

УДК 536.75+658.512:621.002

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАСЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ***д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, Г.Б. ПРЕМЕНТ**(Полоцкий государственный университет);**д-р техн. наук, проф. А.С. ВАСИЛЬЕВ**(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана);**д-р техн. наук, проф. С.А. КЛИМЕНКО**(Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев)*

С позиций технологического наследования эксплуатационных показателей предложены мероприятия по управлению качеством изделий машиностроения. Разработана математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающая 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. Показано, что 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.

Введение. Отличительной особенностью существующих подходов к определению и прогнозированию показателей качества 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 [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, игнорируя взаимное влияние технологических факторов [3].

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, 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 недостаточно учитывается. 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 изготовлении изделия могут быть преодолены на основе применения современных информационных технологий и методологии принятия проектных решений [4, 5].

1. Концептуальный подход

Математический аппарат методологии базируется на основных положениях [3]:

- 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;
- любой показатель качества, изменяясь, приводит к изменению всех 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. 1). Важнейшей особенностью подхода является формирование для каждого технологического передела сквозного процесса изготовления изделия оптимальной технологи-

ческой 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.

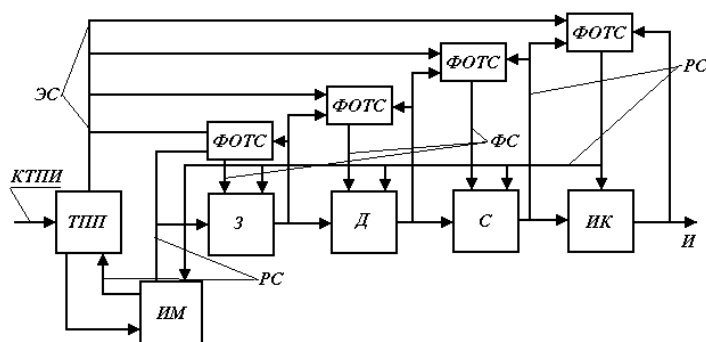


Рис. 1. Концептуальная схема направленного формирования оптимальных свойств изделий:
И – изделие; ЗС, РС, ФС – соответственно заданные, реальные, формируемые свойства изделия;
ТПП – технологическая подготовка производства; ИМ – изготовление исходных материалов;
З – изготовление заготовок; Д – изготовление деталей; С – сборка; ИК – испытание и контроль;
КТПИ – конструктивно-технологические параметры изделия; ФОРС – формирование оптимальных технологических сред

1.1. 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 [3]:

- 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 экономически обоснованные 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 определяются статистической обработкой экспериментального материала.

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

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

1.2. 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. 2).

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

$$\left[u_{i \ j} \right]_{\gamma} = \left[K_{i \ j}^{on} \right]_{\gamma} / \left[K_{i \ j-1}^{on} \right]_{\gamma} - m_{i \ j}.$$

При известных $(m_i)_j, (u_i)_j,$

$$k_{i,j} = \frac{\overline{m}_{i,j}}{\overline{m}_{i,j-1}}$$

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

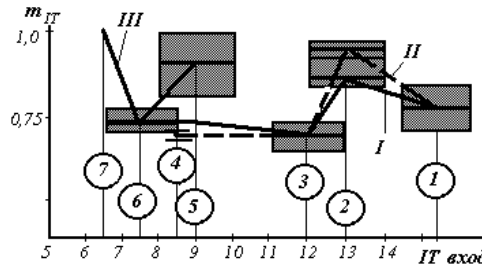


Рис. 2. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_{IT}) для методов обработки наружных цилиндрических поверхностей:

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

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

I, III – 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. 3, 4).

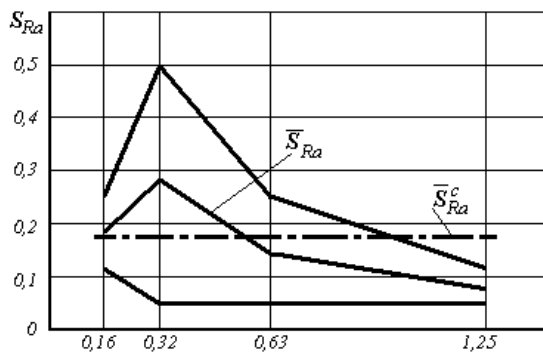


Рис. 3. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при суперфинише:

\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение;

\bar{S}_{Ra}^c – усредненное постоянное значение

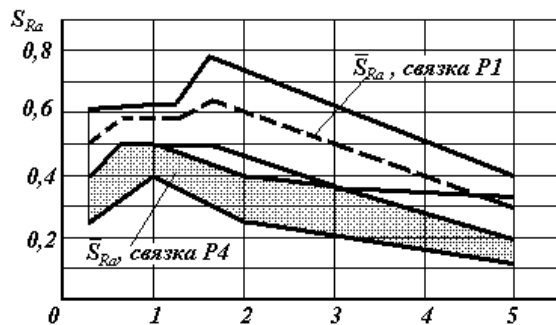


Рис. 4. Зависимость коэффициента S_{Ra} от исходной шероховатости стальных заготовок при шлифовании абразивной лентой (\bar{S}_{Ra} – среднее арифметическое значение коэффициента)

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.

1.3. Определение коэффициентов сохранения и взаимовлияния. Многосвязность технологических сред, различие физических процессов, сопровождающих взаимодействие сред с предметом труда, является основной причиной 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:

$$k_{ij} \approx \frac{K_{i1} - S_{ij} K_{i0}}{K_{i0}},$$

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. Применение предложенного подхода позволяет от 2 до 5 раз уменьшить относительную погрешность предварительного определения значения показателя качества по сравнению со значением, полученным на основе известных закономерностей технологии машиностроения [3].

2. 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.

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

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

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

Квадрат итогового значения суммарной погрешности Δ определяется в форме

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

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 существующих методов расчета [3].

2.2. 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:

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

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 модель формирования свойств изделия в сквозном технологическом процессе его изготовления. Практически для любого этапа N группы операций могут быть получены соотношения вида:

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

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 снизить размерность решаемых технологических задач.

3. Технологический алгоритм

Распределение уровней свойств в сочетании с определением количественных характеристик возможной трансформации свойств позволяет принципиально изменить существующие подходы к построению технологических процессов [6].

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. 5).

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 [7, 8].

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.

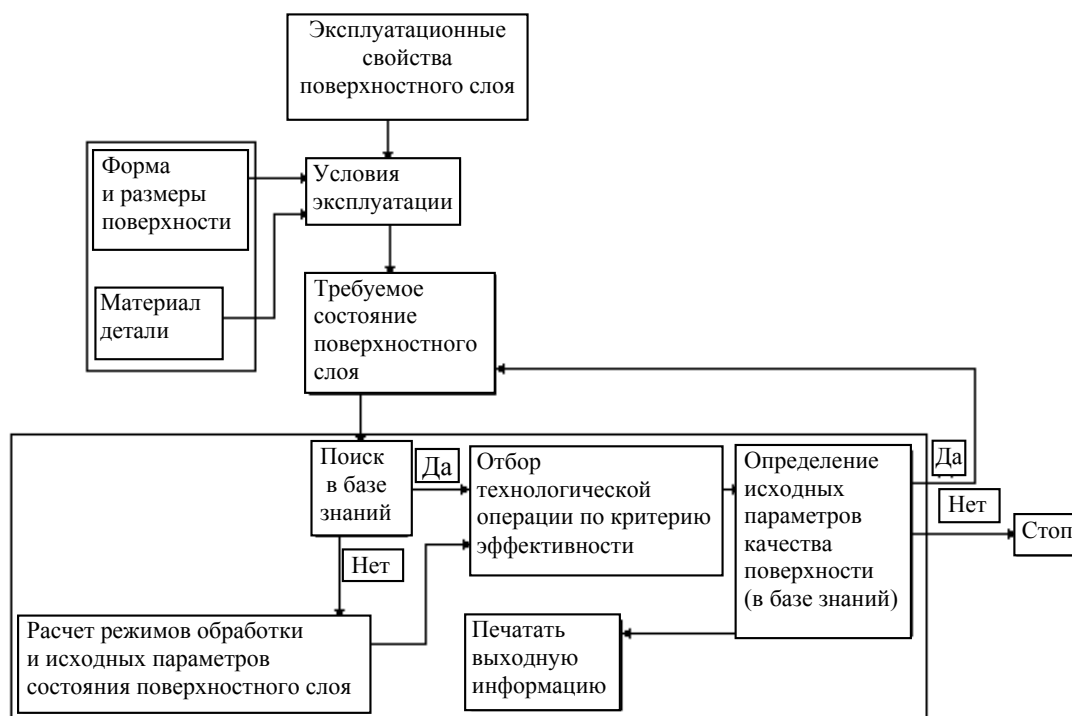


Рис. 5. Технологический алгоритм

Заключение. 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 снижение ее размерности путем выделения множества существенных связей и подавления несущественных 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
2. Кузнецов, Н.Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
3. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
4. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106 – 109.
5. Управление свойствами технологической среды при электрофизической обработке / П.А. Витязь [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 7. – С. 18 – 23.
6. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
7. Рыжов, Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
8. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / под ред. А.Г. Раковича. – Минск: ИТК НАНБ, 1997. – 276 с.

Поступила 25.05.2009