

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАСЛЕДОВАНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА И ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Хейфец М.Л. (Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь),

Тел.: +375 (17) 284-07-75; ф. +375 (17) 284-03-75; E-mail: mlk-z@mail.ru,

Васильев А.С., Кондаков А.И. (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия), E-mail: vas@bmstu.ru

Танович Л. (Белградский университет, Белград, Сербия),

E-mail: ltanovic@mas.bg.ac.rs

Abstract: To describe the technological inheritance of operational properties in the processes of the parts manufacturing by 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 are considered; analysis of technological barriers at the impact of intensive energy flows, development of measures for technological process control were also considered.

Key words: technological inheritance, physical and mechanical parameters of the material quality, the geometric characteristics of the surface.

Введение. Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [1, 2]. Носителями наследственной информации являются 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». Некоторые технологические факторы преодолеть эти «барьеры» не могут и в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие «барьеры» проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [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, процессом технологического и эксплуатационного наследования можно управлять, с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно – ликвидировать в его начале [2, 4].

Многообразие свойств изделий, каждое из которых характеризуется соответствующим множеством показателей качества, является проявлением многосвязности технологических факторов при формировании качества изделия. 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 -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) [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 два вида последствия: первого и второго рода [6]. 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 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 .

Утрата работоспособности узлов трения без последствий. 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 [6], то можно получить условие изнашивания без последствий. 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 $\xi_u = dU/d\tau$ стационарна в период времени τ [6, 7]. Поэтому такой процесс изнашивания 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 интенсивность изнашивания J в эти периоды не является постоянной, а зависит от величин накопленного износа U трущихся поверхностей.

Утрата работоспособности с последствием первого рода. 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 [6, 7]:

- 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 и стохастическим режимами.

Утрата работоспособности с последствием второго рода. Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [6]. В переходный период $[t_0, t_1]$ интенсивность изнашивания 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 статистического анализа 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]. В этой связи их следует рассматривать как релаксационные 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.

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 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 так же стадии эксплуатации [2]. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

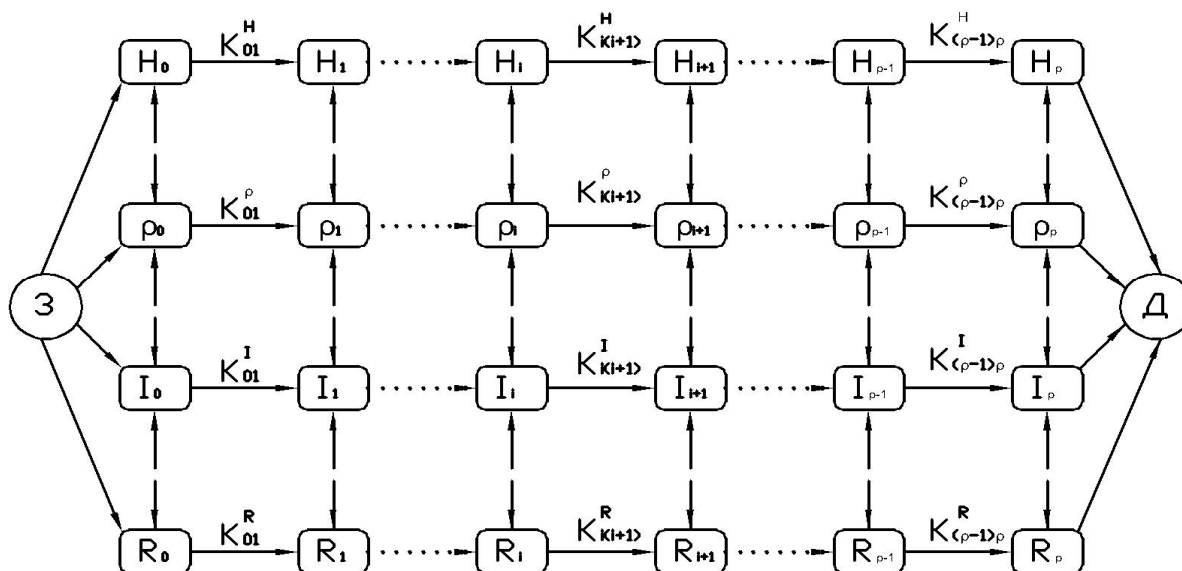


Рис. 1. Развернутый граф технологического и эксплуатационного наследования, учитывающий комплекс показателей качества

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса представляет собой заготовку (З). Конечная вершина – готовая деталь (Д) в эксплуатации. Ориентированные ребра графа показывают передачу эксплуатационных свойств детали при обработке. Передача ребра описывается коэффициентом наследования K , показывающим 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. 2). 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].

Так 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, определяются коэффициентами b , а основные условия обработки внутри этого метода – коэффициентами a . Выполнив преобразования с уравнениями для предшествующих операций $\varphi_{p-1}, \varphi_{p-2}, \dots, \varphi_1$ получают 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 $t_{l1}, t_{l2}, \dots, t_{ln}$ на рассматриваемый параметр качества S_j для операции φ_l и может быть представлен [3]:

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

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

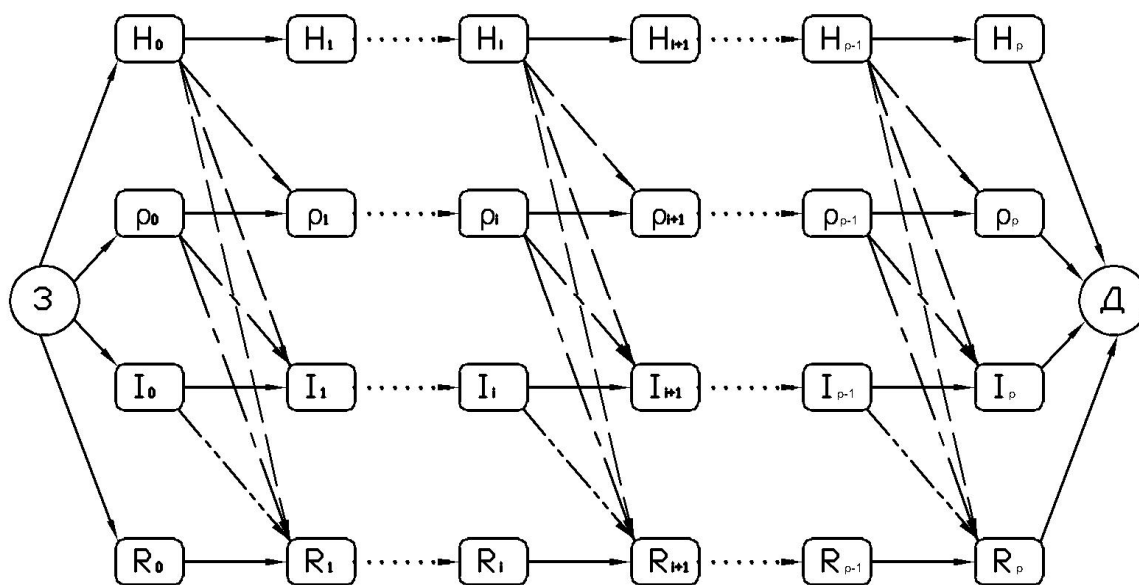


Рис. 2. Граф технологического и эксплуатационного наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических показателей качества

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].

Основные наследуемые показатели качества. Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился АВС – анализ (рис. 3), выделяющий по степени важности группы причин изменения в процессе эксплуатации начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала [5].

АВС – анализ показал, что в большинстве случаев, уже в период приработки (I) существенно меняется 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].

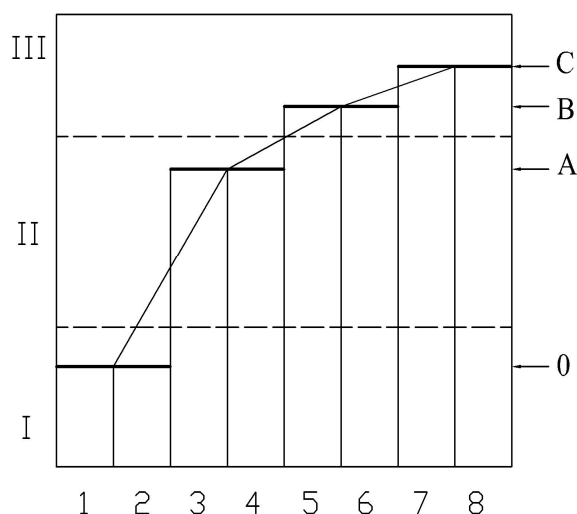


Рис. 3. ABC – анализ изменения в процессе эксплуатации (I-III) начальных показателей качества (1 – 8): (0 -формирование поверхности; А - изменение контактных нагрузок; В - выход детали из строя; С - полное разрушение поверхности; I - приработка; II - нормальное изнашивание; III - катастрофическое изнашивание; 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)

На основании расчетных результатов определялись коэффициенты передачи наследования K^H , K^p , K^I , K^R для графа на рис. 1 и коэффициенты взаимовлияния технологического наследования K^{Hp} , K^{HI} , K^{HR} , K^{pI} , K^{pR} , K^{IR} для графа на рис. 2.

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.

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.

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

Поэтому для изучения наследования выбирались оперативно и наименее трудоемко 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), 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 проводилось для деталей, отвечающих за ресурс изделия [7].

Измерения твердости HRC , отклонений формы ρ , точности размеров ИТ и рельефа поверхности Ra проводились на партии деталей. При этом партия разбивалась на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе.

Воздействия потоками энергии и вещества сообщают обрабатываемой поверхности импульсы, при этом скорость и ускорение их распространения фиксируются на всех участках прохождения импульсов. Так о скорости распространения энергии можно судить по распределению значений параметров упрочнения (рис. 4, кривые 1), а вещества по концентрации легирующих элементов по глубине поверхностного слоя. Величина энергии импульса пропорциональна площади, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис.4, кривые 2). Ускорение, то есть первая производная от скорости, получаемая графическим дифференцированием (рис.4, кривые 3), характеризует величину и положение силы сопротивления проникновению импульса энергии в поверхностный слой.

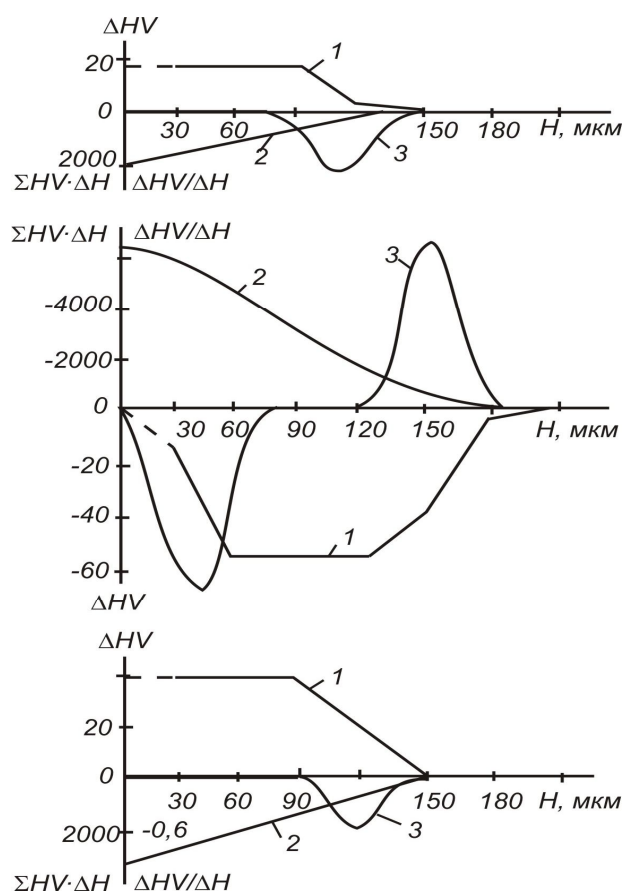


Рис. 4. Зависимости распределения по глубине H поверхностного слоя:
1 – изменений твердости ΔHV ; 2 – общего упрочнения $\Sigma HV \Delta H$; 3 – скорости приращения упрочнения $\Delta HV / \Delta H$; после резания с нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности

Поэтому вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя - $\partial^2(P\tau) / \partial H^2$ можно рассматривать как технологический барьер [8].

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 [8]. Так при упрочнении и разупрочнении барьеры

располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 4,б). При достаточной близости технологических барьеров совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению барьеров и термдеформационному упрочнению по всей глубине комбинированных воздействий (рис. 4,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.

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.

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.

Список литературы: 1. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И.Ящерицын [и др.]. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с. 2. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. 3. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с. 4. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с. 5. Ящерицын, П. И. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества при восстановлении изношенных поверхностей деталей / П.И.Ящерицын, Н.А.Кусакин, М.Л.Хейфец, Г.Б.Премент // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 6. – С. 121–126. 6. Ящерицын, П. И. Работоспособность узлов трения машин / П. И. Ящерицын, Ю.В.Скорынин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с. 7. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / под общ. ред. П.А.Витязя / В.Б.Альгин [и др.]. – Минск: Бел. навука, 2010.- 109с. 8. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л.Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.