

УДК 658.562: 621.01

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА И РЕНОВАЦИИ ИЗДЕЛИЙ

Хейфец М.Л., Отделение физико-технических наук НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Васильев А.С., Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Клименко С.А., Институт сверхтвердых материалов

им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Танович Л., Белградский университет, Белград, Сербия

Сформированы методы технологического управления наследованием эксплуатационных свойств изделий. Показано, что технологическое наследование свойств целесообразно описывать графом, отражающим передачу и взаимовлияние физико-механических и геометрических параметров качества детали. Предложено при интенсивных воздействиях технологических факторов вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя, рассматривать как технологический барьер.

Введение

Определение рациональных путей управления технологическими факторами, режимами структурообразования материала и формообразования поверхности при обработке, а также стабилизацией параметров материала и поверхности при эксплуатации на основе анализа самоорганизации и наследования физико-механических и геометрических структур и свойств при комплексных технологических воздействиях — крупная проблема обеспечения качества машин.

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 поверхность 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]. Самые существенные «барьеры» проявляются на термических операциях, а также на операциях, сопровождающихся 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 [5, 6].

1 Определение закономерностей наследования свойств материала и поверхности изделия

Технологический процесс изготовления и эксплуатации деталей, а также их восстановления может быть представлен в виде графа, выделяющего при изготовлении и восстановлении заготовительные, черновые операции, чистовые и отделочные операции, а так же стадии эксплуатации [2, 7]. Граф, как правило, является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

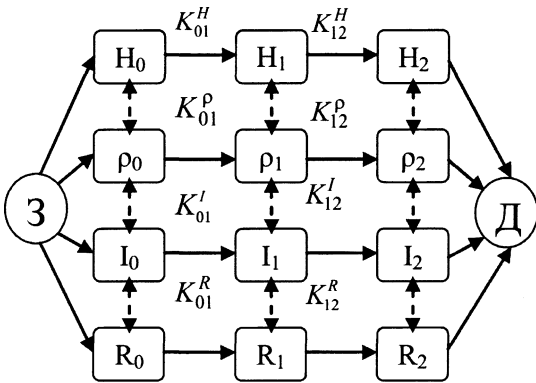


Рис. 1. Развернутый граф технологического наследования, учитывающий комплекс эксплуатационных параметров качества

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, 8]:

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

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, 8].

На вход технологической и эксплуатационной 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 совокуп-

ности технологических или эксплуатационных $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$ факторов для каждой операции ϕ_i , рассматриваемого процесса [3, 7].

Так для параметра качества S после окончательной обработки [2, 6]:

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

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 $\phi_{p-1}, \phi_{p-2}, \dots, \phi_1$ 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_i описывает влияние факторов $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}$ на рассматриваемый параметр качества S_j для операции ϕ_i и может быть представлен [2, 8]:

$$a_i = k_{i0} k_{i1}^{k_{i1}} t_{i2}^{k_{i2}} \dots t_{in}^{k_{in}},$$

где $k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}$ — эмпирические коэффициенты влияния технологических или эксплуатационных факторов.

Анализ зависимостей показывает, что весь процесс может быть выражен в виде суммы действия окончательной операции или стадии 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_i коэффициент технологической наследственности $b_i = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данной операции, что может служить интерпретацией действия на операции ϕ_i непреодолимого «технологического барьера» [2, 3].

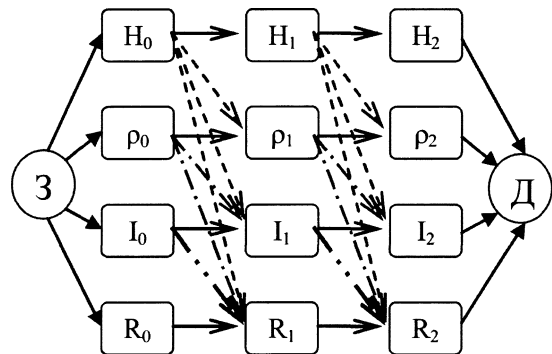


Рис. 2. Граф технологического наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических параметров качества

2 Контроль наследуемых показателей качества материала и поверхности изделия

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом [9], целесообразно проводить ABC-анализ (рис. 3) изменения в процессе эксплуатации начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала [6, 10].

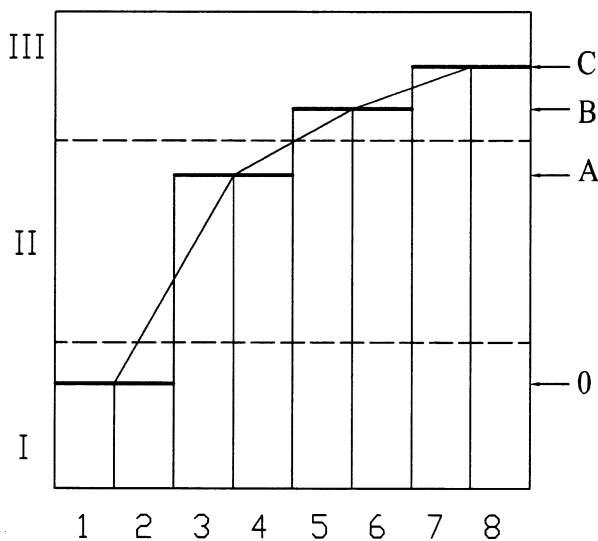


Рис. 3. ABC-анализ изменения в процессе эксплуатации (I – III) начальных показателей качества (1 – 8):

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

ABC-анализ показывает, 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 [5, 10].

Поэтому для изучения наследования выбирались наименее трудоемко контролируемые физико-механические и 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).

3 Исследование процессов передачи показателей качества при наследовании свойств материала и поверхности

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 [11].

Для изучения наследования выбраны оперативно контролируемые физико-механические и геометрические характеристики материала и поверхности деталей.

Рассматривались технологические процессы изготовления и восстановления деталей [12], в том числе использующие последовательность операций комбинированной обработки в ремонтном производстве (табл. 1).

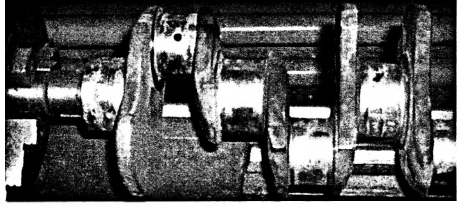
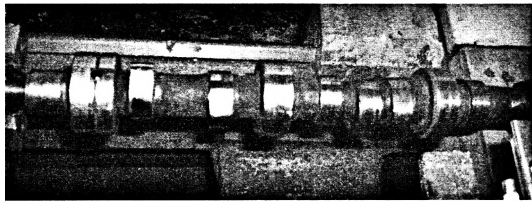
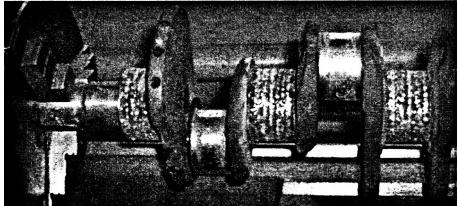
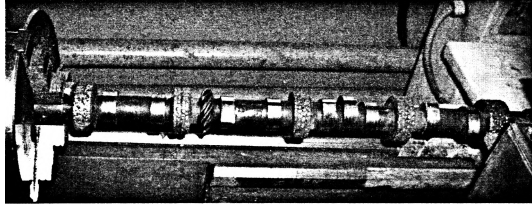
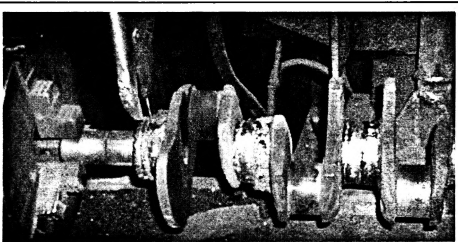
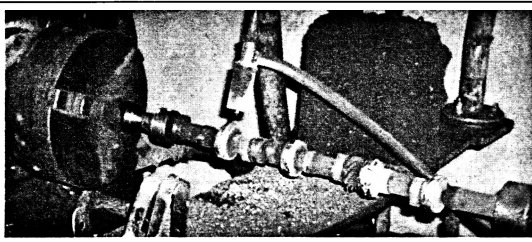
Для описания технологического наследования свойств материала и поверхности гильзы блока цилиндров, коленчатого вала и распределительного вала двигателя рассматривалась совокупность физико-механических и геометрических свойств: твердости (Н), отклонений формы (р), точности размеров (I) и рельефа поверхности (R).

Для этого в качестве определяющего свойства рабочих поверхностей деталей принималась физико-механическая характеристика – твердость по Бринеллю (НВ) 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 (биение р), точность размеров (квалитет IT) и шероховатость поверхности (среднеарифметическое отклонение профиля Ra).

Таблица 1

Технологические операции комбинированного восстановления деталей

Этапы восстановления	Восстанавливаемые детали двигателя	
	коленчатый вал	распределительный вал
Подготовка восстанавливаемых поверхностей		
Нанесение ферромагнитного порошка		
Наплавка углеродистой проволокой	 под слоем флюса	 в среде углекислого газа

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, в соответствии со степенью износа поверхности на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе из пяти деталей. На основании расчетных результатов определялись коэффициенты передачи наследования K^H , K^p , K^I , K^R 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 и стадиям эксплуатации рассчитывались результирующие коэффициенты K_p , равные произведению соответствующих коэффициентов для параметров качества по всей последовательности операций и стадий. Для определения степени влияния наследования на различных тех-

нологических операциях и стадиях эксплуатации рассчитывались коэффициенты сравнения K_c , равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях и стадиях.

Анализ технологического наследования при изготовлении и восстановлении рабочих поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания позволил пересмотреть последовательность технологических переходов (устранить операцию правки), регламентировать технологические воздействия (на операциях металлизации, наплавки, закалки, шлифования) и обеспечить качество восстановления (стабильная твердость и точность рабочих поверхностей).

4 Технологические барьеры при формировании показателей качества изделий

Изучение последовательности воздействий концентрированными потоками энергии на операциях комбинированной обработки, а также анализ формируемых параметров качества поверхностей сопровождаются исследованием технологической наследственности образующихся структур (рис. 4).

Исследования тепловых и механических воздействий на поверхностный слой стальной детали показали, что концентрированный нагрев разупрочняет поверхностный слой за счет роста зерна и растворения упрочняющих карбидных и боридных 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).

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

О скорости распространения импульса 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 производная от скорости или вторая от энергии импульса, определяется графическим дифференцированием кривой упрочнения (рис. 4, кривые 3).

Следовательно, вторую производную от импульса энергии по глубине поверхностного слоя можно рассматривать как барьер, выделяющий условные поверхности раздела слоев с различными структурами [13, 14].

Изучение технологических барьеров показывает, что они достаточно точно описываются нормальным законом распределения с различными величинами дисперсий (рис. 4). 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).

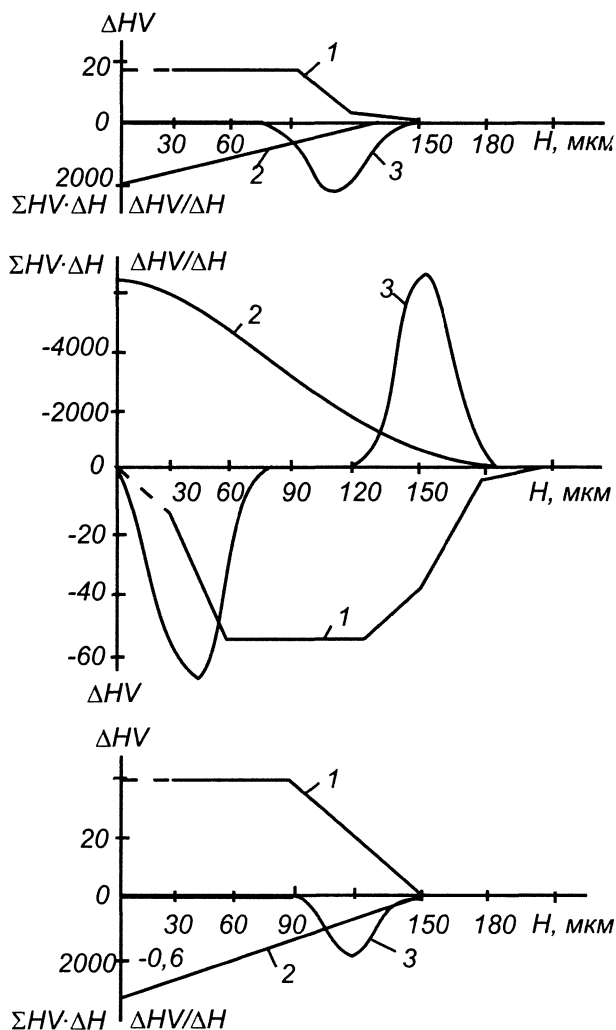


Рис. 4. Зависимости распределения по глубине поверхностного слоя материала: 1- изменения твердости ΔHV ; 2 – общего упрочнения $\Sigma HV \Delta H$; 3 – скорости приращения упрочнения $\Delta HV / \Delta H$; после резания с нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности

Заключение

Таким образом, показано, что технологическое наследование свойств при изготовлении, эксплуатации и восстановлении, целесообразно описывать графом, отражающим коэффициенты передачи и взаимовлияния физико-механических и геометрических параметров качества детали.

Установлена последовательность для расчета коэффициентов наследования по степени значимости влияния параметров: твердость материала, отклонение формы, точность размеров и шероховатость рельефа поверхности детали.

Предложено при интенсивных воздействиях технологических факторов вторую производную

от импульса энергии, характеризующую величину и положение силы, тормозящей поток энергии в поверхностном слое, рассматривать как технологический барьер.

В результате сформированы методы технологического управления 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 технологических мероприятий по управлению процессами обработки и эксплуатации.

Список использованных источников

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. Работоспособность узлов трения машин / П. И. Ящерицын, Ю. В. Скорынин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 288 с.
6. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 109 с.
7. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. – С.106–109.
8. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 4. – С.107–110.
9. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: Экономика и право, 2003. – 224 с.
10. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества при восстановлении изношенных поверхностей деталей / П.И. Ящерицын [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2007. Т. 51, № 6. – С. 121–126.
11. Управление наследованием показателей качества при восстановлении, обработке, сборке и эксплуатации деталей машин / А.А. Лысов [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 4 (105). – С. 30–35.
12. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В.И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
13. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276с.
14. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272с.