

*А.Н. Кравцов*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрено обеспечение эксплуатационных характеристик блочно-модульных инструментов при многокритериальной регламентации параметров поверхностного слоя их деталей с помощью комплексных параметров и системной оптимизации для механических методов обработки, разработаны рекомендации по применению комплексных параметров состояния контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных резцов для повышения качества изготовления инструмента.

**Ключевые слова:** эксплуатационные свойства, блочно-модульный инструмент, комплексные параметры, системная оптимизация, контактирующие поверхности.

**Введение.** В настоящее время одним из важных вопросов повышения надежности инструментов является обеспечение показателей качества при их изготовлении. Качество изделия в значительной степени определится состоянием контактирующих поверхностей деталей и возможностью обеспечить ее эксплуатационные характеристики (свойства) (ЭС). Одним из самых слабо изученных вопросов, решаемых при конструкторско-технологической подготовке изготовления инструментов, является назначение и технологическое обеспечение параметров состояния, характеризующих ЭС поверхностей их деталей.

**Анализ последних исследований и литературы.** В последнее время, наблюдается недостаток работ, в которых обеспечение ЭС поверхностей деталей инструмента производится при помощи комплексных параметров их состояния (КП). Хотя и присутствуют исследования И.В. Крагельского, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова и др. (см. [1 - 3]), посвященные обеспечению ЭС с помощью многокритериальной регламентации состояния поверхностей несколькими КП, но отсутствуют решения задачи оптимизации при их помощи. Поэтому, предложенная методика многокритериальной оптимизации технологического обеспечения нескольких ЭС поверхностей инструмента, при помощи КП, является особо актуальной, представляющей большой интерес для исследования.

Следовательно, для широкого применения блочно-модульных инструментов на промышленных предприятиях, необходимы исследования, направленные на совершенствование методики технологического обеспечения показателей надежности на основе анализа состояния поверхностей их деталей.

**Целью** данной статьи является обеспечение ЭС блочно-модульных инструментов при многокритериальной регламентации параметров поверхностного слоя их деталей с помощью КП и системной оптимизации для механических методов обработки. Объектом исследования являются блочно-модульные то-

карные инструменты, применяемые в системах автоматического управления технологической обрабатывающей системой (ТОС). Предметом исследования являются ЭС деталей блочно-модульных токарных режущих инструментов в системах автоматического управления ТОС.

### **Материалы исследований**

В данной работе (и др., см [1 - 3]) автором приводятся теоретические и экспериментальные исследования поверхностей деталей блочно-модульных инструментов с применением системной оптимизации их ЭС, режимов обработки, функционально-стоимостного анализа, вероятностной оценки методов их обработки при многокритериальной регламентации параметров их качества. А также с применением статистических методов обработки экспериментальных данных и системно-структурного анализа при разработке конструкций токарного инструмента.

Оптимизация основана на применении двухступенчатой схемы технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей инструмента с разделением задач технолога и конструктора при задании КП на каждой из стадий. С последующим решением задачи системной оптимизации ЭС поверхностей с применением функционально-стоимостного анализа и вероятностной оценки (ВО) метода их обработки.

Под системной оптимизацией понимается решение задачи нахождения оптимального условия обеспечения ЭС поверхностей деталей на основе анализа функций ее КП (т.е. функции эксплуатации). Функционально-стоимостной анализ (ФСА) представляет собой метод системного исследования функций объекта, направленный на минимизацию затрат в сферах проектирования, производства и эксплуатации. Системно-структурный анализ (ССА) конструкций блочно-модульных токарных инструментов позволяет классифицировать элементы этих конструкций, установить условия внешнего и межэлементного воздействия, регламентируемые параметры качества по-

© А.Н. Кравцов, 2015

верхности и др. Он является одновременно завершением конструкторского проектирования и началом технологической подготовки производства, заключающийся в анализе надежности инструмента и выборе параметров, оказывающих решающее влияние его на качество (регламентируемые параметры).

Функциональное назначение поверхности инструмента, его ЭС, геометрические и физико-механические параметры поверхности и КП связаны друг с другом при помощи теории графов и соответствий (см. [1 - 3]). Научная новизна работы автора состоит в разработке методики многокритериальной оптимизации технологического обеспечения ЭС деталей блочно-модульных токарных инструментов на основе применения КП их состояния.

Автором, в работах [1 - 3], обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, рассмотрена ее научная новизна. Проанализировано современное состояние проблемы технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей блочно-модульных токарных инструментов. Определены основные направления развития блочно-модульных инструментов на примере резцов для тяжелых токарных станков.

Рассмотрены отличительные особенности и условия возникновения цельных, напайных, сборных, блочно-модульных, а также инструментов с элементами диагностики и контроля. Отмечены преимущества и недостатки многоэлементных блочно-модульных инструментов, а также то, что применение последних наряду с преимуществами (быстросменяемость и возможность автозамены, экономии материала, обеспечение централизации изготовления) приводит к росту числа контактирующих поверхностей, ЭС которых определяют рабочие характеристики инструмента.

Выполнен анализ взаимодействия контактирующих поверхностей. Раскрыты три основных подхода к оценке геометрических характеристик имеющихся в нашей стране. Традиционный - параметрический, непараметрический, с использованием спектральной теории неровностей. Проанализированы основные теоретические предпосылки и принимаемые модели, используемые при рассмотрении вопросов контактного взаимодействия. Показано, что параметры состояния поверхностного слоя в процессе эксплуатации изменяют свои значения, что приводит к изменению характеристик зоны контактного взаимодействия.

Проблема обеспечения ЭС поверхностей деталей анализируется с позиций двух основных подходов:

1. Технологического обеспечения системы параметров, определяющих их ЭС.

2. Технологическое обеспечение непосредственно ЭС деталей.

**Результаты исследований.** Проведенный анализ показал, что в настоящее время при наличии хорошей научной базы по вопросам технологического обеспечения деталей очень мало работ, посвященных изготовлению многоэлементных сборных режущих инструментов, наиболее типичными представителями которых, являются блочно-модульные резцы для токарных станков. Сделан вывод, что дальнейшее совершенствование и создание новых видов многоэле-

ментных инструментов требуют разработки теоретических предпосылок по их технологическому обеспечению ЭС.

Одно из основных направлений решения этой задачи является установление и обеспечение научно-обоснованных показателей ЭС контактирующих поверхностей деталей, входящих в состав инструмента. А также изучение параметров поверхностного слоя и показателей, характеризующих ЭС, меняющие свои значения в процессе эксплуатации инструмента, что позволяет установить время выхода из строя инструментов и на базе этого рационально использовать их в процессе эксплуатации.

Следовательно, при решении задачи технологического обеспечения ЭС деталей необходимо применять КП состояния поверхностного слоя. Выделяется два вида таких параметров – технологических и расчетно-конструкторских. При этом критериями по определению метода обработки на финишном этапе являются необходимые условия максимума площадей области эффективного значения ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОЭМО, см. **рис. 1** и **рис. 2**), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах состояния поверхности.

Выходной информацией конструктора и исходными данными для технолога служит область регламентируемых значений ЭС - ОРЭС. Она включает все ЭС, которые конструктор задал технологу. А значение этой области не зависит от, тех, которые достигнуты технологически. Но совсем не обязательно, для решения такой задачи, использовать КП состояния поверхности. В работах по технологическому обеспечению ЭС (см. [1 - 3]) найдены теоретические зависимости интенсивности изнашивания  $I_h$  от условий обработки. В тоже время, критерием оптимальности выбора режимов обработки может служить условие  $J_h \leq J$ . Где,  $J_h$  и  $J$  – интенсивности изнашивания, определяемые из условий обработки и процесса нормального износа.

Регламентируемый параметр элементов режимов обработки подчиняется законам распределения случайных величин. Как видно из рис. 1 и рис. 2, метод обработки, обеспечивающий оптимальную величину интенсивности изнашивания можно найти, используя критерий максимальности значения плотности распределения вероятностей, на участке  $(t_{min}; t_{max})$  при регламентации в качестве лимитирующего параметра технологической системы глубины резания  $t$ .

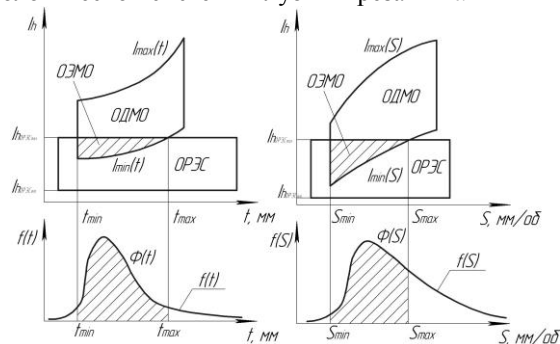


Рис. 1 – Схема выбора метода обработки при обеспечении износостойкости

Она является температурным фактором обработки, оказывая влияние на состояние поверхности. По зависимости вида  $R_z = f(t)$ , можно определить диапазон параметров, которые будут обеспечивать оптимальную износостойкость поверхности. Выбор остальных элементов режимов резания можно осуществить аналогично. Для анализа влияния динамики процесса резания применяется модель продольного точения резцом по динамической схеме.

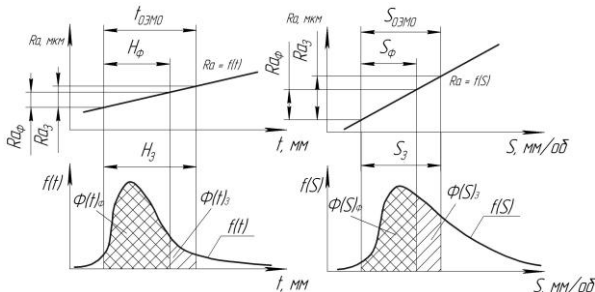


Рис. 2 – Схема выбора метода обработки при обеспечении износостойкости

Фактическая глубина резания  $H_\phi$  и подача  $S_\phi$  зависят от соотношений заданной подачи и глубины резания соответственно ( $S_3$  и  $H_3$ ) и передаточных функций звеньев системы автоматического управления ( $W_{\text{ПР}} и W_{\text{ЭУС}}$ ). Поэтому, рассматривая обеспечение высотных геометрических параметров состояния поверхности можно заметить, что фактический параметр при обработке будет отличаться от заданного. С другой же стороны, вероятность обеспечения эксплуатационных свойств режимами обработки, при учете динамики процесса резания, снижается: плотность распределения вероятностей  $\Phi_\phi < \Phi_3$ , вероятность  $P(S_\phi; t)_\phi < P(S_\phi; t)_3$  (рис. 1, рис. 2). И это нужно учитывать при использовании блочных конструкций резцов в системах автоматического управления.

В работах [1 - 3] автором рассмотрен метод решения задачи многокритериальной оптимизации технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей инструмента. Приведена система КП, обоснование их выбора, элементы ФСА при обеспечении ЭС поверхности и вероятностной оценки методов ее обработки. Необходимость получения ЭС, предъявленных к поверхностям деталей, выдвигает задачу обеспечения КП состояния поверхностного слоя, как функций эксплуатации, каждая из них представляет собой совокупность отдельных параметров шероховатости, вол-

нистости, макроотклонений и физико-механических свойств (табл. 1).

Воспользуемся графической интерпретацией метода на базе двух критериального случая. Для этого в заданном пространстве выберем некоторую область Р (рис. 4а). Определим, что эта область является областью регламентированных значений ЭС (ОРЭС).

Она имеет ограничения:

$$X_i = X_{iPijmax}; X_i = X_{iPijmin};$$

$$Y_j = Y_{jPijmax}; Y_j = Y_{jPijmin}; \quad (1.1)$$

$$Z_k = Z_{kPkjmax}; Z_k = Z_{kPkjmin} \quad (1.2)$$

Далее ограничим область достижимых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) (рис. 3б и рис. 4а). Для учета разброса не регламентированных параметров состояния поверхностного слоя, как например  $W_a = W_{a_{min}} \dots W_{a_{max}}$  функция  $J = f(Ra)$ , где  $Ra$  – регламентируемый параметр состояния поверхности, функция эксплуатации изменит свое положение от  $J_{min} = f_2(Ra)$  до  $J_{max} = f_1(Ra)$  (рис. 3 а и рис. 3б).

С этой целью представим зависимости, отражающие технологическое значение КП в виде:

$$Y_j = K_{ijk} \cdot f(X_i; Z_k) \quad (2)$$

где  $X_i$  - значения  $i$ -го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси абсцисс;  $Z_k$  - значения  $k$ -го параметра, которые регламентируются и откладываются на оси ординат;  $K_{ijk}$  - коэффициент, отражающий влияние не рассматриваемых  $j$  КП при  $i$  и  $k$  регламентируемом параметре состояния поверхностного слоя.

Тогда область ОДМО ограничится функциями:

$$X_i = X_{iDijmax}; X_i = X_{iDijmin}; \quad (3.1)$$

$$Y_j = K_{ijkmax} \cdot f(X_i; Z_k); Y_j = K_{ijkmin} \cdot f(X_i; Z_k) \quad (3.2)$$

$$Z_k = Z_{kDkjmax}; Z_k = Z_{kDkjmin}; \quad (3.3)$$

Объемы ОДМО и ОРЭС определяются из выражений:

$$V_{Dijk} = (K_{ijkmax} - K_{ijkmin}) \cdot \int_{X_{iDijmin}}^{X_{iDijmax}} \left[ \int_{Z_{kDkjmin}}^{Z_{kDkjmax}} f(X_i; Z_k) dZ_k \right] dX_i \quad (4)$$

$$V_{Pijk} = (X_{iPijmax} - X_{iPijmin}) \cdot (Y_{jPijmax} - Y_{jPijmin}) \times (Z_{kPkjmax} - Z_{kPkjmin}) \quad (5)$$

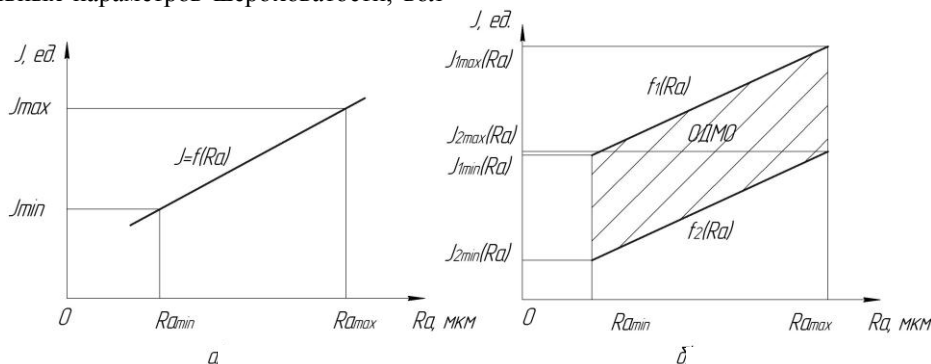


Рис. 3 – Схема построения области ОДМО при регламентации одного параметра состояния поверхностного слоя для одной функции эксплуатации: а – характер изменения функции эксплуатации; б – ограничение области достижимых значений

Таблица 1 - Комплексные параметры, применяемые при технологическом обеспечении ЭС поверхностей деталей инструмента

Наименование поверхности	КП	Технологическое значение параметров	Расчетно-конструкторское значение параметров
Работающие в условиях трения и износа	$C_x$	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^l)^{12}}$	$3375 \cdot \left[ \frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left( \frac{10 \cdot J_{II} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Опорные поверхности работающие на сдвиг	$\Pi$	$\left[ \frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^l)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[ \frac{\sigma_T \cdot J_{III}}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Опорные поверхности работающие в упор	$H$	$\frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{man}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Работающие в условиях линейного износа	$I$	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^l}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Работающие в условиях циклического нагружения	$D$	$\frac{K^l \cdot S_{mw}^{0.4} \cdot R_a}{W_a^{0.2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0.2}}{13.5} \cdot \left[ \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$
Поверхности соединений посадок с натягом	$C_M$	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

Пересечение областей ОДМО и ОРЭС ограничит область эффективных значений ОЭМО, в которой при применении рассматриваемого метода обработки будут иметь место значения ЭС и параметров, определяемых регламентацией.

Объем области ЦОРЭС можно определить при помощи смешанного произведения векторов. Для этого рассмотрим области ОРЭС<sub>1</sub>, ОРЭС<sub>2</sub>, ..., ОРЭС<sub>i</sub>, которые образованы множествами векторов O<sub>1</sub>{a<sub>1</sub>; b<sub>1</sub>; c<sub>1</sub>}, O<sub>2</sub>{a<sub>2</sub>; b<sub>2</sub>; c<sub>2</sub>}, ..., O<sub>i</sub>{a<sub>i</sub>; b<sub>i</sub>; c<sub>i</sub>} соответственно. Таким образом, объем областей ОРЭС<sub>i</sub> определяется смешанным произведением векторов, которые лежат на гранях соответствующих областей ОРЭС: V<sub>1</sub> = [a<sub>1</sub>b<sub>1</sub>]c<sub>1</sub> = (Se<sub>1</sub>)c<sub>1</sub>; V<sub>2</sub> = [a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>]c<sub>2</sub> = (Se<sub>2</sub>)c<sub>2</sub>; ... ; V<sub>i</sub> = [a<sub>i</sub>b<sub>i</sub>]c<sub>i</sub> = (Se<sub>i</sub>)c<sub>i</sub>. В этих выражениях Se<sub>i</sub> – площадь параллелограмма, построенного на векторах a<sub>i</sub> и b<sub>i</sub> соответственно, приведенных в одну точку.

Для примера, приведенного на рис. 4б, объем областей ОРЭС<sub>i</sub>:

$$V^{OPЭС}_1 = \begin{vmatrix} Wa_1 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1 \begin{vmatrix} Ra_1 & 0 \\ 0 & J_1 \end{vmatrix} = Wa_1(Ra_1 - J_1), (6)$$

$$V^{OPЭС}_2 = \begin{vmatrix} Wa_2 & 0 & 0 \\ 0 & Ra_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2 \begin{vmatrix} Ra_2 & 0 \\ 0 & J_2 \end{vmatrix} = Wa_2(Ra_2 - J_2), (7)$$

...

$$V^{OPЭС}_i = \begin{vmatrix} Wa_i & 0 & 0 \\ 0 & Ra_i & 0 \\ 0 & 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i \begin{vmatrix} Ra_i & 0 \\ 0 & J_i \end{vmatrix} = Wa_i(Ra_i - J_i), (8)$$

где, J<sub>i</sub> = J<sub>i</sub>(Ra<sub>i</sub>; Wa<sub>i</sub>)<sup>max</sup> - J<sub>i</sub>(Ra<sub>i</sub>; Wa<sub>i</sub>)<sup>min</sup>, Ra<sub>i</sub> и Wa<sub>i</sub> - среднее арифметическое отклонение профиля продольного сечения и среднее арифметическое отклонение профиля волнистости соответственно.

Объем области ЦОРЭС определится вычитанием из самой большой по значению объема области ОРЭС<sub>i</sub> (V<sup>ОРЭС</sup><sub>i</sub>) областей V<sup>ОРЭС</sup><sub>1</sub>, V<sup>ОРЭС</sup><sub>2</sub>, ..., V<sup>ОРЭС</sup><sub>i-1</sub>, т.е.: V<sub>ЦОРЭС</sub> = V<sup>ОРЭС</sup><sub>i</sub> - (V<sup>ОРЭС</sup><sub>1</sub> + V<sup>ОРЭС</sup><sub>2</sub> + ... + V<sup>ОРЭС</sup><sub>i-1</sub>). Объемы областей ОДМО<sub>i</sub> и СОДМО находятся при помощи двойных интегралов, взятых в соответствующих пределах:

$$V_1^{max} = \int_{Ra_{min}^1}^{Ra_{max}^1} \left( \int_{Wa_{min}^1}^{Wa_{max}^1} [C_m^{max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (9)$$

$$V_1^{min} = \int_{Ra_{min}^1}^{Ra_{max}^1} \left( \int_{Wa_{min}^1}^{Wa_{max}^1} [C_m^{min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa \quad (10)$$

где, C<sub>m i</sub><sup>max</sup> и C<sub>m i</sub><sup>min</sup>, для задачи, приведенной на рис. 4б:

$$C_{m 1}^{max} = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_1, (11)$$

$$C_{m 1}^{min} = (K_1 Ra)_1 + (K_2 Wa)_1 + Const_2, (12)$$

...

$$C_{m i}^{max} = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_j, (13)$$

$$C_{m i}^{min} = (K_i Ra)_i + (K_r Wa)_i + Const_k, (14)$$

Аналогичным образом находятся объемы областей ОДМО<sub>i</sub>:

$$V_i^{max} = \int_{Ra_{min}^i}^{Ra_{max}^i} \left( \int_{Wa_{min}^i}^{Wa_{max}^i} [C_m^{max}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa, (15)$$

$$V_i^{min} = \int_{Ra_{min}^i}^{Ra_{max}^i} \left( \int_{Wa_{min}^i}^{Wa_{max}^i} [C_m^{min}(Ra; Wa)] dWa \right) dRa, (16)$$

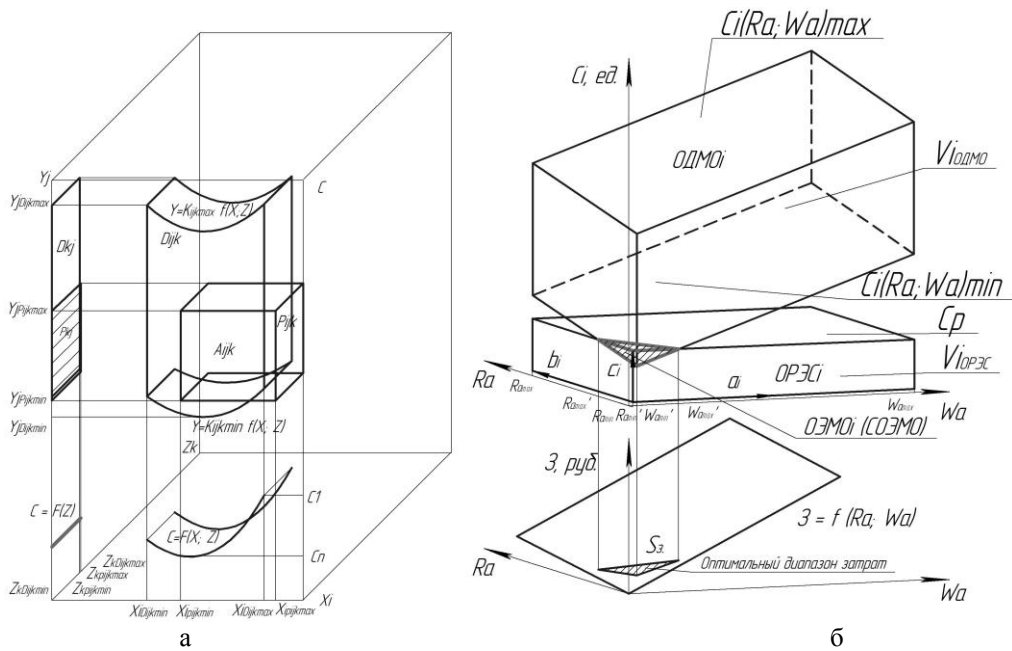


Рис. 4 – Решение задачи выбора оптимальной площади затрат  $S_3$  для обеспечения заданного ЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя: а – зависимости затрат от параметров состояния поверхностного слоя; б – результаты решения задачи

$$V_{ODMO}_1 = V_1^{\max} - V_1^{\min} \quad (17)$$

$$V_{ODMO}_i = V_i^{\max} - V_i^{\min} \quad (18)$$

Объем области СОДМО определяется аналогично нахождению объема области ЦОРЭС в предыдущих рассуждениях:  $V_{СОДМО} = V_{ODMO}_i - (V_{ODMO}_1 + V_{ODMO}_2 + \dots + V_{ODMO}_{i-1})$ .

Нахождение наиболее оптимального варианта на стадии подготовки производства является задачей, которая эффективно решается с применением принципов ФСА. Используя системный подход, введем в систему  $X_i; Y_j; Z_k$  ось затрат  $C$ . Построим зависимости затрат от параметров состояния поверхностного слоя  $X_i, Z_k$  (рис. 4а).

$$C = F_j(X_i; Z_k) \quad (19)$$

Проецирование экстремумов  $X_i, Z_k$  из области ОЭМО на ось затрат (рис. 4а) ограничит максимум и минимум издержек при рассматриваемом методе обработки. В предыдущем изложении рассматривался случай выбора метода обработки с позиций обеспечения одного  $j$ -го КП, при заданном уровне  $i$ -го и  $k$ -го параметра состояния поверхностного слоя. Однако, часто необходимо обеспечить несколько ЭС с регламентацией двух и более параметров.

Для решения задачи построим совмещенную систему координат  $X_1, Y_1, Z_1 \dots X_n, Y_n, Z_n$  с коррелированными по масштабу координатным осям. Введем единую ось затрат  $C$  (рис. 4а). Масштабный фактор по осям  $Y_j$  выберем исходя из совместного решения уравнений, отражающих конструкторско-расчетное значение КП состояния поверхности, отражающего ее ЭС. Соотношения масштаба по осям  $X_i$  и  $Z_k$  определяются на основании зависимостей между параметрами состояния поверхностного слоя, известными из теории технологического обеспечения ЭС деталей.

Параметры не коррелированных значений будем учитывать в структуре коэффициента  $K$ , поэтапно

производя решения по всем регламентируемым параметрам. Очевидно, что проводимый при регламентировании нескольких коррелированных параметров и обеспечении двух и более ЭС, анализ является общим. На основании ограничений (1.1 – 1.2), (2), (3.1 – 3.3) построим области ОДМО и ОРЭС, а также функции затрат для всех  $j$  ЭС, по  $i$  и  $k$  регламентируемым параметрам. Пересечение областей ОДМО образует  $D_\Sigma$  – совместную область достигаемых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (СОДМО). Пересечение областей ОРЭС образует  $P_\Sigma$  – целеобразную область регламентируемых значений ЭС (ЦОРЭС). Пересечение областей СОДМО и ЦОРЭС образует  $A_\Sigma$  – совместную область эффективных значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (СОЭМО).

На рис. 5 области  $D_i$  и  $D_1$  – области достижимых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) образуют совместную область СОДМО – область  $V$ . Области регламентируемых значений ЭС (ОРЭС)  $P_i$  и  $P_1$  образуют совместную область ЦОРЭС – область  $P$ . Пересечение областей эффективных значений ЭС –  $V$  (СОДМО) и  $P$  (ЦОРЭС) образуют совместную область СОЭМО – область  $A$ . Объемы ЦОРЭС, СОДМО, СОЭМО определяются так:

$$V_{D\Sigma jk} = \sum_{\psi=1}^e \left[ K_{BD\Sigma jk} \cdot \iint_{D_i} f_{BD\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HD\Sigma jk} \cdot \iint_{D_i} f_{HD\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k \right]_e \quad (20)$$

$$V_{A\Sigma jk} = \sum_{\psi=1}^t \left[ K_{BA\Sigma jk} \cdot \iint_{P_i} f_{BA\Sigma jk}(X_i; Z_k) dX_i dZ_k - K_{HA\Sigma jk} \cdot \iint_{P_i} f_{HA\Sigma jk}(X_i) dX_i dZ_k \right]_t \quad (21)$$

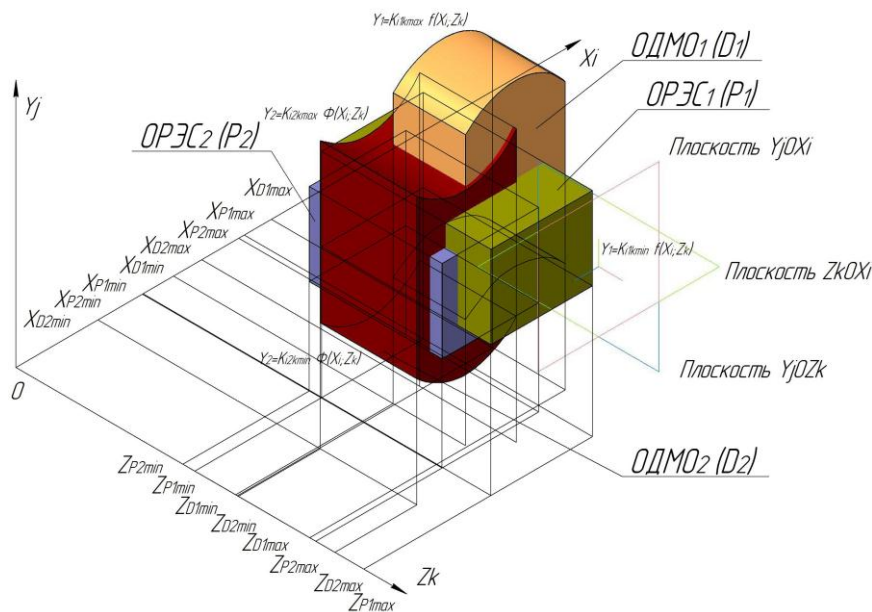


Рис. 5 – Схема построения областей ОДМО и ОРЭС при регламентации двух параметров состояния поверхностного слоя для двух функций эксплуатации

$$V_{P\Sigma ij k} = (X_{iP\Sigma ij k \max} - X_{iP\Sigma ij k \min}) \times (Y_{jP\Sigma ij k \max} - Y_{jP\Sigma ij k \min}) \times (Z_{kP\Sigma ij k \max} - Z_{kP\Sigma ij k \min}), \quad (22)$$

где,  $\psi$  - количество пересеченных множеств;  $f_{HD\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$ ,  $f_{BD\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$  - приведенная к  $j$  показателю функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область  $D_{\Sigma ij k}$ ;  $X_{iP\Sigma ij k \max}$ ,  $X_{iP\Sigma ij k \min}$  - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области  $P_{\Sigma ij k}$  (по первому регламентируемому параметру);  $Z_{kP\Sigma ij k \max}$ ,  $Z_{kP\Sigma ij k \min}$  - минимальные и максимальные значения параметров состояния поверхности, являющихся ограничительными функциями области  $P_{\Sigma ij k}$  (по второму регламентируемому параметру);  $Y_{jP\Sigma ij k \max}$ ,  $Y_{jP\Sigma ij k \min}$  - минимальные и максимальные значения КП состояния поверхности, отражающих ее ЭС;  $f_{HA\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$ ,  $f_{BA\Sigma ij k}(X_i; Z_k)$  - приведенная функция нижней и верхней кривой, ограничивающая область  $A_{\Sigma ij k}$  по регламентируемым параметрам;  $K_{BD\Sigma ij k}$ ,  $K_{HD\Sigma ij k}$  - приведенные значения коэффициентов отражающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область  $D_{\Sigma ij k}$ ;  $K_{BA\Sigma ij k}$ ,  $K_{HA\Sigma ij k}$  - приведенные значения коэффициентов, учитывающих влияние прочих параметров при верхней и нижней функциях, ограничивающих область  $A_{\Sigma ij k}$ ;  $e$  - количество множеств СОДМО;  $t$  - количество множеств СОЭМО.

Проецирование экстремальных значений  $X_{iD\Sigma}$ ,  $X_{iA\Sigma}$  областей СОДМО и СОЭМО на функции затрат образуют области затрат, которые показывают в каких пределах колеблется стоимость обработки дета-

лей при обеспечении ЭС данным методом обработки. В случае не пересечения области ОЭМО (СОЭМО) с областью ОРЭС (ЦОРЭС) возможны следующие пути решения задачи технологического обеспечения ЭС: а) Смена метода обработки поверхности на финишном этапе технологического процесса; б) Смена регламентируемого(-ых) параметра(ов) состояния поверхностного слоя; в) Увеличение числа этапов обработки поверхностей в технологическом процессе.

При оптимизации технологических процессов важно определить критерии оптимальности, которые могут заключаться не только в обеспечении ЭС поверхностей детали, но и точности ее размеров. А также уровни оптимальности, как например, перехода и операции. Таким образом, на уровне перехода, это необходимые условия максимума площадей эффективного значения ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОЭМО), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах качества поверхности (и др., см. [1 - 3]) (табл. 2). На уровне операции, соблюдение условия отношения максимального и минимального припусков  $Z_{L\max}/Z_{L\min} < 3$  ( $Z_{R\max}/Z_{R\min} < 3$ ) на чистовых и отделочных переходах, а также то, чтобы допуск конструкторского размера  $TK_i$  ( $TR_{Ki}$  - при наличии основных отверстий в конструкции заготовки) был больше, либо равным сумме допусков технологических размеров  $TL_i$  ( $TR_i$ ), входящих в соответствующую размерную цепь:  $TK_i \geq \sum TL_i$  ( $TR_{Ki} \geq \sum TR_i$ ). При не обеспечения условий оптимальности технологической операции (табл. 2) необходимо перестроить размерные схемы технологического процесса таким образом, чтобы (I - IV)-й критерии не нарушались.

Таблица 2 – Критерии выбора оптимального варианта технологического обеспечения ЭС поверхностей деталей и точности конструкторских и технологических размеров

Критерий оптимальности технологического перехода		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	III-й критерий оптимальности
Максимум площади ОЭМО (СОЭМО)	Минимум величины затрат $C_i$	Максимум вероятности $P(K_i)$
$\forall MOEDEC;$ $\exists_B B_{joon} . S_D \rightarrow \max;$ $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_i\};$ $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\};$	$\exists_B B_{joon} . C_i \rightarrow \min;$ $C_i = F(x_i); A \cap D = B;$ $B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\};$ $B_{onm} \in B;$	$\exists_B B_{joon} . P_i(A) \rightarrow \max;$
Критерий оптимальности технологической операции		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности линейных технологических размеров	Обеспечение точности линейных конструкторских размеров	
$Z_{Lmax}/Z_{Lmin} < 3$	$TK_i \geq \sum TL_i$	
III-й критерий оптимальности	IV-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности технологических размеров основных отверстий	Обеспечение точности конструкторских размеров основных отверстий	
$Z_{Rmax}/Z_{Rmin} < 3$	$TR_{Ki} \geq \sum TR_i$	

Этого можно добиться различными способами, некоторые из которых, могут быть такими: увеличение числа этапов обработки поверхностей, в т.ч. и замена методов их обработки, смена технологических баз (а также их последовательности в технологическом процессе), замена типа и способа получения исходной заготовки и другие.

Предложенная система оценок позволяет установить схемы проведения ФСА в зависимости от требований, предъявляемых к поверхностям контактного взаимодействия в процессе эксплуатации, которые регламентируются в соответствии с ГОСТ 2789-73 и 24642-81. При этом регламентация лишь частично определяет ЭС поверхности. Наиболее жесткая регламентация на стадии конструкторской разработки изделия не эффективна, так как ведет к увеличению затрат на производство, а иногда приводит к невозможности совместного получения регламентируемых параметров и требуемых ЭС в процессе изготовления.

Системно-структурный анализ, основывается на анализе контактного взаимодействия поверхностей деталей инструмента и построением структурных их схем. Основой которых является схема базирования и закрепления режущего элемента. По направлению силовых векторов  $P_x, P_y, P_z$  показываются элементы, которые воспринимают силовую нагрузку в рассматриваемом направлении. Начало цепи закрепления условно обозначено ветвью P. Ее силовой диапазон определяется силовыми характеристиками механизма зажима. В частности, для винтовых прижимов усилием винта, а для других конструкций, например силами упругости. Разработанный блочно-модульный токарный инструмент с двумя элементами контроля (ЭК) (рис. 6) имеет структурную схему, изображенную на рис. 7. Элементы контроля (ЭК<sub>1</sub> и ЭК<sub>2</sub>, рис. 7) измеряют составляющие силы резания  $P_y^{\parallel}$  и  $P_x^{\parallel}$ , входящие в формулы, предназначенные для определения сил, действующих на опорную поверхность контакта пла-

стины режущего элемента и державки, а также угловые и линейные перемещения режущей пластины.

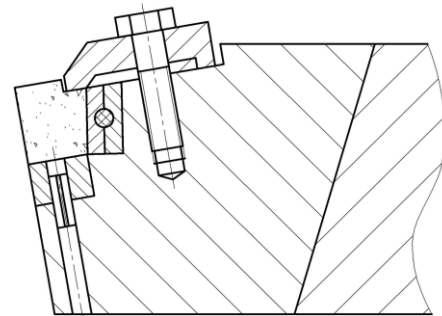


Рис. 6 – Эскиз блочно-модульного токарного резца с двумя ЭК

Для обеспечения ЭС блочного инструмента применяется системно-структурный анализ существующих конструкций, который позволяет классифицировать их элементы, условия внешнего и межэлементного воздействия, параметры качества поверхности и т.д.

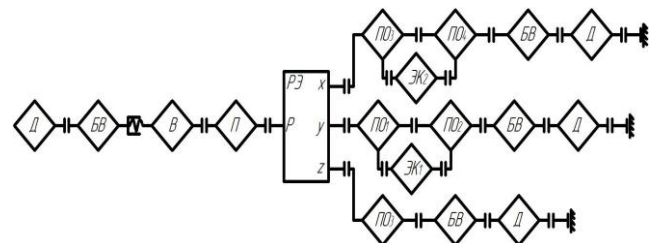


Рис. 7 – Структурная схема блочно-модульного токарного резца с двумя ЭК

Структурная схема блочно-модульного токарного резца представляет собой взвешенный граф (рис. 8). Граф является взвешенным, если его ребрам соот-

ветствуют вполне определенные весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты ребер графа присваиваются типам контактного взаимодействия поверхностей (табл. 3), а его вершинами являются детали блочных резцов (табл. 4). Рассматривая каждую ветвь структурной схемы блочного резца, при применении теории графов, ее можно описать с помощью кортежа вершин. При написании кортежей вершин считаем, что опорные пластины  $u_5$  и  $u_5^I$  идентичны, а элементы контроля  $u_9$  и  $u_9^I$  входят в этот узел, а также передача усилий происходит именно через этот элемент. Каждую ветвь структурной схемы на графе рассматриваем отдельно.

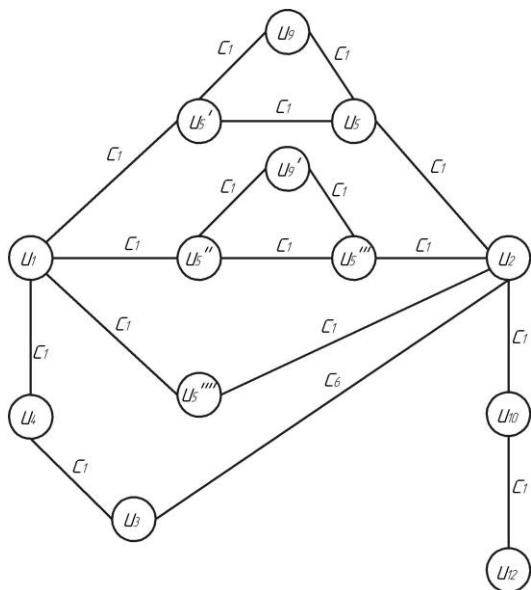


Рис. 8 – Взвешенный граф основных элементов и контактных взаимодействий блочных токарных резцов

Кортежи вершин, которые являются элементами структурных схем токарных блочно-модульных резцов, на взвешенном графе, соответствующие структурным схемам с выделением ветвей:

Ветвь Р (механизм закрепления элементов блочного резца):  $K_P = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_4, u_3, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$ . Ветвь Х (элементы резца, воспринимающие силу  $P_x$ ):  $K_X = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^I, u_9, u_5, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$ . Ветвь Y (элементы резца, воспринимающие силу  $P_y$ ):  $K_Y = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^{II}, u_9, u_5^{III}, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$ . Ветвь Z (элементы резца, воспринимающие силу  $P_z$ ):  $K_Z = K_{u1-u12} = \langle u_1, u_5^{III}, u_2, u_{10}, u_{12} \rangle$ .

Таблица 3 – Таблица вершин графа структурных схем токарных блочных резцов

№ п.п.	Название деталей токарных блочных резцов	Обозначение вершины графа
1	Режущий элемент (РЭ)	$u_1$
2	Блок-вставка (БВ)	$u_2$
3	Винт (В)	$u_3$
4	Прихват, прижим (П)	$u_4$
5	Пластины опорные (ПО)	$u_5$
...	.....	.....
9	Элемент контроля (ЭК)	$u_9$
10	Державка (Д)	$u_{10}$
11	Прочие элементы (Х)	$u_{11}$
12	Резцедержатель станка (РС)	$u_{12}$

Таблица 4 – Таблица весовых коэффициентов взвешенного графа, построенного по структурной схеме токарных блочно-модульных резцов

№ п.п.	Наименование поверхностей контактного взаимодействия деталей блочных резцов	Весовой коэффициент
1	Плоскость-плоскость	$c_1$
...	...	...
6	Винтовая	$c_6$
...	...	...
12	Другое	$c_{12}$

Для определения доминирующих контактных взаимодействий в конструкции блочных резцов применяются матрицы смежности (см. [1 - 3]). По матрицам смежности можно заключить при помощи каких типов контактных взаимодействий связаны (речь идет о весовых коэффициентах) друг с другом различные детали (элементы) блочно-модульных токарных резцов. Вершина графа, в которую приходит больше всего ребер, представляет собой деталь блочного резца, обладающая большим набором поверхностей, а следовательно, и большим набором ЭС, предъявляемым к этой детали.

Автором, в работах [1 - 3], рассмотрен выбор и обоснование КП состояния поверхностей блочных резцов.

*КП равномерного износа:* При изготовлении поверхностей деталей необходимо обеспечить такое состояние трущихся поверхностей, которое гарантировало бы минимальный износ при эксплуатации инструмента, а так же постоянство коэффициента трения. Минимальный линейный износ и стабильность коэффициента трения будет обеспечиваться в случае выполнения равенств:  $J_h \leq J, f_h \leq f$ . Решив которые таким образом, чтобы в правой части оказались параметры, зависящие от технологического обеспечения, а в левой те из них, на которые процесс обработки не оказывает влияния, получим:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^I (S_m - R_a)}$$

Величиной  $R_a$ , стоящей в знаменателе правой части можно пренебречь, так как при механических методах обработки они на два порядка меньше величины  $S_m$  (в формуле значение в микрометрах):  $\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K^I \cdot S_m}$ . Запишем левую часть данного уравнения в виде КП - И,

характеризующего условие равномерного износа в различных стадиях обработки:  $I = \frac{R_a}{K^I \cdot S_m}$ . Значение КП, обеспечивающего требуемое условие, определится из выражения:  $[I] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E}$ . Результаты эксперимента, описанного в [1 - 3], показывают что при выполнении условия  $I \leq [I]$  наблюдается меньший линейный износ и наиболее стабильное значение коэффициента трения.

*КП долговечности опорных пластин режущих пластин:* Одной из важных характеристик ин-

струментов является способность длительной работы их режущих пластин без разрушения, которые могут быть вызваны процессами усталости. После соответствующих преобразований выражений, аналогичных по смыслу предыдущим рассуждениям, но имеющих другую физическую сущность, которые решены его так, чтобы в правой части оказались параметры, формируемые при подготовке пластин, а в левой - не зависящие от технологического обеспечения:

$$\frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{K^1 \cdot S_{mv}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}.$$

Обозначим правую часть через КП -  $D_T$ , характеризующий снижение порога усталости в зависимости от качества подготовки опорных поверхностей режущих пластин:

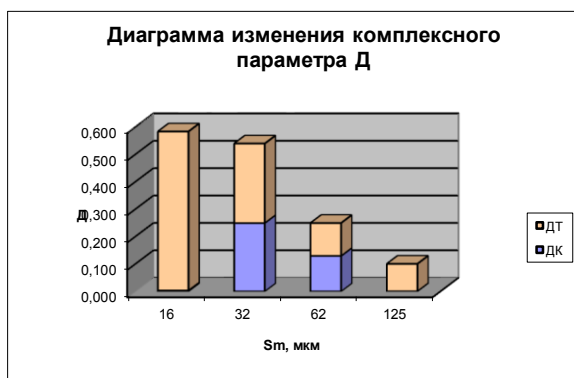
$$D_T = \frac{K^1 \cdot S_{mv}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}.$$

Левую часть обозначим  $D_K$  (конструктивное значение параметра):

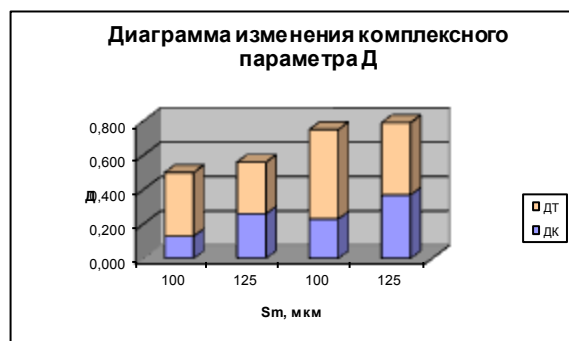
$$D_K = \frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right).$$

$$D_K = 0,1 \cdot \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right).$$

С целью проверки теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования. Результаты исследования параметров  $D_K$  и  $D_T$  приведены на рис. 9. При назначении данного КП всегда соблюдается соотношение  $D_K \leq D_T$ .



а



б

Рис. 9 – Диаграмма изменения комплексного параметра D: а – при изменении параметра  $S_m$ , при  $W_a = 5$  мкм,  $R_a = 0,63$  мкм; б – при изменении параметра  $S_m$ , при  $W_a = 5$  мкм,  $R_a = 2,50$  мкм

КП поверхностей деталей инструментов, работающих в упор: Необходимо стремиться создать состояние поверхности с минимально изменяющей свои параметры поверхностного слоя в процессе эксплуатации. Изменения параметров шероховатости, являющихся определяющими при оценке ЭС, будут минимальными при наступлении насыщения, которое определяется из условия:  $Y_{nl} \geq 0,9 \cdot R_p$ . Из теории контактного взаимодействия известно, что пластическая составляющая контактных перемещений равна:

$$Y_{nl} = \pi \cdot \left( \frac{2 \cdot P \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max}}{A \cdot K^1 \cdot \sigma_T} \right).$$

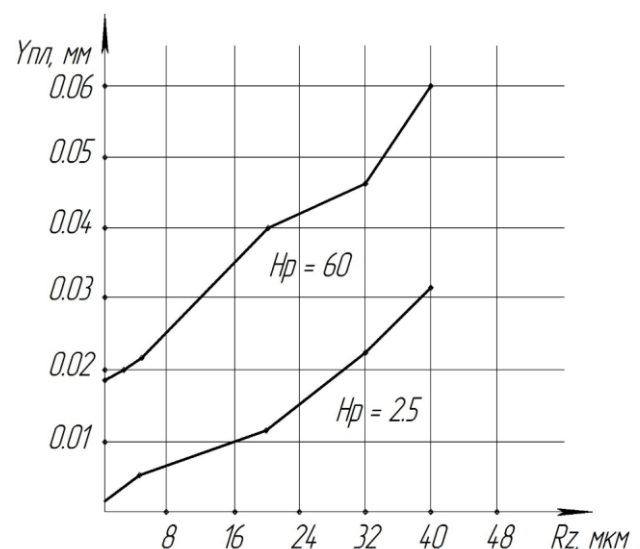
Подставим величины из первой формулы во вторую, заменив  $R_p \approx 3 \cdot R_a$  и выполнив преобразования так, чтобы в левой части оказались величины не зависящие от технологического обеспечения, а в правой - формируемые в ходе изготовления:

$$\frac{P}{A \cdot \sigma_T} \geq \frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}.$$

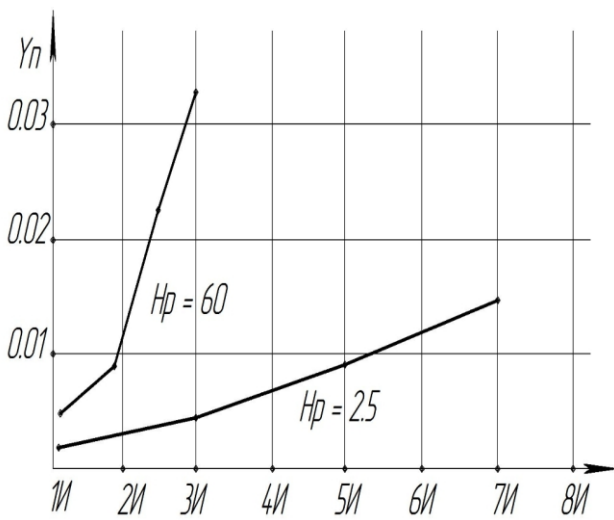
$$H = \frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{\max}}.$$

$$\text{Тогда: } H = \frac{P}{A \cdot \sigma_T}.$$

На рис. 10а показаны зависимости изменения величины линейного смещения вершины резца  $Y_n$  после 100 смен блока, что соответствует 1 минуте работы поверхностей в режиме износа при скорости движения 8 м/мин, при регламентации параметра И. На рис. 10б регламентация проводилась по параметру  $R_z$ . Проведенное исследование резцов показывают, что такие показатели, как линейный износ при одних и тех же регламентируемых параметрах состояния поверхностного слоя, имели меньшую дисперсию рассеяния при использовании предлагаемых рекомендаций, чем в случае традиционной методики регламентации состояния контактируемых поверхностей.



а



б

Рис. 10 – Величина линейного смещения вершины реза: а – традиционная методика регламентации качества поверхности, б – регламентация при помощи КП; ( $H_r$  – высота сглаживания макроотклонений, мкм)

#### Выводы.

1. Состояние контактирующих поверхностей деталей оказывает значительное влияние на ЭС блочно-модульных инструментов, в особенности, оснащенных ЭК, применение которых предполагает процесс роботизации и создания "безлюдных" систем металлорежущего оборудования;

2. С целью обеспечения надежности и долговечности блочно-модульного инструмента целесообразно использовать КП состояния, характеризующие ЭС контактирующих поверхностей их деталей;

3. Рекомендации по применению КП состояния контактирующих поверхностей деталей блочно-модульных резцов повышают качество изготавливаемого инструмента;

4. Применение ФСА технологического обеспечения ЭС контактирующих поверхностей позволяет уменьшить вероятность ошибки и минимизировать затраты на его изготовление;

5. В настоящее время качество поверхности регламентируется параметрами в соответствии с ГОСТ 2.308-2011, 2789-73, их применение обуславливает многокритериальную регламентацию качества поверхности.

**Кравцов Алексей Николаевич** – аспирант каф. «Технологии машиностроения» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия), тел.: +7 (912)-2623576, E-mail: zao-oniks@yandex.ru.

6. Разработанная методика ФСА обеспечивает получение рекомендуемых КП состояния, при сохранении традиционных подходов к регламентации поверхности;

7. Решение задачи определения плотности вероятности для нескольких случайных величин и применение модели, использующей статистические данные, позволяет использовать методика ФСА для выработки решений по выбору метода обработки при обеспечении заданных ЭС;

8. Применение моделирования и формализация задачи открывает возможности использования ЭВМ для решения задач технологического обеспечения деталей блочно-модульных инструментов.

Результаты работы дают предпосылки для развития теоретических основ по технологическому обеспечению поверхностей с прогнозируемыми изменениями показателей, характеризующих ЭС.

**Список литературы:** 1. Мироненко Е.В. Проектирование блочно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков [Текст] / Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2. Соломенцев Ю.М. Моделирование и оптимизация технологических процессов механической обработки [Текст] / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, О.И. Драчев, А.В. Капитанов, А.Н. Кравцов / Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Волгоград: ВолгГТУ; Тольятти: ОНИКС, 2013 – 457 с.: ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Общ. ред. Ю.М. Соломенцева). 3. Клочко А.А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А.А. Клочко, А.Н. Кравцов / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 293 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев).

**Bibliography (transliterated):** 1. Mironenko E.V., Kravcov A.N. *Proektirovanie blochno-modul'nyh instrumentov dlja tjazhelyh tokarnyh stankov*. Kramators – Irbit: DGMA – ONIKS, 2014. 299 p. Print. 2. Solomencev Ju.M., Mitrofanov V.G., Drachev O.I., Kapitanov A.V., Kravcov A.N. *Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov mehanicheskoy obrabotki*. Volgograd – Tol'jatti: VolgGTU – ONIKS, 2013. 457 p. Print. 3. Klochko A.A., Kravcov A.N. *Tehnologicheskoe osnovy obespechenija processa zuboobrabotki zakalennyh krupnomodul'nyh zubchatyh koles*. Kramators – Irbit: DGMA – ONIKS, 2014. 293 p. Print.

Поступила (received) 02.03.2015