

УДК 658.512:612.7:621.9+388.24

*Академик П. И. ЯЩЕРИЦЫН, М. Л. ХЕЙФЕЦ, В. С. ТОЧИЛО, Н. А. КУСАКИН*

### **УПРАВЛЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ СОВМЕЩЕННОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Полоцкий государственный университет,  
Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации*

*Поступило 24.06.2004*

Повышение надежности и долговечности машин и их составных частей — главная цель предприятий, занимающихся разработкой технологий и организацией машиностроительного производства. Обеспечить высокое качество машин в процессе освоения технологий и организации производства можно за счет внедрения новых методов упрочнения и обработки деталей, сварки и сборки узлов машин и текущего контроля на технологических операциях [1—3].

В этой связи предприятию прежде всего требуется определить процессы производства и обслуживания, результаты которых не могут быть проверены с помощью последующего мониторинга и измерений. К ним относятся процессы, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции или после предоставления услуги. Поэтому предприятие должно определить перечень специальных процессов [4], установить методы их оценки с точки зрения достижения планируемых результатов путем определения критериев, требований к оборудованию и персоналу, методики подтверждения качества и управления специальными процессами, используя специализированные методы измерения и контроля, формы и порядок регистрации параметров качества [5].

Специальные процессы условно можно разделить на две категории, относящиеся к производству (сварка, наплавка, нанесение покрытий, термомеханическая и другая обработка) и относящиеся к контролю и испытаниям (бесконтактный контроль физико-механических характеристик, испытания на износостойкость, обкатка, испытательный пробег и т. п.) [6].

Внедрение управления качеством предполагает эффективное использование статистических методов контроля, наиболее широкое применение среди которых нашли: контрольный листок, гистограмма, диаграмма рассеяния (поле корреляции), расслоение (стратификация), диаграммы Парето и «причины — результат», контрольная карта, а также применения планов выборок и контроля, сравнений и предпочтений факторов, корреляции их рангов, дисперсии оценок, регрессии параметров и критериев их комплексного оценивания [7, 8].

Однако использование традиционных методов контроля для управления специальными многофакторными процессами не эффективно вследствие особой сложности взаимосвязей технологических факторов и эксплуатационных параметров в процессах, совмещающих в одном методе обработки различные технологические операции, а в рамках операции комбинацию разнообразных технологических воздействий [9].

Для изучения путей управления специальными процессами на первом этапе была рассмотрена совмещенная обработка — нанесение покрытия с его поверхностным деформированием [10], у которой, чередуя материалы наносимого покрытия, последовательно сокращалось сначала число контролируемых параметров, а затем технологических факторов, чтобы предложить схему управления комплексом основных параметров совмещенной обработки, используя наиболее значимые и наименее взаимосвязанные факторы [3, 6, 9].

На втором этапе было исследовано управление комбинированной упрочняюще-размерной обработкой наплавленного покрытия [11], для которой при разнообразных технологиях предварительного нанесения различных материалов обрабатываемого покрытия, последовательно сокращалось число технологических факторов, чтобы предложить схему управления комплексом параметров комбинированной обработки [3, 6, 9].

На заключительном этапе были проанализированы взаимосвязи контролируемых параметров и регулируемых факторов на схемах управления и предложена методика управления специальными процессами совмещенной и комбинированной обработки.

Для анализа управления технологическим процессом совмещенной обработки была рассмотрена электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием [10], обеспечивающая не только формирование поверхности детали с улучшенными геометрическими параметрами, но и упрочнение поверхностного слоя, повышение его физико-механических характеристик [12].

Изучались зависимости регламентируемых параметров электромагнитной наплавки ферропорошков  $FeV$ ,  $FeTi$  и  $P6M5K5$  с поверхностным пластическим деформированием (рис. 1):

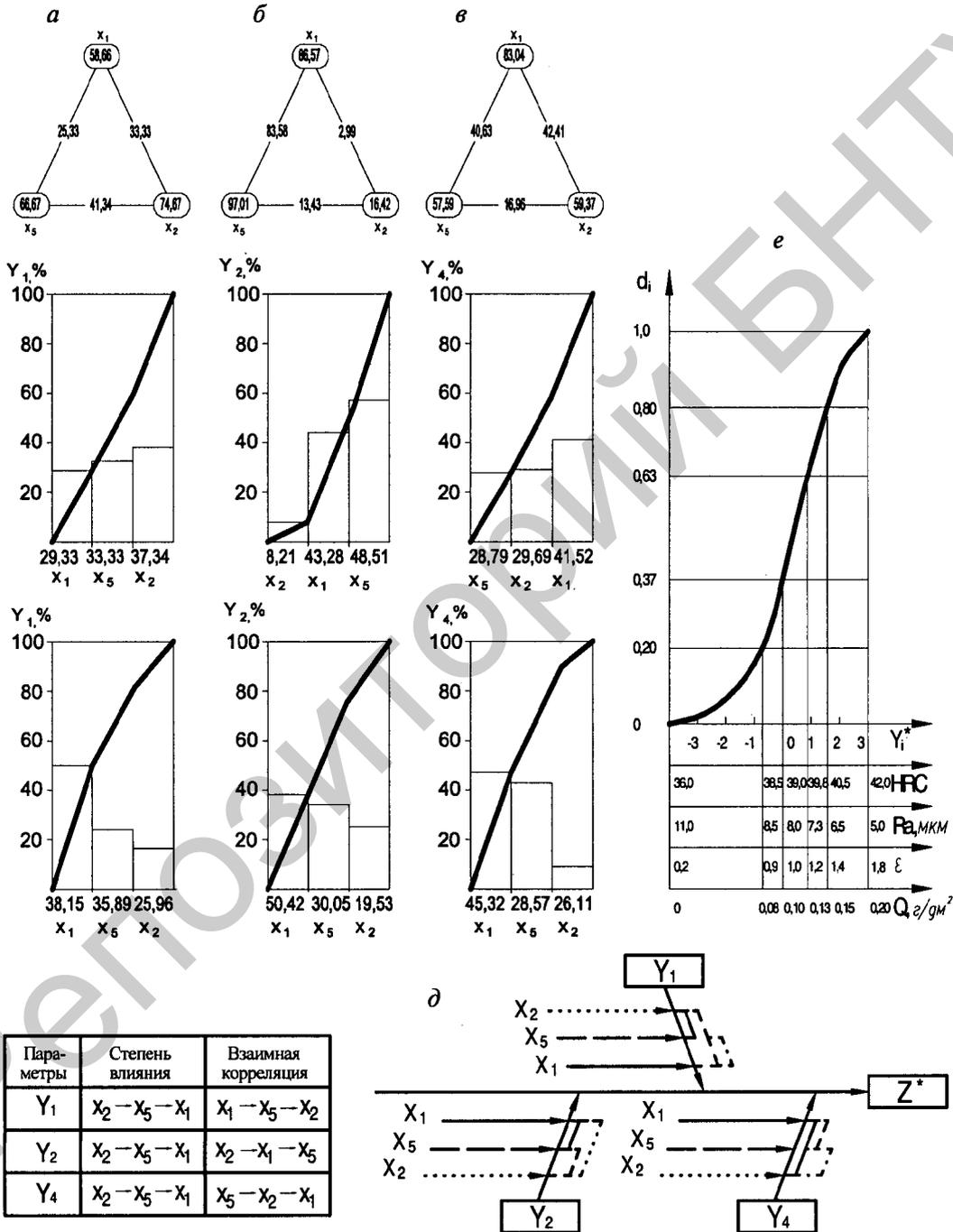


Рис. 1. Управление специальным процессом наплавки упрочняющего покрытия ферропорошком  $FeTi$  совмещенной с поверхностным деформированием по комплексу параметров: HRC (а), Ra (б), Q (в), с учетом влияния и взаимосвязи факторов (г) на диаграмме «причины-результат» (д) по обобщенной функции желательности (е)

физико-механического  $Y_1 = HRC$  — твердости, геометрического  $Y_2 = Ra$  мкм — шероховатости, эксплуатационного  $Y_3 = \epsilon$  — относительной износостойкости и производительности нанесения покрытия  $Y_4 = Q$  г/дм<sup>2</sup> от основных технологических факторов электромагнитной обработки: силы разрядного тока  $X_1 = I$ , магнитной индукции в рабочем зазоре  $X_2 = B$  и совмещенной механической обработки: подачи инструмента  $X_3 = S$ , скорости вращения детали  $X_4 = V$  и усилия деформирования  $X_5 = P$ .

Для анализа управления комбинированной обработкой было рассмотрено упрочняющее ротационное резание с нагревом — оплавлением срезаемого слоя предварительно нанесенного износостойкого покрытия [11], используемое после восстановления деталей напылением и наплавкой, совмещающее операции термообработки покрытий с удалением дефектного поверхностного слоя резанием и упрочняющим деформированием обрабатываемой поверхности [13]. Для временного снижения прочности дефектного слоя покрытий используется дополнительный нагрев или технологическое тепло наплавки, а для удаления припуска и деформирования поверхности применяется ротационный инструмент.

Изучались зависимости регламентируемых параметров упрочняюще-размерной ротационной обработки плазменной наплавки хромоникелевым порошком ПГ-СР4, газопламенной наплавки порошком ПГ-10Н-01 и вибродуговой наплавки проволокой Нп-65Г с плазменным нагревом (рис. 2): физико-механических  $Y_1 = HRC$  — твердости и  $Y_2 = U_n\%$  — поверхностного наклепа, геометрических  $Y_3 = Sm_w$  — волнистости и  $Y_4 = Ra$ , мкм — шероховатости, производительности инструмента  $Y_5 = K$  — определяемой отношением скорости дополнительного  $V_r$  и главного  $V$  движения ротационного резца от основных технологических факторов:  $X_1 = I$  — силы тока плазменной дуги,  $X_2 = L$  — расстояние от пятна нагрева до режущей кромки инструмента,  $X_3 = S$  — скорости подачи инструмента,  $X_4 = V$  — скорости главного движения и  $X_5 = t$  — глубины резания.

Диаграммы рассеяния контролируемых параметров  $Y_1, \dots, Y_4, \dots, Y_n$  совмещенной и комбинированной обработки показали отсутствие их линейной корреляции с технологическими факторами  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$ , а результаты расслоения гистограмм  $Y_1, \dots, Y_k, \dots, Y_n$ , по факторам не позволили существенно снизить дисперсию, что указало на тесную взаимосвязь  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$ . Поэтому в качестве статистической модели обработки применялись квадратичные функции, а для их построения и оценивания использовали дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ.

Квадратичные уравнения

$$Y_i = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i + \sum_{i,j=1}^m b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} X_i^2,$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  — коэффициенты регрессии, получали с помощью математического планирования экспериментов, для которого вследствие существенной нелинейности параметров и тесной корреляции факторов применяли центральный композиционный рототабельный униформ-план второго порядка [6, 9]. Значимость коэффициентов регрессии определяли по критерию Стьюдента, а адекватность модели оценивали по критерию Фишера.

Изучение коэффициентов  $b_{ij}$ , описывающих взаимодействие факторов  $X_i X_j$  на многоугольниках предпочтений дало возможность определить значимость взаимной корреляции факторов по диаграммам Лоренца, в которых  $X_i X_j$  ранжируются в порядке возрастания, а их значения, в отличие от многоугольников, разделены на 2 (чтобы в сумме получить 100%). Анализ линейных коэффициентов  $b_i$  (а также нелинейных  $b_{ii}$ ), полученных математических моделей по диаграммам Парето, в которых  $X_i$  (а также  $X_i^2$ ) ранжируются в порядке убывания, позволил выявить степень влияния факторов на исследуемые параметры (рис. 1, а—в; 2, а—д).

Для различных параметров  $Y_1, \dots, Y_k, \dots, Y_n$  с учетом степени влияния и значимости взаимной корреляции, факторы  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$  в порядке предпочтения ( $\rightarrow$ ) или при его отсутствии ( $=$ ) располагались в ряды (рис. 1, г; 2, е).

Так как для управления параметрами  $Y_k$  (в различных строках на рис. 1, г; 2, е) целесообразно использовать наиболее влиятельные и наименее коррелированные с другими факторами, то выбирались такие  $X_i$  (из разных столбцов рис. 1, г; 2, е), расстояние между которыми минимально.

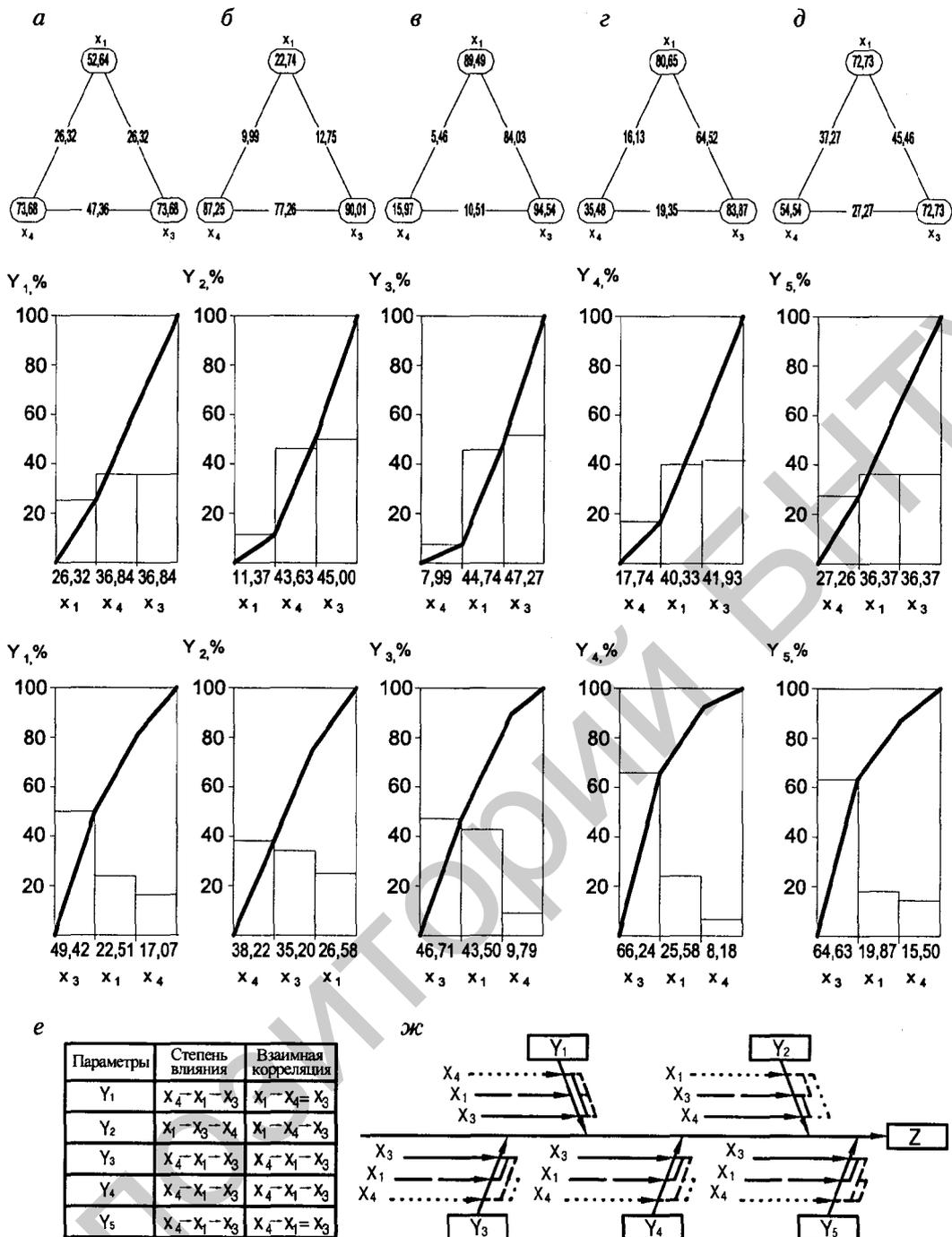


Рис. 2. Управление специальным процессом комбинированной упрочняюще-размерной термомеханической обработки износостойкого покрытия порошком ПГ-10Н-01 по комплексу параметров: HRC (а),  $U_H$  (б),  $Sm_w$  (в), Ra (г), K (д), с учетом влияния и взаимосвязи факторов (е) на диаграмме «причины—результат» (ж)

Для комплексной оптимизации параметров качества и управления технологическим процессом применяли диаграмму «причины — результат» (рис. 1, д; 2, ж), для которой в качестве цели рассматривали обобщенную функцию желательности Харрингтона [6, 9]

$$Z = \sqrt[n]{d_1 \dots d_k \dots d_n}$$

где  $d_k = \exp[-\exp(-Y_k)]$ .

Для желательностей  $d_k$  предлагали шкалы (см. рис. 1, е), составленные исходя из значимости параметров  $Y_k$ , и рассмотренных на диаграмме «причины — результат» возможностей их регулирования технологическими факторами  $X_i$ .

На диаграммах (рис. 1, д; 2, ж) в качестве главных причин указывались параметры  $Y_k$ , которые в свою очередь обусловлены факторами  $X_i$ . Для каждой причины в порядке значимости согласно диаграммам Парето выделялись три первоочередных фактора и в соответствии с многоугольниками предпочтений указывались три основные взаимосвязи факторов.

Согласно ранжированию параметров определяли регулируемые диапазоны на шкалах желательностей (см. рис. 1, е). Комплексную оптимизацию многофакторного технологического процесса, представленного уравнениями квадратичной регрессии, проводили методом спирального координатного спуска [6, 9] по обобщенной функции желательности  $Z$ , и сравнивали ее с результатами оптимизации отдельных параметров  $Y_k$ .

По результатам оптимизации параметров, с учетом анализа диаграмм «причины — результат» сокращали число контролируемых параметров, исключая наиболее коррелированные, и количество регулируемых факторов, не рассматривая наименее влиятельные из них (рис. 1, д; 2, ж).

Сравнивая диаграммы управления при последовательном снижении числа параметров для совмещенной обработки (рис. 1, д) с диаграммами при последовательном сокращении числа управляющих факторов для комбинированной обработки (рис. 2, е), учитывая связи в технологической системе, можно сделать выводы о принципиальных различиях и сходстве в управлении специальными процессами, формирующими в первую очередь физико-механические (см. рис. 1) или геометрические (рис. 2) параметры качества, а затем оставшийся комплекс эксплуатационных свойств [14, 15].

1. При совмещенной обработке прослеживается строгая иерархия технологических воздействий, так при электромагнитной наплавке с поверхностным деформированием от термоэлектрических, через механические к электромагнитным их влияние падает. Это становится заметным (см. рис. 1, д), при исключении из рассмотрения взаимовлияния воздействий через факторы, определяющие производительность обработки ( $V$  и  $S$ ). Комбинированная обработка демонстрирует, как например при ротационном резании с нагревом, тесную взаимосвязь термоэлектрических и механотермических воздействий. Только исключая влияние масштабных факторов ( $t$  и  $L$ ), можно выделить (рис. 2, ж) иерархию минимального числа термомеханических воздействий.

2. В технологической системе с взаимозависимостями физико-механических ( $HRC$ ) и геометрических ( $Ra$ ) параметров через стабилизацию процесса ( $Q$ ), взаимосвязи факторов чередуются. Для определяющих факторов ( $I$ ,  $P$ ,  $B$ ), при анализе комплекса главных параметров, наблюдаются различные комбинации их взаимосвязей (рис. 1, д). В системе с взаимозависимостями геометрических ( $Ra$  и  $Sm_w$ ) и физико-механических ( $HRC$  и  $U_n$ ) параметров качества через интенсивность процесса ( $K$ ), взаимосвязи факторов повторяются для различных параметров, с учетом поправок на обрабатываемый материал. Наиболее заметно это проявляется для минимального количества факторов ( $S$ ,  $I$ ,  $V$ ) при оценке ограниченного числа параметров (рис. 2, ж).

3. При нанесении упрочняющих покрытий электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием целесообразно следить за устойчивостью процесса ( $Q$ ) и проводить экспресс-оценку твердости покрытия ( $HRC$ ), а контроль физико-механических ( $U_n$ ), геометрических ( $Ra$ ) и эксплуатационных ( $\epsilon$ ) параметров качества осуществлять после совмещенной обработки. При ротационном упрочняющем резанием износостойких покрытий с предварительным плазменным нагревом рекомендуется наблюдать за работой инструмента ( $K$ ), осуществлять экспресс-оценку рельефа поверхности ( $Sm_w$ ) и твердости покрытия ( $HRC$ ), а контроль геометрических ( $Ra$ ) и физико-механических ( $U_n$ ) параметров проводить после комбинированной обработки.

4. Для стабилизации процесса управление совмещенной термомеханической обработкой в электромагнитном поле при формировании структуры материала с обеспечением рельефа поверхности целесообразно проводить, используя последовательность факторов, обеспечивающих интенсивность ( $I - P - B$ ) и производительность обработки ( $S - V$ ). Для повышения эффективности обработки управление комбинированным плазменно-механическим процессом при формообразовании рельефа поверхности с модифицированием поверхностного слоя следует осуществлять путем регулирования производительности ( $S - I - V$ ), применяя масштабные факторы ( $L - t$ ).

5. Проведенные на производстве исследования процессов и испытания после сварки и восстановления деталей наплавкой, при совмещении нанесения покрытий с упрочняющим

деформированием, при комбинировании упрочняющей и размерной обработки резанием, позволили выработать рекомендации по управлению специальными процессами и техническому контролю на ремонтном предприятии, что позволило снизить на 20–40% число рекламаций на продукцию, производственным рабочим перейти на самоконтроль и сократить в 2 раза списочную численность контролеров в цеху.

### Литература

1. Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин. М., 1990.
2. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. М., 1993.
3. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
4. СТБ ИСО 9001-2001 Системы менеджмента качества. Требования. Мн., 2001.
5. Суслев А. Г., Горленко О. А. Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин. М., 2003.
6. Хейфец М. Л., Точило В. С., Семенов В. И. и др. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин. Новополоцк, 2001.
7. Исикава К. Японские методы управления качеством. М., 1988.
8. Миттаг Х-Й., Ринке Х. Статистические методы обеспечения качества. М., 1995.
9. Корешков В. Н., Кусакин Н. А., Мрочек Ж. А., Хейфец М. Л. Менеджмент качества предприятий машиностроения. Мн., 2003.
10. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1993. Т.37, № 4. С. 114–117.
11. Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Попок Н. Н., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1992. Т. 36, № 5. С. 429–432.
12. Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Филонов И. П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. Мн., 2000.
13. Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А., Хейфец М. Л. и др. Обработка износостойких покрытий. Мн., 1997.
14. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41, № 3. С. 121–127.
15. Ящерицын П. И., Хейфец М. Л., Зевелева Е. З., Акулович Л. М. // Докл. НАН Беларуси. 2003. Т. 47, № 6. С. 120–124.

*YASHCHERITSYN P. I., KHEIFETZ M. L., TOCHILO V. S., KOUSAKIN N. A.*

### MANAGEMENT OF SPECIAL PROCESSES OF COMBINED TREATMENT OF MACHINE PARTS

#### Summary

The sequence of the technological impact for managing special processes is recommended. The sequence includes the intensity of energy sources, productivity of equipment and scope factors.