

МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТРИЦЫ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ

С.В. Усов¹, д-р техн. наук

А.В. Жданов², канд. техн. наук

А.Н. Митрофанов², магистр

И.П. Точилин³, бакалавр

¹Московский лазерный технологический центр

²Владимирский государственный университет им. Столетовых

³Высшая школа экономики

^{1,3}(Россия, г. Москва)

²(Россия, г. Владимир)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-12-5-57-71

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению аспектов изменения металлофизических параметров поверхностного слоя (микротвердости, эпюры напряжений поверхностного слоя, шероховатости, величины поверхностного слоя), которые формируются в результате применения комбинированных методов. Расчетные режимы комбинированных методов напрямую зависят от выбранных подходов идентификации теоретических выкладок. Введение матрицы внешних воздействий позволяет обобщенно рассматривать любые сочетания комбинированных методов идентифицируя конкретные их оптимальные сочетания по идентификатору внешних воздействий. Приводятся конкретные примеры построения комбинированных воздействий с последующей металлофизической оценкой спроектированных режимов комбинированных методов.

Ключевые слова: мультипликативная методика комбинированные методы, металлофизические исследования, долговечность, проектирование, матрица внешнего воздействия.

Возможности цифровых интеллектуальных технологий зачастую лимитируются сходимостью информационных потоков на бумажных носителях. Корректность результатов при проектировании комбинированных методов с использованием математического аппарата фазовых пространств напрямую зависит от вводимых начальных условий при формализации матриц внешнего воздействия, матрицы объекта, матрицы условий эксплуатации. Комбинированные технологические методы обладают широким спектром возможностей видоизменять металлофизические показатели поверхности деталей машин. К наиболее важным металлофизическим параметрам поверхности, определяющими работоспособность деталей машин, можно отнести: структуру поверхностного слоя; фазовый и химический состав; эпюру напряжений; распределение микротвердо-

сти; глубину поверхностного слоя; шероховатость. Параллельно-последовательное комбинирование создает уникальные возможности по достижению оптимальных сочетаний комбинированных методов на основе энергетических воздействий. При этом последующие металлофизические исследования обеспечивают оптимизацию теоретических выкладок с целью достижения наилучших режимных сочетаний методов. Именно обобщениям исследований металлофизическим аспектам применения комбинированных методов посвящена данная статья. В настоящее время в России и за рубежом наряду с внедрением новых видов материалов и конструкций современных машин проводится интенсивный поиск методик по созданию интеллектуальных технологических методов, коренное усовершенствование существующих. В ряду этих методов находят применение

электрофизические, электрохимические, магнитные, а также основанные на физико-химических явлениях, энергии взрыва, электрогидравлического эффекта, действии электронного, лазерного луча и др. Поиск «стыковых» эффектов выявил целесообразность использования этих методов в сочетании с традиционно существующими формообразующими и упрочняющими. Построенные сочетания позволяют достичь принципиально новых технологических результатов, повысить долговечность и надежность машин и механизмов, качество изделий, производительность технологических методов. За рубежом развитие направления по оптимальному интеллектуальному выбору сочетаний методов находит широкое научно-производственное применение.

Мультипликативная методика идентификации матрицы внешнего воздействия при проектировании комбинированных методов

Излагаемый ниже методический интеллектуальный подход базируется на рассмотрении энергетического взаимодействия потоков энергии с твердым телом; определяются минимальные и максимальные значения остаточных напряжений, поставленные в соответствие распределению, аппроксимируемому законом гиперболического тангенса [1]. Критериальная оценка сформированных сочетаний воздействий осуществляется посредством использования стандартных и вновь построенных моделей [2] для определения долго-

вечности функционирования деталей в условиях ударно-абразивного, ударно-усталостного, термоэрозионного, эрозионно-механического изнашивания, циклического знакопеременного нагружения. Входом в рассматриваемые модели эксплуатации деталей машин являются полученные распределения [3] значений остаточных внутренних напряжений по глубине поверхностного слоя, поставленные при этом в соответствие определенному набору параметров матрицы с оценкой последних. При этом выбранное сочетание воздействий определяется максимальным значением ограниченной долговечности с учетом построенного модельного аппарата [4]. В дальнейшем осуществляется пересчет режимов образованных комбинированных сочетаний, расчет электродов-инструментов [5]. В результате использования рассмотренного комплекса моделей (становится, возможно формировать необходимый набор комбинированных электротехнологических методов, формирующих требуемый уровень долговечности при точности расчетов 10...15% (рис. 1). Выполнение соответствующего порядка действий при использовании созданного аппарата реализуется в рамках приводимого обобщенного примера интеллектуального проектирования комбинированных методов с использованием мультипликативной методики [6]. Для выполнения приводимых расчетов разработан алгоритм формирования мультипликативных комбинированных методов (рис. 2).

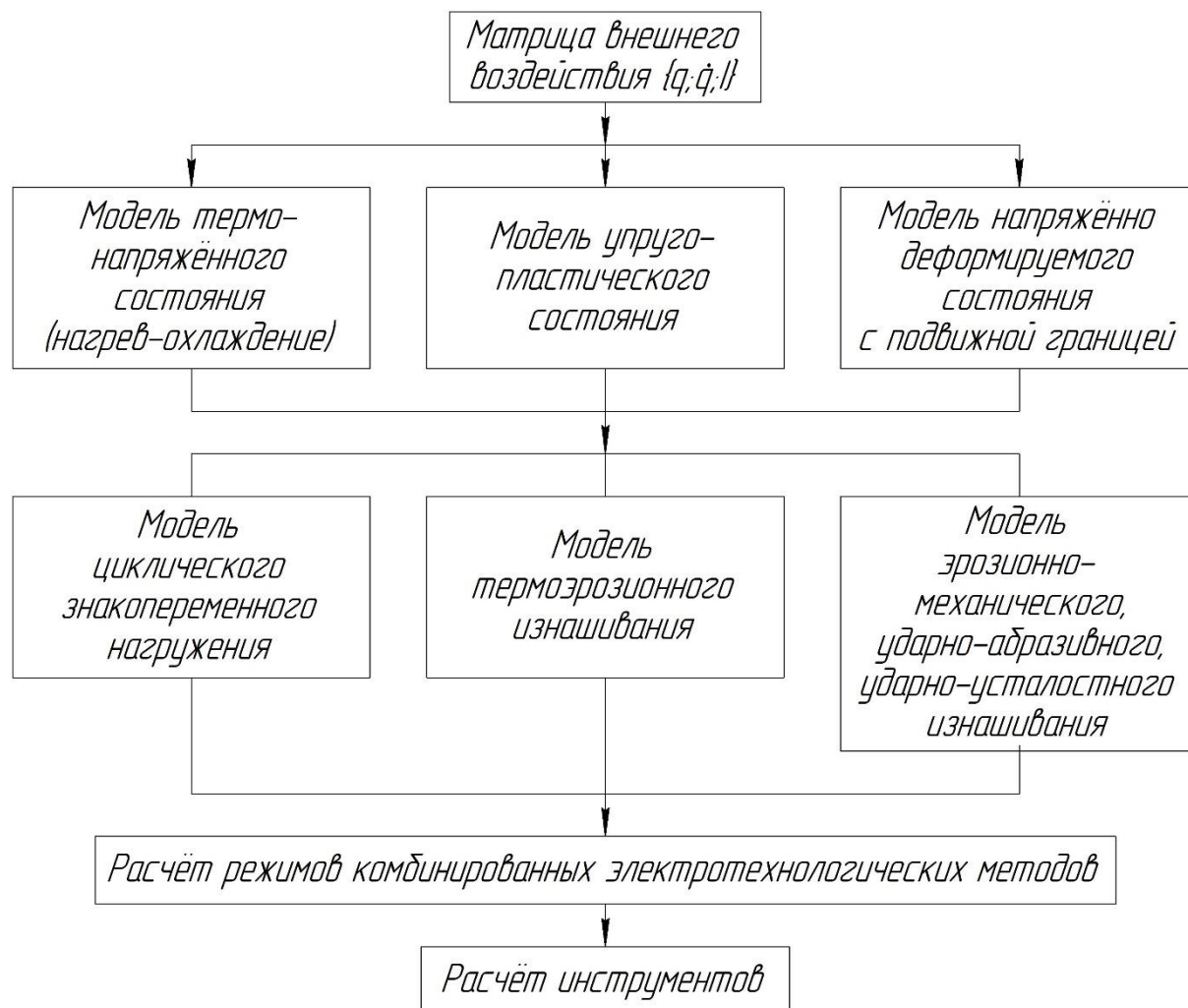


Рис. 1. Схема последовательности использования разработанного модельного аппарата при проектировании комбинированных методов

Для выполнения приводимых расчетов [7] разработан алгоритм формирования мультипликативных комбинированных методов (рис. 2). Ниже представлено поблочное описание, представленное на рисунке 2.

Блок I. Ввод исходных данных:

- требуемый критерий эксплуатации $Dэ$.
- параметры качества реального объема;
- диапазоны изменения параметров матрицы воздействия.

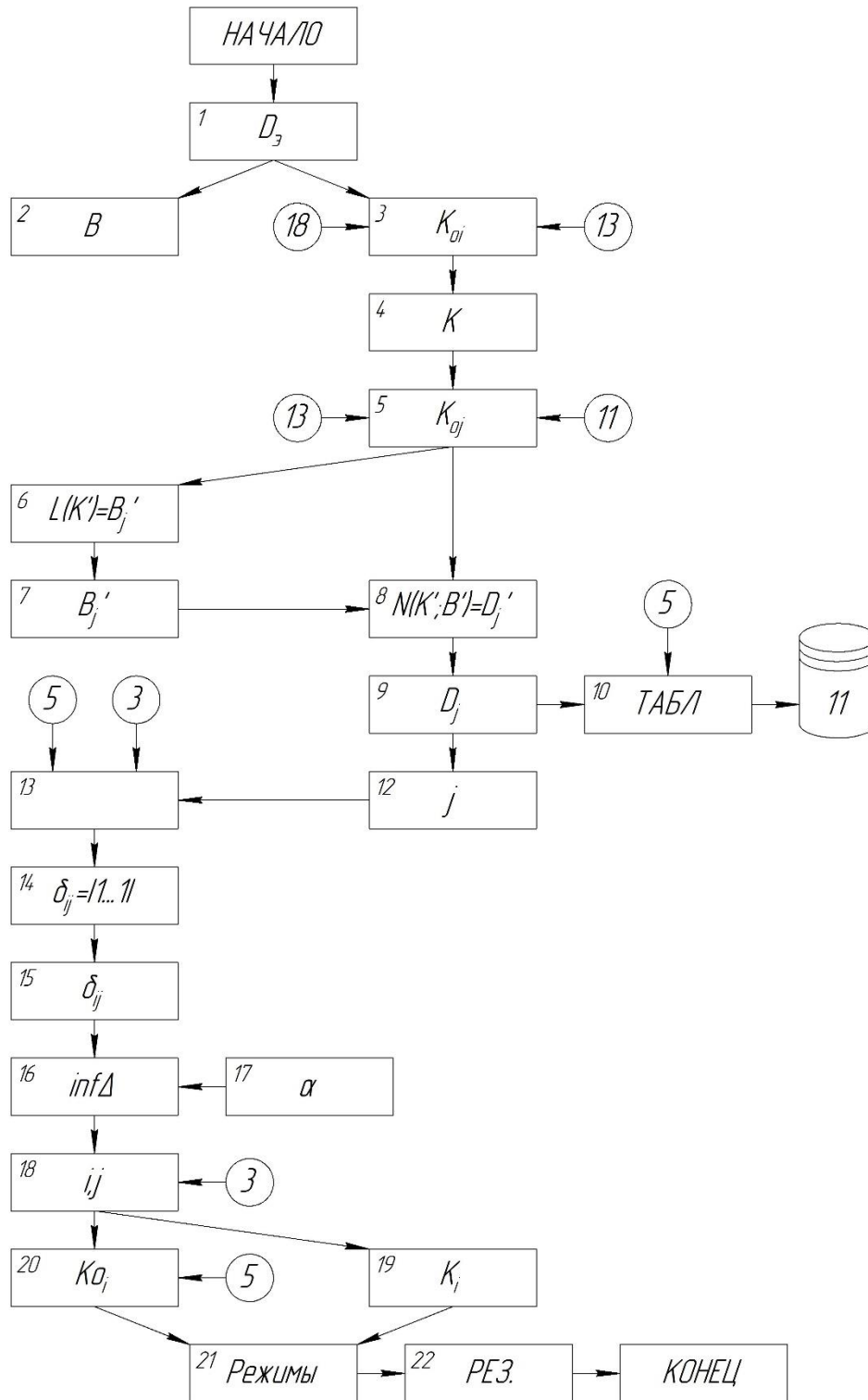


Рис. 2. Алгоритм расчета и проектирования комбинированных методов

o_i K по выбранному кругу реальных методов и эксплуатационных нагрузок (рис. 2).

Блок 2. Формирование матрицы параметров качества объекта по исходным данным.

Блок 3. Формирование по исходным данным матрицы реального воздействия o_i

K от каждого метода и эксплуатационных нагрузок

Блок 4. Определение фазового пространства воздействия по наибольшим значениям B (Бл. 3).

Блок 5. Формирование расчетных матриц воздействия путем дискретизации

(ФПВ – фазовое пространство воздействий) (Бл. 4).

Блок 6. Решение обобщенной задачи, моделирующей воздействие. J – опт. набор воздействий и параметров качества.

Блок 7. Результат работы. Бл. 6 – сформированная расчетная часть. (ФПО – фазовое пространство объектов)

Блок 8. Решение обобщенной задачи, моделирующей эксплуатацию:

$$N(B'_j; K'_j) = D_j \quad (1)$$

Блок 9. Результат работы (Бл. 6) – массив значений D_{ij} – расчетных значений критерия эксплуатации, соответствующих каждому расчетному набору параметров матрицы K_j .

Блок 10. Отображение (Бл.9). Бл10 – хранение таблицы.

Блок 11. Проверка массива значения D , по условию $< \varepsilon$, где D_ε – критерии эксплуатации.

Блок 12. Фиксация номеров j -го параметра D_j удовлетворяющих условию (Бл. 11).

Блок 13. Выбор j -го номера матрицы по Бл.11.

Блок 14. Расчет погрешности идентификации по выбранным в Бл.13 и каждому.

Блок 15. Формирование экстремальной задачи δ_{ij} .

Блок 16. Решение экстремальной задачи: $\inf \Delta(\delta_{ij}) \delta_{ij} \in \text{ФПВф}$

Блок 17. Введение погрешности идентификации α .

Блок 18. Фиксация номеров i, j значений δ_{ij} по результату работы Бл.16.

Блок 19. Выбор i -го реального метода с соответствующей матрицей K_i (по номеру Бл. 18).

Блок 20. Выбор, i -го расчетного метода с соответствующей матрицей (по номеру Бл. 18).

Блок 21. Теоретико-экспериментальный расчет режимов j -го комбинированного метода по уточненному расчетному набору K'_j .

Блок 22. Отображение результатов: выбранный метод и его режимы.

<p>Обобщенный проектирования методов с идентификационной матрицы параметров воздействия</p>	<p>с применением методики внешнего</p>	<p>пример комбинированных методик внешнего</p>
--	---	---

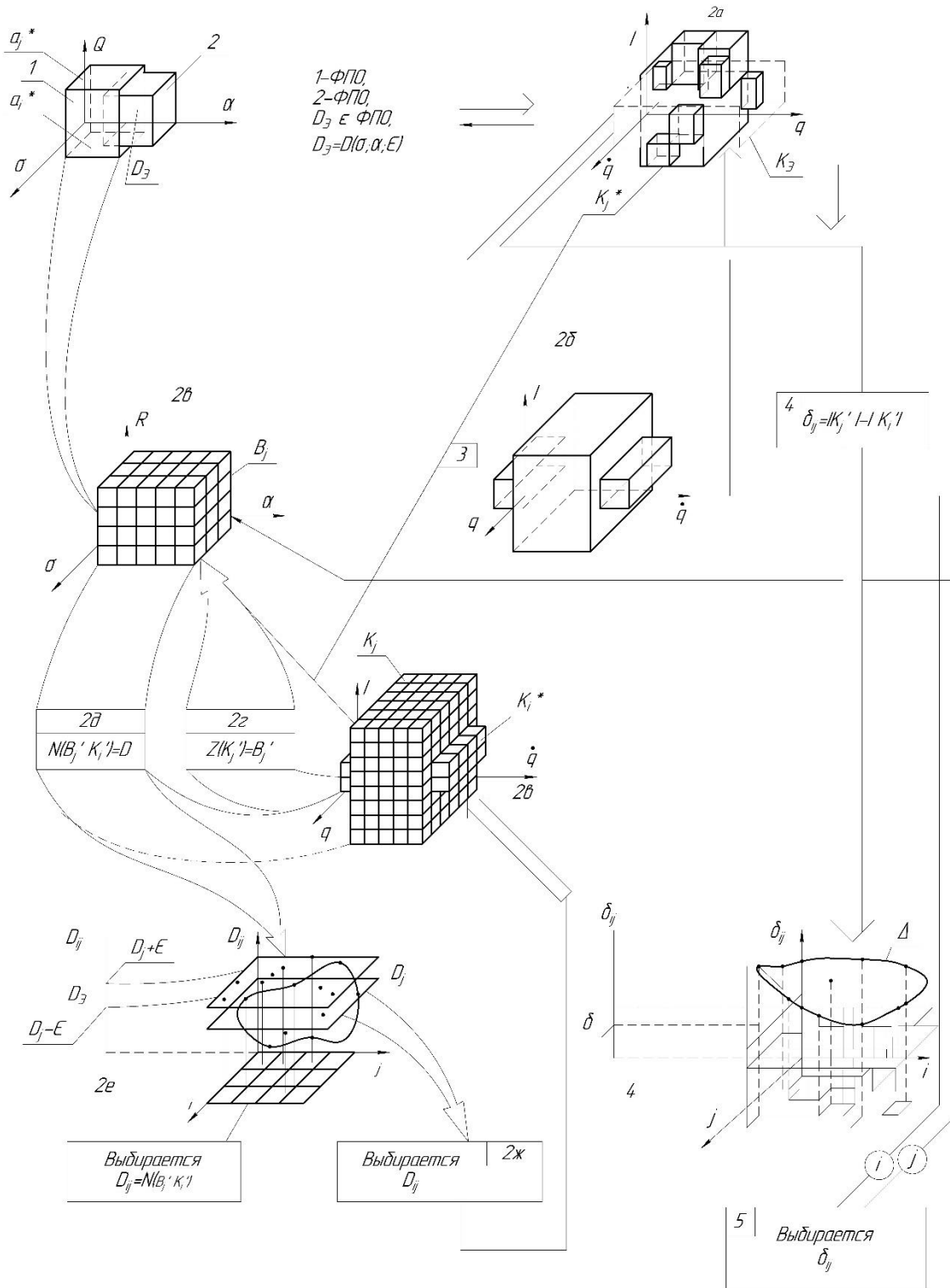


Рис. 3. Схема проектирования комбинированных сочетаний воздействия методов: => прямое движение; -> обратное движение.

В соответствии с представленным на алгоритме (рис. 3) расчетной методике ниже представлен обобщенный пример проектирования мультипликативных комбинированных методов [8].

1. В соответствии с исходными данными (чертеж детали, условия эксплуатации,

уровень долговечности) формируется матрица параметров качества:

$$B = \{\alpha_i\}, i = 1 \dots n \quad (2)$$

α_i – определенный параметр качества; n – общее число рассматриваемых парамет-

ров качества. Указанная матрица B является формализацией фазового пространства объекта (ФПО), а параметры качества – параметров состояния объекта. Одновременно устанавливается критерий эксплуатации, определенный числом циклов ограниченного ресурса в различных эксплуатационных условиях. Указанная величина, поставленная в соответствие определенному значению матрицы качества, B определяет функциональную связь критерия эксплуатации $D_э$ и параметров качества a_i

$$D_э = D(\alpha_i) \quad (3)$$

2. На основании п.1 выбирается конечное число возможных реальных методов, способных обеспечить заданный критерий $D^э$ в пространстве с координатами q, q', I каждому реальному методу соответствует параллелепипед со сторонами

$$\left(\begin{matrix} q_i^{max} - q_i^{min} \\ I_i^{max} - I_i^{min} \end{matrix} \right) \cdot \left(\begin{matrix} q_i'^{max} - q_i'^{min} \\ I_i'^{max} - I_i'^{min} \end{matrix} \right) \quad (4)$$

Таким образом, для каждого метода получаем соответствующий параллелепипед – как геометрическое представление матрицы воздействия i -го метода. Далее выбираются из $q; q'; I$ самые наибольшие и самые наименьшие $q_{ф. min}^{min}, q_{ф. max}^{max}, q'_{ф. min}^{min}, q'_{ф. max}^{max}, I_{ф. min}^{min}, I_{ф. max}^{max}$ соответствующий исходной матрице воздействия в области формирования $K_о$. Отметим, что вследствие принципа своего построения он включает в себя все: K_{oi} . Проводится аналогичная работа для внешнего воздействия в области эксплуатации. результате по выбранным литературным данным и п.1 (реальным эксплуатационным воздействиям строится часть ФПВЭ, охватывающая и представляющая часть исходной матрицы воздействия $K_э$. Таким образом, совокупность $K_о$ и $K_э$ образует общую исходную матрицу K , соответствующую ФПВ в целом. Геометрически K соответствует объединению двух параллелепипедов, определяемых $K_о$ и $K_э$. Проводится дискретизация ФПВ, что аналогично параметрам матрицы K по шагам. В качестве базового выбран шаг по параметру q (из условия обеспечения точ-

ности исходных данных по реальным методам); шаги по q и I – являются производными от шага по q для обеспечения одинакового числа дискретных точек по соответствующим осям ФПВ. Следовательно, ФПВ (и матрица K) разбивается сеткой с выбранными шагами, в узлах которой определяется совокупность значений:

$$\{q_j; q; I_j\} = K_j \quad (5)$$

Расчетная матрица воздействия, при этом число дискретных точек выбирается в зависимости от шага по q . Аналогично осуществляются действия с матрицей B .

$$Z(K_j) = B_j \quad (6)$$

где Z – обобщенная функциональная зависимость параметров воздействия и параметров качества, представленная в виде математических моделей электромагнитного, механического воздействия, явлений массопереноса на параметры качества модели объекта. В результате получается функциональная зависимость вида: каждой точке в ФПВ однозначно соответствует точка пространства ФПО с соответствующими расчетными параметрами качества, так как формируется для достаточно широких диапазонов параметров воздействия (то есть выбранных реальных методов), то вся совокупность расчетных матриц объекта (параллелепипед по наибольшим и наименьшим значениям B_j) больше охватывает матрицу B (п.1). По каждому расчетному объекту (так как B_j – характеризует модель объекта, сформированного воздействием) проводится решение обобщенной задачи K_j

$$N(B'_j; K'_i) = D'_j \quad (7)$$

где N – обобщенная функциональная зависимость параметров качества и критерия эксплуатации, представленная в виде математических моделей эксплуатационных воздействий (различные виды изнашивания, расчет на циклическую прочность и т.д.). Здесь определяющими аргу-

ментами служат параметры модели объекта B_j' и параметры модели эксплуатационного воздействия K_i' . Результатом решения является величина расчетного критерия эксплуатации D_j . Совокупность значений K' использованных в п.2г и поставленные им в соответствие D_j , рассчитанный в п.2д через B_j , образуют таблицу, то есть зависимость D_j от K_i' . По литературным данным проводится выбор значения D_j , удовлетворяющих условию $|D_э - D_j| < \varepsilon$ (ε – погрешность выбора расчетного критерия эксплуатации принимается в пределах 0,05). По литературным данным в соответствии с D_j выбираются K_j (т.е. окончательно) те значения матрицы расчетного воздействия, которые обеспечивают заданный расчетный, $D_{расч}$ уровень долговечности (расчетный критерий эксплуатации).

3. Осуществляется расчет δ_{ij} (погрешности идентификации) для каждого значения K_i . (выбранного в п.2ж) по каждому значению K_j (выбранного по 2ж)

$$\delta_{ij} = (B_j'; K_i') = D_{jэ} \quad (8)$$

Результатом является формирование множества Δ –совокупности погрешностей идентификации расчетных методов в зависимости от номеров i и j .

4. Осуществляется поиск оживи грани множества Δ как решение экстремальной задачи $\inf \Delta(\delta_{ij}) \delta_{ijфпвф}$ с учетом дополнительного условия $\delta_{ij} = \{\delta_m + \delta_m \cdot \alpha\}$ где величина, зависящая от δ_m – значения решения экстремальной задачи, компенсирующая погрешности метода идентификации на предыдущих этапах. Таким образом, выбираются наименьшие δ_{ij} (с учетом погрешности α) характеризующие отличие j -го расчетного метода от i -го реального.

5. По найденным номерам i и j для выбранных δ_{ij} осуществляется собственно идентификация, т.е. выбираются матрица и название метода. K_{oi} .

6. По номеру j выбирается K_j' с соответствующими параметрами.

$$\{q_i; q; I_j\}$$

По этим энергетическим параметрам и выбранному реальному методу осуществляется пересчет режимов данного метода с использованием экспериментальных данных.

7. Осуществляется экспериментальное уточнение режимного диапазона сформированных сочетаний, определяются оптимальные. Производится изучение параметров качества сформированных сочетаний по критерию стендовой, натурной долговечности.

8. Производится экономическая оценка выработанных научно-технических решений [9]. Осуществляется расчет соответствующих инструментов, режимов, методов, разрабатывается оборудование.

Мультипликативные комбинированные методы являются сочетанием различных технологических приемов [10, 11], в каждом из которых пытаются использовать и умножить положительные признаки, необходимые для технологического процесса изготовления детали. В качестве признаков, подлежащих усилению, может выступать любой технологический параметр обработки или сочетание параметров (производительность, шероховатость и др.). [12] Сам процесс выбора комбинации напрямую зависит от оптимизационного параметра. Мультипликативные комбинированные методы позволяют путем взаимного комбинирования различных методов обработки соединить интегральность и локальность воздействий (которые увязываются с понятиями долговечность, надежность, живучесть), параллельно-последовательный локальный характер формообразования и упрочнения с экологичностью [13, 14, 15]. По результатам осуществлённого применения мультипликативной методика идентификации матрицы внешнего воздействия при проектировании комбинированных методов определены ряд комбинированных методов параметры, которых необходимо экспериментально уточнить:

- алмазноэлектрохимическое хонингование (АЭХХ) и гальваническое хромирование (ГХ);

- дробеструйное упрочнение (ДУ) и электрохимическое полирование (ЭП);

- электрохимическое импульсно-циклическое формообразование (-ЭИЦФ);
 - электрохимическое формообразование неподвижным электродом –инструментом (ЭХОН) и ГХ;
 - электрохимическое протягивание (ЭХОП) и ГХ;

- лазерное термоупрочнение (ЛТО) и ультразвуковое выплачивание (УЗВ);
 - электроискровое легирование (ЭИЛ) и УЗВ.
 -электроискровое легирование (ЭИЛ) и УЗВ

Таблица 1.

Метод	Прирост толщины поверхностного слоя в %	Прирост шероховатости и поверхности в %/приростомacroгеометрической точности в%	Прирост напряжённого состояния поверхностного слоя в %	Прирост твердости поверхностного слоя в %	Прирост долговечности в %
1. ЭХОН и ГХ (9..18мкм); ЭХОП и ГХ (18..220мкм)	10...15/ 10...20	15...18	До 15	До 20	10...30 в условиях эрозионномеханического циклического знакопеременного нагружения
2. АЭХХ и ГХ	10...15	15...18/ 30...35	15...20	30...40	10...30 в условиях термоэрозионного циклического нагружения
3. ЭИЦФ и ДУ	10...12	10...15/ 10...15	45..50	45...50	10..15 в условиях циклического знакопеременного нагружения
4. ДУ и ЭХП	20...30	10...15/ 10...15	60..75	До 50	10..30 в условиях циклического знакопеременного нагружения
5. ЛТО и УЗВ	10	10/10	45..50	50	180..240 в условиях ударно-абразивного изнашивания 0
6. ЭИЛ и УЗВ	10	10...12/ 10...15	15..20	30...45	180..240 в условиях ударно-абразивного изнашивания

Экспериментальная апробация результатов интеллектуального проектирования комбинированных методов

Функционирование деталей машин в значительной степени определяется такими металлофизическими параметрами по-

верхности, как шероховатость и геометрическая точность; распределение твердости; фазовый и структурный состав поверхностного слоя; распределение эпюры остаточных напряжений; осыпаемость [1, 2, 3] (табл. 1). Комбинированные методы поз-

воляют управлять металлофизическими параметрами поверхностного слоя [4, 5, 6] достигая оптимальные их сочетания с учетом требований технических характеристик деталей машин (например, долговечность). Рассмотрим результаты металлофизических исследований поверхности деталей машин для следующих комбинированных методов:

- алмазноэлектрохимическое хонингование (АЭХХ) и гальваническое хромирование (ГХ);
- дробеструйное упрочнение (ДУ) и электрохимическое полирование (ЭП);
- электрохимическое импульсно-циклическое формообразование (ЭИЦФ);

- электрохимическое формообразование неподвижным электродом –инструментом (ЭХОИ) и ГХ;
- электрохимическое протягивание (ЭХОП) и ГХ;
- лазерное термоупрочнение (ЛТО) и ультразвуковое выглаживание (УЗВ);
- электроискровое легирование (ЭИЛ) и УЗВ

Металлофизические исследования применения комбинированных методов осуществлялись в условиях экспериментальных исследований, стендовых и натуральных испытаний, изложенных в [1, 2, 5, 6].

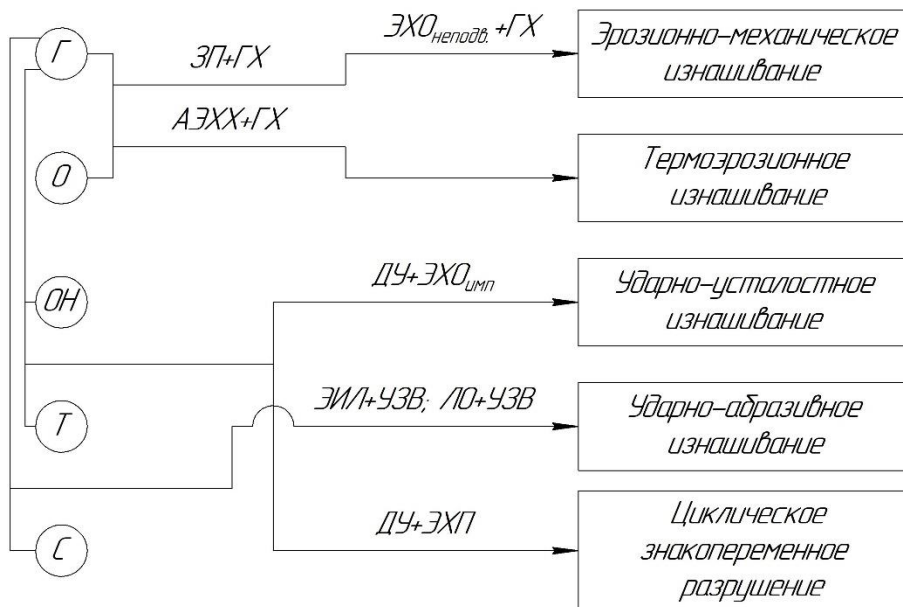


Рис. 4. Схема оценок достижения необходимого уровня долговечности деталей при использовании комбинированных электротехнологических методов оптимизации параметров поверхностного слоя:

Г – макро- и микрогеометрическая точность; Т – твердость; ОН – остаточные внутренние напряжения; О – осыпаемость; С – структурно-фазовый состав

По результатам исследований установлены ниже представленные закономерности (рис. 4, табл. 3, табл. 4):

- ЭХОИ и ЭХОП с ГХ – обеспечение долговечности в условиях термоэрозионного изнашивания за счет оптимизации геометрической точности и шероховатости при снижении осыпаемости гальванического хромирования;

- АЭХХ и ГХ обеспечение долговечности в условиях термоэрозионного изнашивания за счет оптимизации геометриче-

ской точности и шероховатости с уменьшением осыпаемости гальванического покрытия; распределение твердости и остаточных напряжений;

- ДУ и ЭХП обеспечение долговечности в условиях циклического знакопеременного разрушения за счет оптимизации геометрической точности и шероховатости; распределение твердости и остаточных напряжений;

- ЭИЦФ) и ДУ; обеспечение долговечности в условиях циклического знакопе-

ременного разрушения и ударно-усталостного изнашивания за счет оптимизации шероховатости и геометрической точности; распределение твердости и остаточных напряжений;

- ЛТО и УЗВ обеспечение долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания за счет оптимизации шероховатости и геометрической точности; оста-

точных напряжений; структурно-фазового состава поверхностного слоя;

- ЭИЛ и УЗВ обеспечение долговечности в условиях ударно абразивного изнашивания за счет оптимизации шероховатости и геометрической точности; остаточных напряжений; структурно-фазового состава поверхностного слоя.

Таблица 2.

Метод	Увеличение параметров качества при использовании данных методов по сравнению со штатным методом, %					
	Толщины поверхностного слоя	Шероховатости и поверхности	Напряженного состояния поверхности слоя	Макрогеометрической точности поверхности	Твёрдости поверхности	долговечности
1. последовательные методы ЭХО неподв.+ГХ (9...18 мкм.) ЭП+ГХ (18...220 мкм)	10...15	15...18	До 15	10...20	До 20	10...30 в условиях эрозионно-механического циклического нагружения
2. Параллельно-последовательный метод ААХХ+ГХ (9...70 мкм)	10...15	25...30	15...20	30...35	30...40	10...30 в условиях термоэрозионного циклического нагружения
3. Последовательный метод ЭХО имп.+ДУ	10...12	10...15	45...50	10...15	45...50	10...15 в условиях циклического знакопеременного нагружения
4. Последовательный метод ДУ+ЭХП	20...30	10...15	60...75	10...15	До 50	10...15 в условиях циклического знакопеременного нагружения
5. Последовательный метод ЛТО+УЗВ	10	10	45...50	10	50	180...240 в условиях ударно-абразивного изнашивания
6. Последовательный метод ЭИЛ+УЗВ	10	10...12	15...20	10...15	30...45	180...260 в условиях ударно-абразивного изнашивания

АЭХХ создает когезионно-адгезионный механизм изнашивания и обеспечивает повышение износостойкости на 5...10%, при этом оптимальная зона режимного обеспечения создает менее протяженные участки когезионного изнашивания, что объясняется значительным эффектом упрочнения, достигнутым посредством оптимальной продолжительности выжаривания АЭХХ. Сочетание АЭХХ и ГХ позволяет снизить величину стендового износа на 10...20% полностью исключив адгезионно-

когезионные эффекты. В этом случае на фрактограммах преобладают области светло-серого тона причем увеличение толщины гальванического покрытия (до 70 мкм) способствует формированию трещин на поверхности образцов, что укладывается в зону оптимальных режимов, обеспечивающих снижение осыпаемости гальванического покрытия, прирост твердости, формирование эпюры сжимающих напряжений. АЭХХ и ГХ [10, 16] и ЭХОП с ГХ [15, 14] исключают образование мак-

ро и микропогрешностей поверхностного слоя. Этот эффект оценивается в 10...15%, что на 0,5...1% снижает осыпаемость гальванического хромового покрытия и повышает за счет этого повышение долговечности на 5...10%. (табл. 2) При этом увеличение толщины гальванического хромового покрытия до 220 мкм вызывает образование многочисленных трещин и сколов вследствие реализации эффекта пластического оттеснения в условиях контактного трибологического взаимодействия. Долговечность в условиях циклического знакопеременного нагружения и ударно-усталостного изнашивания обеспечивается ДУ и ЭХП и ЭИЦФ и ДУ, которые способствуют снижению шероховатости на 10...15%, повышение твердости поверхностного слоя на 45...50%, формированию эпюры сжимающих напряжений с увеличением последних на 40...50%. ДУ и ЭХП уменьшает шероховатость на 10...15%, твердость на 75...90%, образуется эпюра сжимающих напряжений при увеличении значений последних на 60...75%; прирост долговечности в условиях циклического знакопеременного нагружения составляет 10...30%. Для сочетаний ДУ и ЭХП и ЭИЦФ и ДУ характерно наличие когезионно-адгезионного механизма изнашивания. Адгезионный

механизм изнашивания характерен для ДУ и ЭХП в то время как когезионный характерен для ЭИЦФ и ДУ. Обеспечение долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания обеспечивается за счет применения ЛТО и УЗВ и ЭИЛ и УЗВ за счет направленного изменения твердости, эпюры внутренних сжимающих напряжений, структурно-фазового состава поверхностного слоя. Шероховатость снижается на 5...6%; прирост твердости соответственно составляет для ЛТО и УЗВ 45...50%, а для ЭИЛ и УЗВ 30...45%. В поверхностном слое формируется сжимающий экран напряжений с приростом до 30...45%. Сформированные металлофизические показатели поверхностного слоя посредством ЛТО и УЗВ и ЭИЛ и УЗВ обеспечивают прирост долговечности 5...8%. УЗВ [8,9] в обоих сочетаниях (ЛТО и УЗВ и ЭИЛ и УЗВ) обеспечивает снижение аустенитных составляющих с 35...40% до 2...5%. Подобный эффект приводит к повышению поверхностной твердости, формированию сжимающей эпюры внутренних напряжений. В этих условиях изнашивания когезионно-адгезионный механизм трансформируется в граничный трибохимический с 1,5...2 приростом долговечности.

Таблица 3.

Метод 1[13]	
Плотность тока, А/см ²	30...40
Напряжение, В	14...20
Продолжительность, с	90...1200
Электролит	10...15%-ный раствор NaCl
Скорость перемещения катода-инструмента, мм/мин	178...196
Метод 2[13]	
Плотность тока, А/см ²	20...30
Удельное давление брусков хопа, МПа	0,4...0,5
Напряжение, В	14...20
Продолжительность, с	90...200
Электролит	10...15%-ный раствор NaNO ₃ ; 0,01 ТМ
Давление электролита, Па	0,6...0,8
Вид алмазного инструмента-бруска	А СР 80/63 Р9/Р11 ТУ 037 200-77Е
Метод 3	
ЭХО:	
Плотность тока, А/см ²	35...40
Напряжение, В	8...12
Продолжительность, с	900
Электролит	10...15%-ный раствор NaNO ₃
Продолжительность ДУ, с	1080...1200
Метод 4[13]	

Продолжительность ДУ, с	1080...1200
ЭХП:	
Плотность тока, А/см ²	0,6...0,7
Напряжение, В	14...18
Продолжительность, с	До 480
Метод 5 [13]	
ЛТО:	
Плотность мощности, Вт/см ²	1,1·10 ⁴ ...8·10 ⁵
Скорость перемещения, мм/с	0,5...1,5
Диаметр луча, мм	1
УЗВ:	
Удельное давление, МПа	26·10 ⁵ ...84·10 ⁵
Скорость перемещения, мм/с	0,05...0,2
Метод 6[13]	
ЭИЛ:	
Энергия импульса, Дж	0,1...0,3
Рабочий ток, А	0,8...0,9
Материал легирующего электрода	T15K6, БрБ2
УЗВ:	
Удельное сопротивление, МПа	26·10 ⁵ ...84·10 ⁵
Скорость перемещения, мм/с	0,05...0,2

Выводы

Таким образом решенная в представленной статье задача идентификации параметров матрицы внешнего воздействия при проектировании комбинированных методов, обеспечило прогнозирование ряда комбинаций методов, которые затем прошли экспериментальную апробацию в представленных выше экспериментальных исследований (табл. 3). Результаты проведенного комплекса металлофизиче-

ских [11] исследований поверхности; стендовых и натурных испытаний позволили выявить общие закономерности оптимизации параметров поверхностного слоя (шероховатость и геометрическая точность; распределение твердости; фазовый и структурный состав поверхностного слоя; распределение эпюры остаточных напряжений) с достигаемым эффектом повышения долговечности деталей машин (табл. 1, 2, 4).

Таблица 4

Алмазноэлектрохимическое хонингование и гальваническое хромирование (до 20 мкм) [16]	
Плотность тока, А/см ²	20...25
Соотношение скоростей вращения и возвратно-поступательного перемещения	0,2
Электролит	10...15%-ный раствор NaNO ₃ ; 0,01 ТМС-31
Удаляемый припуск, мм, не более	0,1
Электрохимическое протягивание и гальваническое хромирование (до 70 мкм) [14,15]	
Плотность тока, А/см ²	30...40
Электролит	10...15%-ный раствор NaCl
Скорость перемещения катода-инструмента, мм/мин	178...184

Проведенная систематизация результатов исследований, взаимообусловленности трибологической долговечности и свойств поверхностных упрочненных слоев материалов определен (табл. 1) и обоснован минимальный набор геометрических, физических, структурных параметров качества достаточных для оценки эксплуатационных свойств материалов: шероховатость и геометрическая точность; осыпаемость;

структурно-фазовый состав; распределение твердости и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Такими комплексами являются (рис. 4):

- а) шероховатость, геометрическая точность, осыпаемость;
- б) шероховатость, геометрическая точность, твердость, остаточные напряжения;

в) шероховатость, геометрическая точность, остаточные напряжения, структурно-фазовый состав;

г) шероховатость, геометрическая точность, осыпаемость, остаточные напряжения;

д) шероховатость, геометрическая точность, осыпаемость, твердость, остаточные напряжения.

На основании металлофизических исследований, стендовых и натуральных испытаний сформированы комплексы параметров качества поверхностного слоя определяющие диапазоны величин долговечности деталей машин [11]. В то же время параметры структуры и фазового состава поверхностных слоев нормируют лишь ударно-абразивное изнашивание. Эрозионно-механическое, ударно-усталостное, ударно-абразивные условия воздействия внеш-

ней среды однозначно сочетаются в комплексах (а,б,в) (рис. 4). В то же время термоэрозионное изнашивание определяется двумя (а,д), а долговечность в условиях циклического изнашивания уже тремя (а,в,г). Обнаруженные соответствия между комплексами параметров качества и условиями эксплуатации позволили следующие оптимальные режимы методов. Таким образом проведенные исследования позволили установить определенные физико-химические закономерности способствующие в условиях применения обеспечить достижение требуемых уровней долговечности деталей машин. На основании проведенных научно-технических исследований создано промышленное электрохимическое импульсно-циклическое оборудование [15] и электрохонинговальное [16].

Библиографический список

1. Usov S.V. Combination of finishing technological methods required quality parameters of surface layer and reliability // Soviet engineering research. – 1991. – Т. 19, №9. – С. 58.
2. Usov S.V. Desing and calculate parallel-consecutive method // Soviet engineering research. – 1991. – Iss. 6, №7. – P. 17.
3. Usov S.V. Metallophysical aspects for increasing limited life of mashine parts by means of combined methods // Soviet engineering research. – 1991. – Iss. 8, №5. – P. 58.
4. Usov S.V. Research the influence surface roughness of honed surface of the strength of electrical deposited of chromium coating under load // Soviet engineering research. – 1984. – Iss. 11, №4. – P. 8.
5. Usov S.V. To increase durability by means of combine methods // Soviet engineering research. – 1988. – Iss. 6, №2. – P. 52.
6. Бровкова М.Б. Системы искусственного интеллекта в машиностроении // Учебное пособие-СГТУ. – Саратов, 2004. – 119 с.
7. Дроздов Ю.Н., Усов С.В., Белобрагин Ю.А., Щербина В.И. Исследование возможности повышения износостойкости деталей машин при поверхностном упрочнении направленным лазерным излучением // Вестник машиностроения. – 1986. – №2. – С. 5.
8. Дроздов Ю.Н., Усов С.В., Использование комбинированных технологических методов для повышения износостойкости деталей машин // Вестник машиностроения-1985-№10-с.9
9. Точилин И.П., Усов С.В., Жданов А.В. Мультипликативные подходы к расчету экономической эффективности инновационных проектов. – М.: Перо, 2022. – 193 с.
10. Усов С.В. Исследование влияния шероховатости хонингованной поверхности на прочность гальванического хромового покрытия // Вестник машиностроения. – 1984. – №7. – С. 7-9.
11. Усов С.В. Металлофизические аспекты повышения долговечности деталей машин м помощью комбинированных электротехнологических методов // Вестник машиностроения. – 1991. – №5. – С. 58.
12. Усов С.В., Дроздов Ю.Н., Кокоулин М.М., Панасюк М.Ю., Карнеев С.В. Проектирование комбинированных электротехнологических методов повышения долговечности деталей, работающих условиях ударно-абразивного изнашивания //

Вестник машиностроения. – 1991. – №6. – С. 51-53.

13. Усов С.В., Шиганов И.Н., Жданов А.В., Митрофанов А.Н., Точилин И.П. Металлофизические исследования поверхностей при лазерной сварке и резки // Сварочное производство. – 2022. – №3. – С. 43-50.

14. Усов С.В. Электрохимическое протягивание профильных отверстий // Электрофизические и электрохимические методы. – 1979. – №6. – С. 1-2.

15. Седыкин Ф.В., Белобратов Ю.А., Усов С.В. А.С.764256 Мки кл В23р 1/16 Способ электрохимической обработки – а.з.7584407 заявлено 01.01.1974.

16. Китаев Ю.В., Усов С.В., Тимофеев Ю.С. Производственный участок алмазноэлектрохонинговальных станков // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1983. – №2. – С. 6-9.

MULTIPLICATIVE METHOD OF IDENTIFICATION OF THE MATRIX OF EXTERNAL INFLUENCE IN THE DESIGN OF COMBINED METHODS

S.V. Usov¹, *Doctor of Technical Sciences*

A.V. Zhdanov², *Candidate of Technical Sciences*

A.N. Mitrofanov², *Master's degree*

I.P. Tochilin³, *Bachelor's degree*

¹**Moscow Laser Technology Center**

²**Vladimir State University named after Stoletovs**

³**Higher School of Economics**

^{1,3}**(Russia, Moscow)**

²**(Russia, Vladimir)**

Abstract. *The article is devoted to the consideration of aspects of changes in the metallophysical parameters of the surface layer (microhardness, stress diagrams of the surface layer, roughness, surface layer size), which are formed as a result of the use of combined methods. The calculation modes of the combined methods directly depend on the selected approaches for identifying theoretical calculations. The introduction of the matrix of external influences allows us to generalize any combination of combined methods by identifying their specific optimal combinations by the identifier of external influences. Specific examples of the construction of combined effects with subsequent metallophysical evaluation of the designed modes of combined methods are given.*

Keywords: *multiplicative technique combined methods, metallophysical studies, durability, design, matrix of external influence.*