимостями физико-механических (HRC) и геометрических (Ra) параметров через стабилизацию процесса (Q) взаимосвязи факторов чередуются. Для определяющих факторов (I, P, B), при анализе комплекса главных параметров, наблюдаются различные комбинации их взаимосвязей (см. рис. 8, д). В системе с взаимозависимостями геометрических (Ra и Sm_w) и физико-механических (HRC и U_n) параметров качества через интенсивность процесса (K), взаимосвязи факторов повторяются для различных параметров, с учетом поправок на обрабатываемый материал. Наиболее заметно это проявляется для минимального количества факторов (S, I, V) при оценке ограниченного числа параметров (см. рис. 9, ж).

При нанесении упрочняющих покрытий электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием целесообразно следить за устойчивостью процесса (Q) и проводить экспресс-оценку твердости покрытия (HRC), а контроль физико-механических (U_n), геометрических (Ra) и эксплуатационных (s) параметров качества осуществлять после совмещенной обработки. При ротационном упрочняющем резании износостойких покрытий с предварительным плазменным нагревом рекомендуется наблюдать за работой инструмента (K), осуществлять экспресс-оценку рельефа поверхности (Sm_w) и твердости покрытия (HRC), а контроль геометрических (Ra) и физико-механических (U_n) параметров проводить после комбинированной обработки.

Для стабилизации процесса управление совмещенной термомеханической обработкой в электромагнитном поле при формировании структуры материала с обеспечением рельефа поверхности целесообразно проводить, используя последовательность факторов, обеспечивающих интенсивность ($I - P - B$) и производительность обработки ($S - V$). Для повышения эффективности обработки управление комбинированным плазменно-механическим процессом при формообразовании рельефа поверхности с модифицированием поверхностного слоя следует осуществлять путем регулирования производительности ($S - I - V$), применяя масштабные факторы ($L - t$).

Проведенные на производстве исследования процессов и испытания после восстановления деталей наплавкой при совмещении нанесения покрытий с упрочняющим деформированием, при комбинировании упрочняющей и размерной обработки резанием позволили выработать рекомендации по управлению специальными процессами и техническому контролю на ремонтном предприятии, что обеспечило снижение на 20...40 % числа рекламаций на продукцию, а производственным рабочим позволило перейти на самоконтроль.

Заключение

В результате анализа процессов изнашивания поверхностей и утраты работоспособности узлов трения, изучения особенностей управления процессами совмещенной и комбинированной обработки показана целесообразность применения синергетического подхода к техническим системам.

На основе синергетического подхода сформирована математическая модель технологического и эксплуатационного наследования показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. - Мн.: Наука и техника, 1977. - 256 с.
2. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. - Мн.: Наука и техника, 1984.-288 с.
3. Технологические основы управления качеством машин / Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А. и др. - М.: Машиностроение, 2003. - 256 с.
4. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. - Новополоцк: ПГУ, 2001. - 156 с.
5. Управление свойствами технологической среды при электрофизической обработке / П.А. Витязь, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов, М.Л. Хейфец // Тяжелое машиностроение. - 2004. - № 7. - С. 18-23.
6. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын, А.И. Аверченков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Докл. НАН Беларуси.- 2001.- Т.45, №4.- С. 106- 109.
7. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. - М.: Мир, 1979. - 279 с.
8. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. - 404 с.
9. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. 1995. - Т. 165, №10.- С. 1105 -1144.
10. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. - Гомель: ИММС НАНБ, 1999. - 276 с.
11. Скорынин Ю.В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость. - Мн.: Наука и техника, 1972. - 159 с.
12. Вероятностный анализ процесса изнашивания / Х.Б. Кордонский, Г.М. Харач, В.Л. Артомоновский, Е.Ф. Непомнящий. - М.: Наука, 1968. - 56 с.
13. Использование критериев подобия при проектировании комбинированных физико-химических методов обработки материалов / А.И. Гордиенко, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Докл. НАН Беларуси. - 2004. - Т. 48, № 4. - С. 107 - 110.
14. Технологические основы обеспечения качества машин/ К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 256 с.
15. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. - М.: Машиностроение, 1993. - 304 с.
16. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. - М.: МАИ, 2000. - 364 с.

17. Управление специальными процессами совмещенной и комбинированной обработки деталей машин / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, В.С. Точило, Н.А. Кусакин // Докл. НАН Беларуси. - 2004. - Т. 48, № 6. - С. 113-118.
18. СТБ ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. - Мн., 2001.
19. Суслов А.Г., Горленко О.А. Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин. - М.: Машиностроение, 2003. - 256 с.
20. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец, В.С. Точило, В.И. Семенов и др. - Новополоцк: ПГУ, 2001. - 112 с.
21. Исикава К. Японские методы управления качеством. - М.: Экономика, 1988. - 224 с.
22. Миттаг Х.-Й., Ринке Х. Статистические методы обеспечения качества. М.: Машиностроение. 1995. - 616 с.
23. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков, Н.А. Кусакин. Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец. - Мн.: Экономика и право, 2003. - 224 с.
24. Комбинированный метод электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием / П.И. Ящерицын, Г.А. Деев, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец // Докл. НАН Беларуси. - 1993. - Т. 37, № 4. - С. 114-117.
25. Комбинированный метод обработки ротационным инструментом с нагревом срезаемого слоя концентрированными потоками энергии / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, Н.Н. Попок, М.Л. Хейфец // Докл. НАН Беларуси. - 1992. - Т. 36, № 5. - С. 429 - 432.
26. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. - Мн.: Технопринт, 2000. - 268 с.
27. Обработка износостойких покрытий / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец и др. - Мн.: Дизайн ПРО, 1997. - 208 с.
28. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов // Докл. НАН Беларуси, - 1997,- Т. 41, № 3. - С. 121 - 127.
29. Проектирование мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева, Л.М. Акулович // Докл. НАН Беларуси. - 2003. - Т. 47, №6. - С. 120- 124.
30. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, С.А. Клименко, А.С. Васильев // Докл. НАН Беларуси.- 2005, Т. 49, № 2. - С. 130 - 135.