

УДК 658. 512: 621. 923



М.Л. Хейфец,
д.т.н., профессор,
Президиум НАН
Беларуси
mlk-z@mail.ru



А.С. Васильев,
д.т.н., профессор,
Московский
государственный
технический
университет им. Н.Э.
Баумана
vas@bmstu.ru



С.А. Клименко,
д.т.н., профессор,
Институт сверхтвердых
материалов им.
В.Н. Бакуля НАН
Украины
atmu@meta.ua



Л. Танович,
д.т.н., профессор,
Белградский
университет
Машиностроительный
факультет
ltanovic@mas.bg.ac.rs

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА
МАТЕРИАЛА И ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ**

М. Л. Хейфец, А. С. Васильев, С. А. Клименко, Л. Танович. Технологическое наследование комплекса эксплуатационных параметров качества материала и поверхности детали Рассмотрены методы технологического управления наследованием эксплуатационных свойств деталей, включающие: измерения 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 по управлению технологическими процессами.

M. L. Kheifetz, A. Vasiliev, S. A. Klimenko, L. Tanovič. Technological inheritance of operational parameters set of the quality of material and the part surface. The methods of technological control of parts operational properties inheritance are reviewed including: measuring the most important details; identifying mechanisms of technological inheritance based on transfer coefficients and mutual influence of operational properties; analysis of technological barriers under intensive effects of flows of energy, arrangement of technological processes controlling measures.

Введение. Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем скажется 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, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов [3, 4].

В технологической цепочке 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]. Самые существенные «барьеры» проявляются на термических операциях, а также на операциях, 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 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].

Материал и результаты исследований. Технологический процесс изготовления и эксплуатации деталей двигателя внутреннего сгорания может быть представлен в виде графа, выделяющего при изготовлении 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).

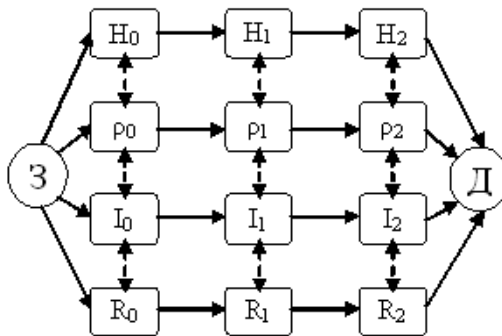


Рис. 1. Развернутый граф технологического наследования, учитывающий комплекс параметров качества

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса и эксплуатации представляет собой заготовку (З). Конечная вершина – готовая деталь (Д) в процессе эксплуатации.

Ориентированные ребра графа показывают передачу свойств детали при обработке и в эксплуатации. 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. 1) при технологическом 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 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 рассматриваемого процесса [3].

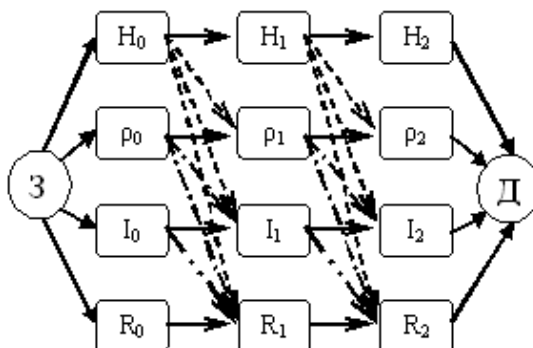


Рис. 2. Граф технологического наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических параметров качества

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса и эксплуатации представляет собой заготовку (З). Конечная вершина – готовая деталь (Д) в процессе эксплуатации. Ориентированные ребра графа показывают передачу свойств детали при обработке и в эксплуатации. 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. 1) при технологическом 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 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 факторов $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ln}\}$ для каждой операции φ_l рассматриваемого 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 факторов $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ln}$ 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.

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 на операции φ_l непреодолимого «технологического барьера» [2, 4].

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился АВС-анализ (рис. 3) изменения в процессе

експлуатації початкових геометричних параметрів поверхності і фізико-механичних характеристик матеріала [5].

АВС-аналіз показав, що в більшості випадків, уже в період прироботки (I) суттєво змінюється шорховатість (1) і структура поверхнювального рельєфу (2). Волнистість (3) і структура поверхнювальних шарів (4) змінюються при установившійся изнашиванні (II). Точність розмірів (5) і геометрична форма поверхності (6) залишаються в межах допустимих значень навіть на початку стадії катастрофічного изнашивання (III). Тільки залишкові напруження (7) і структура основного матеріала (8) можуть зберігатися до повного руйнування трущихся поверхнювальних [6].

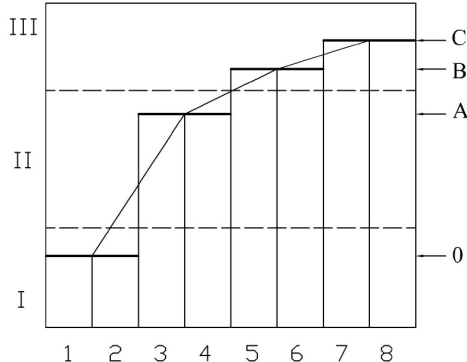


Рис. 3. АВС-аналіз зміни в процесі експлуатації (I – III) початкових показників якості (1 – 8): 0 – формування поверхнювальної;

А – зміна контактних навантажень; В – вихід деталі з строю;

С – повне руйнування поверхнювальної; I – прироботка; II – нормальне изнашивання; III – катастрофічне изнашивання; 1 – шорховатість поверхнювальної; 2 – структура поверхнювального рельєфу; 3 – волнистість поверхнювальної; 4 – структура поверхнювальних шарів; 5 – форма поверхнювальної; 6 – точність розмірів; 7 – залишкові напруження; 8 – структура основного матеріала

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 наследованием предложенным методом контроля параметров качества проводилось для деталей, отвечающих за ресурс в частности для двигателей внутреннего сгорания – гильз блока цилиндров, коленчатых и распределительных валов [7].

Рассматривались технологические процессы изготовления деталей, в том числе использующие последовательность операций комбинированной обработки.

Для описания технологического наследования свойств материала и поверхности гильзы блока цилиндров, коленчатого вала и распределительного вала двигателя рассматривалась совокупность физико-механических и геометрических свойств: твердости (H), отклонений формы (ρ), точности размеров (I) и рельефа поверхности (R). Для этого в качестве определяющего свойства рабочих поверхностей деталей принималась физико-механическая характеристика – твердость по Бринеллю (HB) или по Роквеллу (HRC), так как твердость является одним из наиболее распространенных и общедоступных интегральных критериев оценки свойств материалов, позволяющим судить о прочностных и триботехнических характеристиках материала. В качестве зависимых от твердости параметров последовательно рассматривались отклонения формы поверхностей (ρ), точность размеров (кавалитет IT) и шероховатость поверхности (среднеарифметическое отклонение профиля Ra).

Эксплуатационные параметры качества рабочих поверхностей детали (HB/HRC , ρ , IT и Ra) измерялись после технологических операций механической обработки: точения, шлифования, полирования и после приработки деталей в двигателе.

Измерения твердости HB/HRC , отклонений формы ρ , точности размеров IT и рельефа поверхности Ra проводились на партии из пятидесяти деталей. При этом партия разбивалась по размерам поверхности на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе из пяти деталей. На основании расчетных результатов определялись коэффициенты наследования K^H , K^ρ , K^I , K^R и коэффициенты взаимовлияния технологического наследования $K^{H\rho}$, K^{HI} , K^{HR} , $K^{\rho I}$, $K^{\rho R}$, K^{IR} для графа на рис. 2.

Для оценки наследования по технологическому маршруту рассчитывались результирующие коэффициенты $K\rho$, равные произведению соответствующих коэффициентов для параметров качества по всей последовательности операций. Для определения степени влияния наследования на различных технологических операциях рассчитывались коэффициенты сравнения $Kс$, равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях и стадиях.

Анализ технологического наследования при обработке поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания позволил пересмотреть последовательность технологических переходов, регламентировать технологические воздействия и обеспечить качество рабочих поверхностей.

Изучение последовательности воздействий концентрированными потоками энергии на операциях комбинированной обработки, а также анализ формируемых параметров качества поверхностей сопровождаются исследо-

ванием технологической наследственности образующихся диссипативных структур (рис. 4).

Исследование тепловых и механических воздействий на поверхностный слой показало, что концентрированный нагрев разупрочняет поверхностный слой за счет роста зерна и растворения упрочняющих фаз (рис. 4, б). Глубина фазовых превращений определяется границей распространения теплового потока. Инструмент срезает дефектный слой и упрочняет поверхность деформированием, завальцовывая трещины, поры, измельчая зерно. Проникновение механических воздействий также происходит на определенную глубину (рис. 4, а).

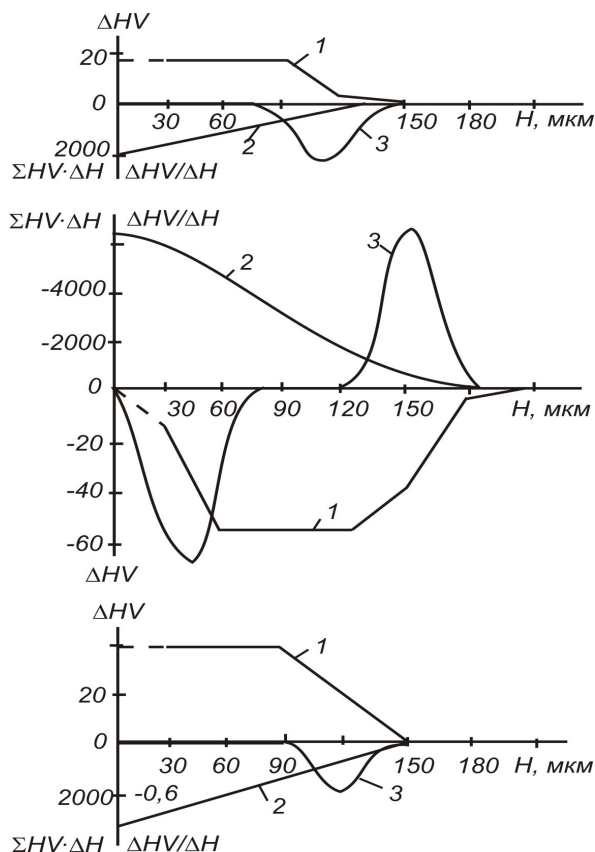


Рис. 4. Зависимости распределения по глубине поверхностного слоя материала: 1 – изменения твердости ΔHV ; 2 – общего упрочнения $\Sigma HV \Delta H$; 3 – скорости приращения упрочнения $\Delta HV / \Delta H$; после резания с нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности

С позиций технологической наследственности, импульс энергии передается обрабатываемой поверхности, а скорость и ускорение распространения энергии отражаются на всех участках прохождения импульса.

О скорости распространения можно судить по распределению значений упрочнения по глубине поверхностного слоя (рис. 4, кривые 1). Величина энергии импульса определяется площадью, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис. 4, кривые 2). Ускорение при прохождении импульса, т.е. первая производную от скорости или вторая от энергии импульса, определяется графическим дифференцированием кривой упрочнения (рис. 4, кривые 3).

Результаты дифференцирования описывают глубину проникновения импульса, следовательно, вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, можно рассматривать как технологический барьер.

Изучение технологических барьеров показывает, что они достаточно точно описываются нормальным законом распределения с различными величинами дисперсий. При упрочнении и разупрочнении барьеры располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 4, кривые 3).

При достаточной близости технологических барьеров 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. В результате совместное действие механических и тепловых потоков приводит к совмещению технологических барьеров и по всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы (рис. 4, в).

Выводы. Технологическое наследование эксплуатационных свойств в процессах изготовления деталей целесообразно описывать графом, отражающим коэффициенты передачи и взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров.

Для расчета коэффициентов наследования по степени значимости влияния установлена последовательность параметров: твердость (H), отклонение формы (ρ), точность размеров (I) и шероховатость рельефа (R) поверхности детали.

Вторую производную от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, следует рассматривать как технологический или эксплуатационный барьер.

Созданы методы технологического управления и контроля наследованием эксплуатационных свойств деталей, включающие:

– измерения физико-механических и геометрических параметров материала и поверхности для наиболее ответственных деталей;

- определение механизмов технологического наследования на основе коэффициентов передачи и взаимовлияния наиболее значимых свойств;
- анализ технологических барьеров при интенсивных воздействиях потоками энергии;
- разработку мероприятий для технологического управления процессами обработки.

Література:

1. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П. И. Ящерицын [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 1996. – 136 с.
2. Васильев, А. С. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев, А. М. Дальский, С. А. Клименко и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
3. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Мн. : 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. – Мн. : Наука и техника, 1984. – 288 с.
7. Лысов, А. А. Управление наследованием показателей качества при восстановлении, обработке, сборке и эксплуатации деталей машин / А. А. Лысов, Н. А. Кусакин, М. Л. Хейфец, Г. Б. Премент // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 4 (105). – С. 30–35.

Надійшла до редакції 08.04.2014