

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

УДК 658.562 : 621.01

*М. Л. ХЕЙФЕЦ¹, А. С. ВАСИЛЬЕВ², А. И. КОНДАКОВ², Л. ТАНОВИЧ³***ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАСЛЕДОВАНИЕМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН**¹*Отделение физико-технических наук НАН Беларуси, Минск,*²*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва,*³*Белградский университет, Белград**(Поступила в редакцию 07.07.2015)*

Введение. Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевается явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем влияет на эксплуатационные свойства деталей машин [1, 2]. Носители наследственной информации – обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе и при эксплуатации, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов [3, 4].

В технологической цепочке и на стадии эксплуатации существуют своего рода «барьеры». Одни технологические факторы не могут их преодолеть, в таком случае «барьеры» не влияют на конечные свойства объекта. Другие факторы проходят такие «барьеры», но значительно ослабевает их влияние на конечные свойства [1, 3]. Самым существенным «барьером» являются термические операции, а также операции, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микрогеометрию формируемой поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. В ходе этих операций различные «пороки» поверхности, такие как структурная неоднородность, поры, микротрещины, могут развиваться или «залечиваться». Следовательно, можно управлять процессом технологического и эксплуатационного наследования так, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранялись в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировались в его начале [2, 4].

Отличительная особенность существующих подходов к определению и прогнозированию показателей качества машиностроительной продукции – использование принципа суперпозиции, согласно которому каждый из действующих технологических факторов независим от других, а результат совместного действия определяется их парциальной суммой, представляемой в той или иной форме [1, 2].

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

При росте требований к качеству обработки поверхностей деталей машин методы определения и прогнозирования качества, основанные на принципе суперпозиции, становятся малопригодными, так как эффект взаимного влияния факторов соизмерим с результатами их прямого

воздействия. Процесс обеспечения свойств изделий должен рассматриваться как совокупность взаимодействующих процессов, изменения и сохранения свойств [4, 5].

Множественность свойств изделий, каждое из которых характеризуется соответствующим множеством показателей качества, является также проявлением многосвязности технологических факторов при формировании качества изделия. Свойства изделия взаимосвязанно формируются при его изготовлении, однако в производственной практике машиностроения этот факт учитывается недостаточно. Изолированное рассмотрение процесса формирования выделенных показателей качества может привести к серьезным ошибкам при проектировании и реализации технологических процессов [1, 2].

Технические трудности, связанные с описанием многосвязных взаимодействий, при формировании множества показателей качества при обработке и упрочнении поверхностей изделия, а также в процессе его эксплуатации могут быть преодолены на основе применения методологии принятия проектных решений [4, 5].

Анализ процессов изнашивания поверхностей деталей

При анализе процессов изнашивания поверхностей деталей в трибосопряжениях целесообразно рассматривать вектор [6]

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

где $\xi_{u_i}(X, t)$ – скорость изнашивания i -й 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 -й детали) [6, 7]:

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

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.

Модели процессов утраты работоспособности узлов трения. В зависимости от времени τ_p , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают последствия первого и второго рода [6, 8]. 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_d , т. е. $\tau_p \geq \tau_d$. Если $\tau_p < \tau_d$, 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 .

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 [6, 7].

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

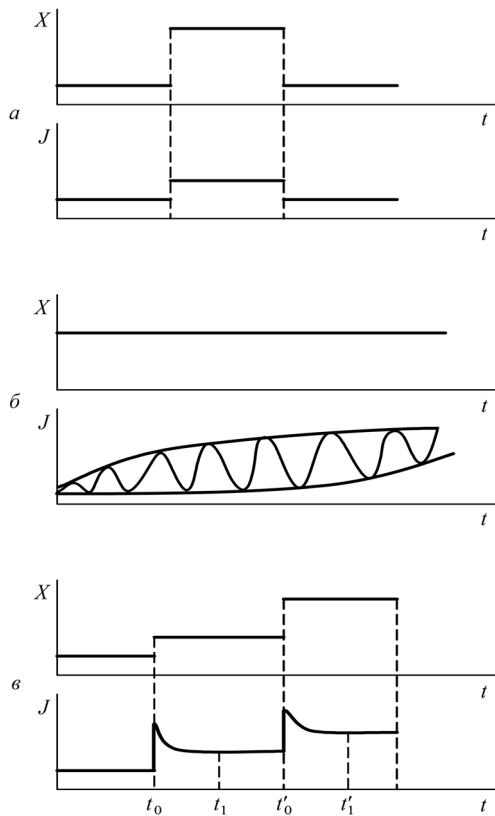


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания J узлов трения от длительности работы t : a – зависимость только от величины нагрузочного воздействия X в момент времени t ; $б$ – зависимость от времени работы t при постоянном X ; $в$ – зависимость от времени работы t при ступенчатом изменении X на отрезках времени $[t_0, t_1]$, $[t'_0, t'_1]$ и т. д.

Утрата работоспособности узлов трения без последствия (рис. 1, а). В случае, когда сопряженный 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 [9], то можно получить условие изнашивания без последствия. 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 $\xi_u = dU/dt$ стационарна в период времени τ [6, 7]. Поэтому данный процесс описывается режимом с запоминанием.

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

Утрата работоспособности с последствием первого рода (рис. 1, б). В случаях, когда значение 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 [6, 7]:

не учитывающими обратную связь нагрузки X с износом U (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.);

учитывающими изменения зависимости q_H нагрузочного воздействия X^* на детали узла трения в результате износа сопряжения U (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 и стохастическим режимами.

Утрата работоспособности с последствием второго рода (рис. 1, в). Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [6, 8]. В переходный период $[t_0, t_1]$ величина J отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия X_{i-1} , и от значения, соответствующего новому уровню X_i :

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

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами [6, 7]: 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 [9] процессы изнашивания в переходные периоды $[t_0, t_1]$ характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа $U_i(\Delta t)$ и $U_{i+1}(\Delta t)$ [6, 7]. Их следует рассматривать как релаксационные процессы с характерным периодом $[t_0, t_1]$.

Таким образом, понижение размерности при описании 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 [10].

Показатели качества поверхностей деталей машин. Показатели качества изделий машиностроения, являющиеся основными, делятся на две категории [7,11]: к первой категории относятся те, которые характеризуются наследственными явлениями, связанными со свойствами материалов изделий; ко второй – показатели качества, связанные с геометрическими параметрами их поверхностей.

Показатели обеих категорий в многосвязных технологических и эксплуатационных средах влияют друг на друга. Геометрические параметры изделий, такие как их конфигурации и размеры, могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоях. Наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций упрочнения и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров 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 [7, 12].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях (рис. 2) в процессе эксплуатации изменяются [6, 7]. 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 меняются шероховатость и структура поверхностного рельефа. Волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допустимых значений, принятых при изготовлении, практически

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

↑ Выход детали из строя ↑ Полное разрушение поверхности

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

до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по параметрам точности [1, 2, 6].

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 [2, 12]. Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять снижение ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных связей при сохранении корректности и адекватности [6, 8].

Методология принятия технологических решений

Математический аппарат методологии базируется на основных положениях [2, 12]:

качество детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории и множество показателей качества является результатом предыстории;

любое технологическое и связанное с ним воздействие на заготовку изменяет все показатели качества;

любое изменение показателя качества приводит к изменению остальных показателей качества заготовки.

Характеристики технологических сред и закономерности их изменения позволили 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).

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.

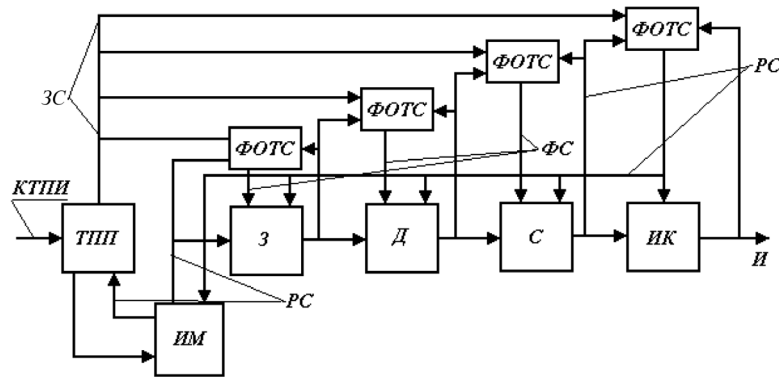


Рис. 3. Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий: И – изделие; ЗС, РС, ФС – соответственно заданные, реальные, формируемые свойства изделия; ТПП – технологическая подготовка производства; ИМ – изготовление исходных материалов; 3 – изготовление заготовок; Д – изготовление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

Модель многосвязных взаимодействий среды. На основе сравнения характеристик сред базового технологического процесса и желаемых процессов 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 [2]:

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

изменения i -го показателя качества изделия, связанного с условиями реализации j -го технологического метода – $(u_i)_j$;

изменения i -го показателя качества при взаимодействии со средой уровня операции, реализующей j -й 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 экономически обоснованные условия обработки), а $(u_i)_j$ – условия, 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 их получают статистической обработкой экспериментального материала.

Для конкретного метода с индексом реализации r слагаемое $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ выделяется в систематическую составляющую (С):

$$[(K_i)_j^{on}]_r = (m_i)_j [(K_i)_{j-1}^{on}]_r + С.$$

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

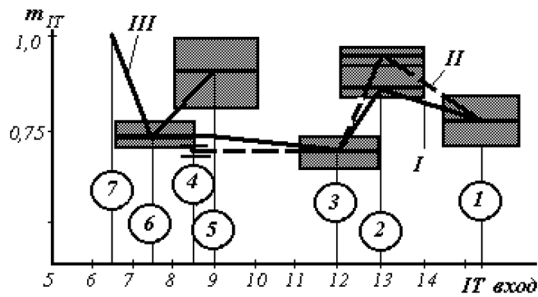


Рис. 4. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_{IT}) для методов обработки наружных цилиндрических поверхностей: 1, 2, 3, 4 – соответственно точение черновое, полусточное, чистовое, тонкое; 5, 6, 7 – соответственно шлифование предварительное, окончательное, тонкое; I, III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

для методов абразивной обработки в среднем в 3 раза выше, чем для лезвийной обработки, 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 с износостойкими покрытиями 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).

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.

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

Первичное значение k_{ij} для начальной фазы процесса:

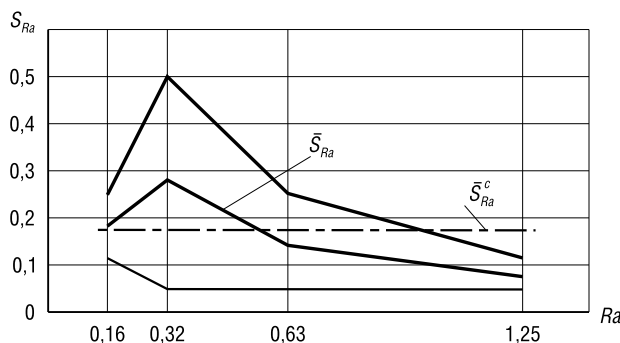


Рис. 5. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости деталей при суперфинише: \bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение; \bar{S}_{Ra}^c – усредненное постоянное значение

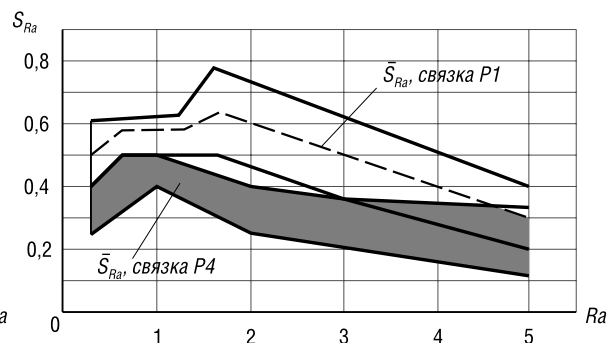


Рис. 6. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости деталей при шлифовании абразивной лентой (\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение коэффициента)

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

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

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.

Установлено, что оптимальная погрешность определения коэффициентов оперативного изменения показателей качества обрабатываемых заготовок

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

где $(K_i)_1$ – значение показателя K_i 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 [2, 12].

Определение погрешности обработки. Рассмотрение взаимного влияния технологических факторов при взаимодействии технологических сред с предметом производства позволяет внести соответствующие уточнения в расчетно-аналитический метод определения суммарной погрешности обработки. Возникающие при обработке заготовки погрешности взаимосвязаны, влияют 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.

Для составляющих погрешности обработки справедливо

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

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

Квадрат итогового значения суммарной погрешности Δ определяется в форме

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

(λ_i – коэффициенты, определяющие форму кривой распределения составляющей погрешности P_i).

Учет многосвязности технологических сред при определении суммарной погрешности обработки позволяет повысить точность существующих методов расчета [2, 6].

Модель формирования показателей качества. 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.

Так, например, по завершении заготовительного передела достигнутые значения квазистабильных K_c^3 и изменяющихся K_v^3 показателей качества определяются следующим образом:

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

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 обработки и упрочнения деталей. Их можно рассматривать как модель формирования свойств изделия в сквозном технологическом процессе его изготовления. Практически для любого этапа N группы операций могут быть получены соотношения вида

$$K_N = H_N K^M.$$

Здесь K_N – значение сформированного после этапа N показателя качества; H_N – коэффициент трансформации свойств изделия по отношению к исходным свойствам (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 снизить размерность решаемых технологических задач.

Определение показателей передачи эксплуатационных свойств

Функциональные модели многосвязных технологических сред позволяют в зависимости от постановки решаемой задачи осуществлять снижение ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных связей при сохранении корректности и адекватности.

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.

Структура взаимосвязей наследуемых свойств. Технологический процесс изготовления и эксплуатации детали может быть представлен в виде графа, выделяющего заготовительные, черновые операции, чистовые и отделочные операции, а также стадии эксплуатации [6]. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 7).

Начальная вершина графа при описании технологического процесса представляет собой заготовку (З), конечная вершина – готовую деталь (Д) в эксплуатации. Ориентированные ребра графа

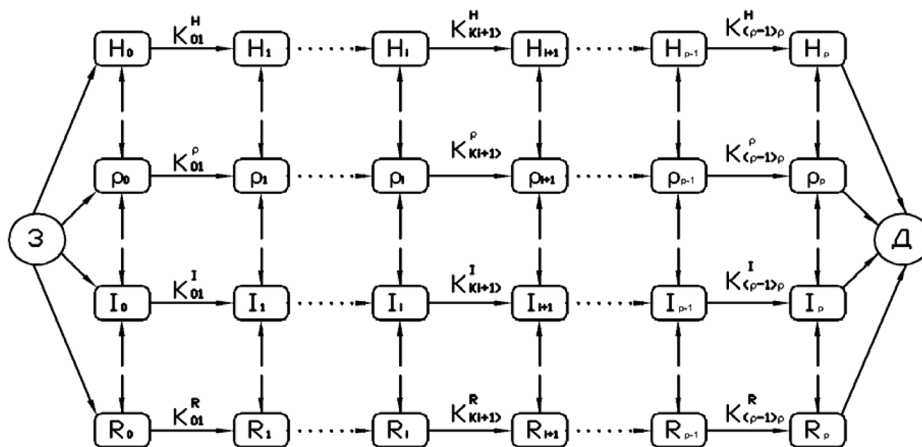


Рис. 7. Развернутый граф технологического и эксплуатационного наследования, учитывающий комплекс показателей качества

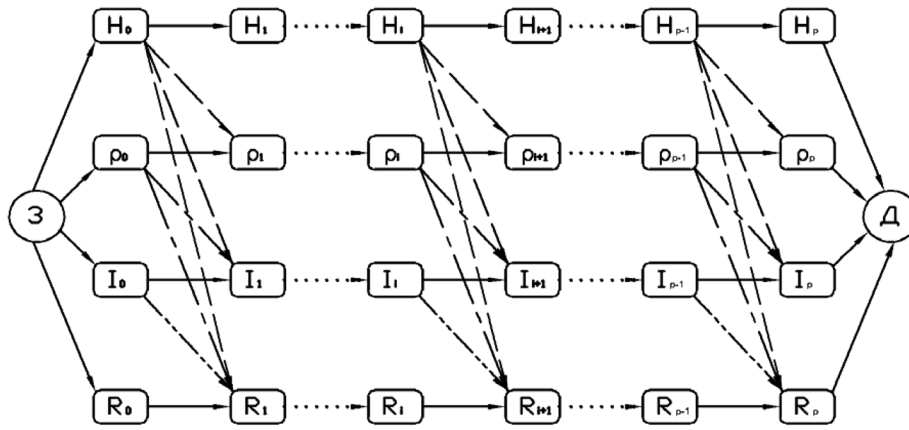


Рис. 8. Граф технологического и эксплуатационного наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических показателей качества

показывают передачу эксплуатационных свойств детали при обработке. Передача ребра описывается коэффициентом наследования K , отражающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих S_j и последующих S_{j+1} значений свойства [4]:

$$K = S_j / S_{j+1}.$$

Помимо прямой передачи свойств (рис. 7) при технологическом и эксплуатационном наследовании целесообразно оценивать их взаимовлияние (рис. 8). Общую структуру процессов можно представить как сложную многомерную систему в виде последовательности изменения основных параметров качества детали [2]. На вход технологической системы обработки поступают различные характеристики заготовки $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$, а на её выходе обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для готовой детали $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности технологических $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ln}\}$ факторов для каждой операции φ_l технологического процесса [3].

Для параметра качества S после окончательной обработки [2]

$$S_p = a_p S_{p-1}^{b_p}.$$

Количественные связи наследственности, зависящие от выбора метода обработки, определяют коэффициентами b , а основные условия обработки внутри этого метода – коэффициентами a . Выполнив преобразования с уравнениями для предшествующих операций $\varphi_{p-1}, \varphi_{p-2}, \dots, \varphi_1$, получили общую математическую модель изменения параметра качества для всего процесса:

$$S_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p-2}^{(b_p b_{p-1})} \dots a_1^{(b_p b_{p-1} \dots b_2)} S_0^{(b_p b_{p-1} \dots b_1)}.$$

Коэффициент наследственности a_l описывает влияние технологических факторов $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ln}$ на рассматриваемый параметр качества S_j для операции φ_l и может быть представлен [3] таким образом:

$$a_l = k_{l0} t_{l1}^{k_{l1}} t_{l2}^{k_{l2}} \dots t_{ln}^{k_{ln}},$$

где $k_{l0}, k_{l1}, k_{l2}, \dots, k_{ln}$ – эмпирические коэффициенты влияния технологических факторов.

Анализ зависимостей показывает, что весь процесс может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции и некоторой доли влияния предшествующих операций на исходное состояние заготовки S_0 , которые определяются коэффициентами наследственности b_1, b_2, \dots, b_p . Если на какой-либо операции φ_l коэффициент технологической наследственности $b_l = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данной операции, что может служить интерпретацией действия операции φ_l как непреодолимого «технологического барьера» [2, 4].

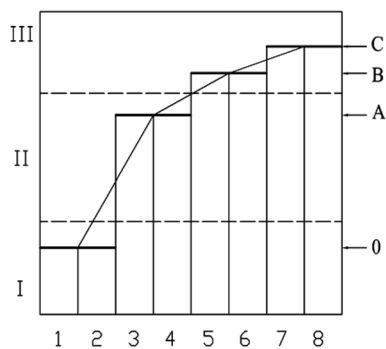


Рис. 9. ABC-анализ изменения в процессе эксплуатации (I–III) начальных показателей качества (1–8): 0 – формирование поверхности; А – изменение контактных нагрузок; В – выход детали из строя; С – полное разрушение поверхности; I – приработка; II – нормальное изнашивание; III – катастрофическое изнашивание; 1 – шероховатость поверхности; 2 – структура поверхностного рельефа; 3 – волнистость поверхности; 4 – структура поверхностных слоев; 5 – форма поверхности; 6 – точность размеров; 7 – остаточные напряжения; 8 – структура основного материала

Основные наследуемые показатели качества. Для выявления

основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился ABC-анализ (рис. 9), выделяющий по степени важности группы причин изменения в процессе эксплуатации начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала [5].

ABC-анализ показал, что в большинстве случаев уже в период приработки (I) существенно меняются шероховатость (1) и структура поверхностного рельефа (2). Волнистость (3) и структура поверхностных слоев (4) изменяются при установившемся изнашивании (II). Точность размеров (5) и геометрическая форма поверхности (6) остаются в пределах допустимых значений даже в начале стадии катастрофического изнашивания (III). Только остаточные напряжения (7) и структура основного материала (8) могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей [6].

Поэтому для изучения наследования оперативно и наименее трудоемко выбирались контролируемые физико-механические геометрические показатели качества из начальной и конечной групп (0–С). При этом особое внимание уделялось показателям (5, 6), претерпевающим существенные изменения в начале катастрофического износа (В) и связанным как с физико-механическими характеристиками материала (7, 8), так и с геометрическими параметрами рельефа поверхности (1, 3).

Изучение и управление технологическим и эксплуатационным наследованием предложенным методом контроля параметров качества проводили для деталей, отвечающих за ресурс изделия [7, 13].

Измерения твердости HRC, отклонений формы ρ , точности размеров IT и рельефа поверхности Ra проводились на партии деталей. Она разбивалась на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое группы.

На основании расчетных результатов определялись коэффициенты передачи наследования K^H, K^p, K^I, K^R для графа на рис. 7 и коэффициенты взаимовлияния технологического наследования $K^{Hp}, K^{HI}, K^{HR}, K^{pI}, K^{pR}, K^{IR}$ для графа на рис. 8.

Для оценки наследования по технологическому маршруту рассчитывались результирующие коэффициенты K_p , равные произведению соответствующих коэффициентов для эксплуатационных параметров качества по всей последовательности операций. Для определения степени влияния наследования на различных технологических операциях рассчитывались коэффициенты сравнения K_c , равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях [14, 15].

Технологические барьеры при передаче свойств. Изучение последовательности воздействий концентрированными потоками энергии на операциях комбинированной обработки и анализ формируемых параметров качества поверхностей сопровождаются исследованием технологической наследственности диссипативных структур, образующихся в процессах интенсивной обработки [16, 17].

Формирование структур в процессах физико-химической обработки исследуется с позиций технологической наследственности, устойчивости параметров качества и производительности обработки.

Воздействия потоками энергии и вещества сообщают обрабатываемой поверхности импульсы, при этом скорость и ускорение их распространения фиксируются на всех участках прохождения импульсов. О скорости распространения энергии можно судить по распределению значений параметров упрочнения (рис. 10, кривые I), а вещества по концентрации легирующих элементов

(рис. 11) – по глубине поверхностного слоя. Величина энергии импульса пропорциональна площади, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис.10, кривые 2). Ускорение, т. е. первая производная от скорости, получаемая графическим дифференцированием (рис. 10, кривые 3), характеризует величину и положение силы сопротивления проникновению импульса энергии в поверхностный слой.

Поэтому вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя ($\partial^2(P\tau)/\partial H^2$) можно рассматривать как технологический барьер [17, 18]. Изучение технологических барьеров показывает, что они достаточно точно описываются нормальным законом распределения с различными величинами дисперсий.

Величиной и положением барьеров, описывающих условные поверхности раздела слоев, рекомендовано определять граничные условия при послойном формировании структур [19, 20]. При упрочнении и разупрочнении барьеры располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 10, б). При достаточной близости технологических барьеров совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению барьеров и термомеханическому упрочнению по всей глубине комбинированных воздействий (рис. 10, в). В результате нагрева увеличивается пластичность поверхностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличение зоны и степени деформации, сопровождающееся усилением поглощения тепла, препятствует прохождению и приближает границу распространения теплового потока к поверхности. Совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению технологических барьеров и по всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы.

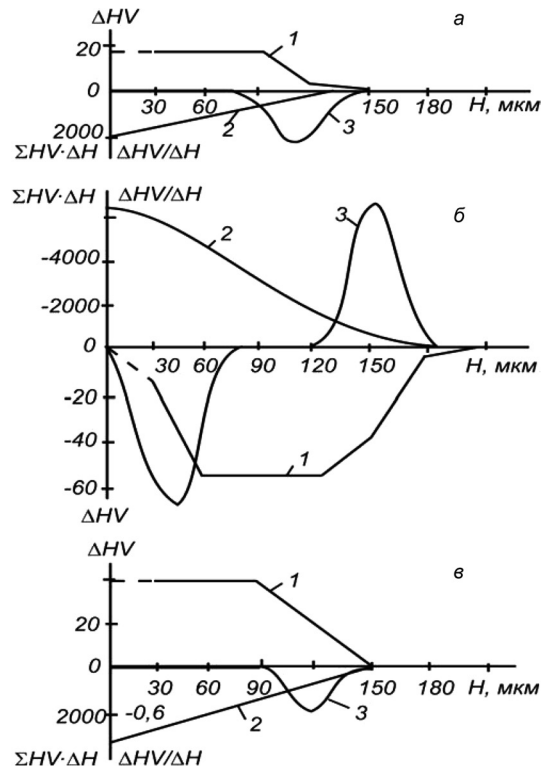


Рис. 10 Зависимости распределения по глубине H поверхностного слоя (1 – изменение твердости ΔHV ; 2 – общее упрочнение $\Sigma HV \cdot \Delta H$; 3 – скорость приращения упрочнения $\Delta HV / \Delta H$) после резания с нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности

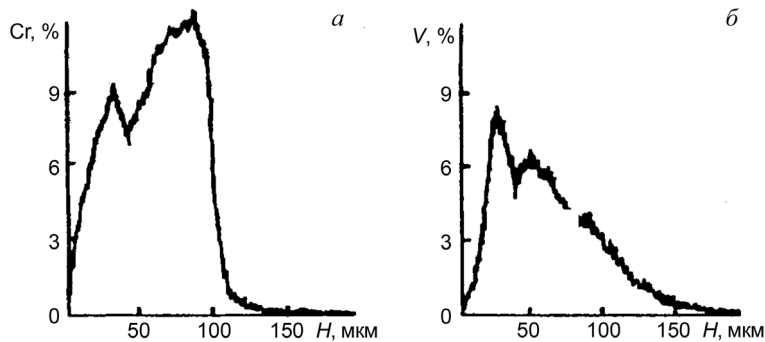


Рис. 11 Зависимости распределения Cr (а) и V (б) по глубине H поверхностного слоя при наплавке порошком высокохромистого чугуна С-300 (а) и при наплавке порошком феррованадия Fe-V с поверхностным пластическим деформированием (б)

Заключение. Технологическое наследование эксплуатационных свойств в процессах изготовления деталей машин целесообразно описывать графом, отражающим коэффициенты передачи и взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров. Для расчета коэффициентов наследования по степени значимости влияния рекомендуется последовательность параметров: твердость (H), отклонение формы (ρ), точность размеров (I) и шероховатость рельефа (R)

поверхности детали. Технологические барьеры при изготовлении деталей можно рассматривать как вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя.

В результате методы технологического управления и контроля наследованием эксплуатационных свойств деталей включают:

измерения физико-механических и геометрических параметров наиболее ответственных деталей;

определение механизмов технологического наследования на основе коэффициентов передачи и взаимовлияния эксплуатационных свойств;

анализ технологических барьеров при интенсивных воздействиях потоками энергии;

разработку мероприятий для технологического управления технологическими процессами.

Исследования частично поддержаны грантами БРФФИ: белорусско-сербским Т14СРБ-010 и белорусско-российским Т14Р-198.

Литература

1. Яцерицын П. И., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей. Новополоцк, 1996.
2. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
3. Яцерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., 1977.
4. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., 1975.
5. Яцерицын П. И., Скорынин Ю. В. Работоспособность узлов трения машин. Мн., 1984.
6. Альгин В. Б., Блюментейн В. Ю., Васильев А. С. и др. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / Под общ. ред. П. А. Витязя. Мн., 2010.
7. Яцерицын П. И., Аверченков В. И., Хейфец М. Л., Кухта С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 106–09.
8. Яцерицын П. И., Хейфец М. Л., Клименко С. А., Васильев А. С. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 4. С. 107–110.
9. Кордонский Х. Б., Харач Г. М., Артомоновский В. Л., Непомнящий Е. Ф. Вероятностный анализ процесса изнашивания. М., 1968.
10. Гордиенко А. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Кухта С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 4. С. 107–110.
11. Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин / Под общ. ред. К. С. Колесникова. М., 1990.
12. Дальский А. М., Базров Б. М., Васильев А. С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М., 2000.
13. Яцерицын П. И., Хейфец М. Л., Точило В. С., Кусакин Н. А. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 6. С. 113–118.
14. Яцерицын П. И., Кусакин Н. А., Хейфец М. Л., Премент Г. Б. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 121–126.
15. Лысов А. А., Кусакин Н. А., Хейфец М. Л., Премент Г. Б. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 4 (105). С. 30–35.
16. Хейфец М. Л., Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель, 1999.
17. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М., 2005.
18. Яцерицын П. И., Хейфец М. Л., Шипко А. А., Кожуро Л. М. // Докл. НАН Беларуси. 1997. Т. 41, № 5. С. 110–113.
19. Чижик С. А., Хейфец М. Л., Филатов С. А. // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 4 (29). С. 68–74.
20. Хейфец М. Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк, 2001.

M. L. KHEIFETZ, A. S. VASILYEV, A. I. KONDAKOV, L. TANOVIĆ

TECHNOLOGICAL MANAGEMENT OF INHERITANCE OF QUALITY PARAMETERS OF A WORK PIECE

Summary

To describe the technological inheritance of operational properties in the processes of the parts manufacturing, a graph reflecting the transfer coefficients and interaction of physical and mechanical and geometrical parameters is proposed. The methods of process control of the parts operational properties inheritance including: measurement of parameters, the most critical parts; identifying of mechanisms of technological inheritance based on the coefficients of transmission and interaction of the performance properties; analysis of technological barriers at the impact of intensive energy flows, development of measures for technological process control were also considered.