

УДК 621.9

А. Н. Жигалов

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИЗНОСА И РЕСУРСНОЙ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Приведены математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего инструмента, позволяющие оперативно, с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результат. Могут быть использованы при исследовании и других статистических процессов. Результаты исследований твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, с помощью разработанной математической модели и методики подтвердили эффективность такого метода упрочнения.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего инструмента.

Табл. 3. Рис. 2. Библиогр.: 6 назв.

A. N. Jigalov

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL AND METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF RUN-OUT AND RESOURCE DURABILITY OF CUTTING HARDWARE TOOL HARDENED BY AERODYNAMIC SOUND METHOD

The mathematical model and the method of parametric optimization of the cutting tool's resource durability are presented. They allow to obtain the result quickly with minimal expenses on the experimental and computational parts of research. They can be used to study other statistical processes. The results of research of hardware tool that is hardened by the aerodynamic sound method using the suggested mathematical model and method confirmed the effectiveness of such a method of hardening.

Key words: method of aerodynamic sound hardening; mathematical model and method of parametric optimization of resource durability of the cutting tool.

Tab. 3. Fig. 2. Ref.: 6 titles.

Введение. Созданный метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1] твердосплавного инструмента, предназначенного для работы в условиях прерывистого резания со значительными ударными нагрузками, способен с небольшой добавленной стоимостью существенно улучшать стойкостные характеристики твердосплавного инструмента (до 3,7 раза), за счет повышения ударной вязкости до 90 КДж / м² и предела прочности при изгибе до 2 230 Н / мм² при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15 · 10³ кг / см³ [2]. Метод АДУ является новым и практически не изученным. Для ускорения реализации нового наукоемкого процесса необходимо с максимальной быстротой произвести его всестороннее изучение, оперативно выявить влияние технологических и физических параметров процесса на качество обработки и на структурные свойства инструмента, с помощью которого реализуется такой процесс. Описать взаимосвязи большого

количества факторов, влияющих на такие явления, на стадии создания является сложной задачей из-за неизученности процесса, отсутствия теоретической информации о нем. Это является главным сдерживающим фактором внедрения новых технологий в производство [3].

В данной работе предложена математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, основанные на учете экспериментальных значений результатов износа и математически описываемых комбинированных связей исследуемых параметров, что позволяет осуществлять прогнозирование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих достижение максимальной ресурсной стойкости режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, на стадии подготовки производства.

Основная часть. Аппроксимация частных зависимостей износа инструмента от режимов резания может быть выполнена на основе различных методов математической обработки и выражена различными по виду и структуре математическими уравнениями [4]. Количественной оценкой износа режущего лезвия от времени может служить линейная или массовая мера износа. Кривые линейного износа режущего лезвия по задней поверхности h_3 от времени резания τ возможно аппроксимировать степенными функциями вида [5; 6]

$$h_3 = a \cdot \tau^{n_0}, \quad (1)$$

где a — постоянная величина, характеризующая интенсивность износа от времени (показатель абсолютной величины износа);

n_0 — постоянная величина, представляющая собой в логарифмических координатах тангенс угла наклона кривой, описывающей зависимость износа от времени, — показатель интенсивности величины износа.

Показатели a и n_0 связывают между собой величину износа h_3 от времени τ . После логарифмирования уравнения (1), имеем

$$\lg h_3 = \lg a + n_0 \lg \tau. \quad (2)$$

В зависимости (2) показатель относительной стойкости n_0 равен тангенсу угла α наклона прямой линии полученной из кривой износа, построенной в логарифмической системе

$$n_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i} - h_{3_1}}{\tau_i - \tau_1}. \quad (3)$$

где h_{3_i} и h_{3_1} — значения износа в логарифмической системе координат в i -й и первой точках соответственно;

τ_i и τ_1 — значения времени в логарифмической системе координат в i -й и первой точках соответственно.

Коэффициент a из (1) определяется как

$$a = \frac{h_{3_i}}{2\tau_i^{n_0}} + \frac{h_{3_1}}{2\tau_1^{n_0}}. \quad (4)$$

Показатели a и n_0 в формулах (3—4) в зависимости от режимов обработки представим в виде квадратичных функций. На кривую износа от времени наиболее хорошо ложится линия тренда, описываемая полиномом 2-й степени. Исходя из чего, для уровней варьирования скоростей резания (нижний — v_1 , основной — v_2 (центр плана) и верхний — v_3 при интервале варьирования: $v_1—v_3$) из диапазона скоростей, принятых в исследованиях, система уравнений, описывающих показатели износа по задней поверхности $a_{v_1}, a_{v_2}, a_{v_3}$, при v_1, v_2 и v_3 соответственно, от скоростей, будет равна

$$a_{v_1} = a_{a_v} v_1^2 + b_{a_v} v_1 + c_{a_v}; \quad (5)$$

$$a_{v_2} = a_{a_v} v_2^2 + b_{a_v} v_2 + c_{a_v}; \quad (6)$$

$$a_{v_3} = a_{a_v} v_3^2 + b_{a_v} v_3 + c_{a_v}, \quad (7)$$

где a_{a_v} — коэффициент, описывающий влияние v^2 ;

b_{a_v} — коэффициент, описывающий влияние v ;

c_{a_v} — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 и v .

Для скоростей резания v_1, v_2, v_3 и принятого диапазона вариации скоростей система уравнений, описывающих показатель n_v от скоростей, будет равна

$$n_{v_1} = a_{n_v} v_1^2 + b_{n_v} v_1 + c_{n_v}; \quad (8)$$

$$n_{v_2} = a_{n_v} v_2^2 + b_{n_v} v_2 + c_{n_v}; \quad (9)$$

$$n_{v_3} = a_{n_v} v_3^2 + b_{n_v} v_3 + c_{n_v}, \quad (10)$$

где $n_{v_1}, n_{v_2}, n_{v_3}$ — показатель n_v при v_1, v_2 и v_3 соответственно;

a_{n_v} — коэффициент, описывающий влияние v^2 ;

b_{n_v} — коэффициент, описывающий влияние v ;

c_{n_v} — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 и v .

Из уравнения (5) находим коэффициент c_{a_v}

$$c_{a_v} = a_{v_1} - a_{a_v} v_1^2 - b_{a_v} v_1. \quad (11)$$

Из уравнений (6) и (11) находим коэффициент b_{a_v}

$$b_{a_v} = \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_{a_v} (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (12)$$

Из уравнений (7), (11) и (12) находим коэффициент a_{a_v}

$$a_{a_v} = \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (13)$$

Тогда с учетом уравнений (11—13) показатель a_v равен

$$a_v = \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{a_v}. \quad (14)$$

Из уравнения (8) находим коэффициент c_{n_v}

$$c_{n_v} = n_{v_1} - a_{n_v} v_1^2 - b_{n_v} v_1. \quad (15)$$

Из уравнений (9) и (15) находим коэффициент b_{n_v}

$$b_{n_v} = \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - a_{n_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (16)$$

Из уравнений (10), (15) и (16) находим коэффициент a_{n_v}

$$a_{n_v} = \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (17)$$

Тогда с учетом уравнений (15—17) показатель износа n_v равен

$$n_v = \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{n_v}.$$

Аналогично тому, как определяли показатели a_v и n_v при вариации скоростей, определяем показатели a_s , n_s и их коэффициенты при вариации подачи

$$c_{a_s} = a_{s_1} - a_{a_s} s_1^2 - b_{a_s} s_1; \quad b_{a_s} = \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_{a_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1};$$

$$a_{a_s} = \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)};$$

$$a_s = \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{a_s}; \quad (18)$$

$$c_{n_s} = n_{s_1} - a_{n_s} s_1^2 - b_{n_s} s_1; \quad b_{n_s} = \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - a_{n_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1};$$

$$a_{n_s} = \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)};$$

$$n_s = \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - n_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{n_s}.$$

Показатели a_t , n_t и их коэффициенты при вариации глубины резания

$$c_{a_t} = a_{t_1} - a_{a_t} t_1^2 - b_{a_t} t_1; b_{a_t} = \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_{a_t} (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1};$$

$$a_{a_t} = \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)};$$

$$a_t = \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{a_t}; \quad (19)$$

$$c_{n_t} = n_{t_1} - a_{n_t} t_1^2 - b_{n_t} t_1; b_{n_t} = \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - a_{n_t} (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1};$$

$$a_{n_t} = \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)};$$

$$n_t = \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{n_t}.$$

Суммируя a_v , a_s , a_t , определяем величину износа a_c от v , s , t

$$a_c = a_v + a_s + a_t + c_1, \quad (20)$$

где c_1 — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 , v , s^2 , s , t^2 , t .

Показатель износа a_c , зависящий от трех факторов v , s , t , также можно описать квадратичной функцией от этих факторов.

С учетом найденных значений a_v , a_s , a_t , согласно (20), (14), (18), (19) и пренебрегая коэффициентами c_{a_v} , c_{a_s} , c_{a_t} в связи с тем, что их влияние нивелируется коэффициентом c_1 , величина износа a_c при нулевом уровне будет равна

$$\begin{aligned}
a_c = & \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + \\
& + \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + \\
& + \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_1.
\end{aligned} \quad (21)$$

Коэффициент c_1 найдем из условия (21) для центра плана

$$\begin{aligned}
c_1 = a_{c_2} - & \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\
& - \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.
\end{aligned} \quad (22)$$

Аналогично (21) и (22) для трехфакторных расчетов определяем n_c и c_2 .

$$\begin{aligned}
n_c = & \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + \\
& + \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - n_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + \\
& + \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_2;
\end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
c_2 = n_{c_2} - & \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\
& - \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - n_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.
\end{aligned} \quad (24)$$

Определим стойкость T как функцию $T = f(v, s, t)$ при h_3 , равном величине допустимого износа $h_{3\text{доп}} = a\tau^n$. Тогда стойкость, величина равная времени от начала резания до отказа, т. е. при $\tau = T$, будет равна

$$T = \left(\frac{h_{3\text{доп}}}{a_c} \right)^{\frac{1}{n_c}}. \quad (25)$$

С учетом (21—25) определяем значения стойкости от скорости T_v , подачи T_s и глубины резания T_t при принятых при моделировании уровнях варьирования: скоростей резания — v_1, v_2, v_3 ; подач — s_1, s_2, s_3 ; глубин резания — t_1, t_2, t_3 .

Значение $h_{3\text{доп}}$ принимаем равным 0,6 мм — это рекомендованный допустимый износ для твердых сплавов при обработке сталей, т. е. $h_{3\text{доп}} = 0,6$ мм. Для обработки чугунов $h_{3\text{доп}} = 0,8$ мм. Для твердых сплавов, упроченных методом АДУ, допустимая износостойкость увеличивается на 40...50 %. В связи с чем T_{v_1} равна

$$T_{v_1} = \left(\frac{0,6}{a_{c_{v_1}}} \right)^{\frac{1}{n_{c_{v_1}}}}. \quad (26)$$

В (26) значения $a_{c_{v_1}}$ и $n_{c_{v_1}}$ определяются, соответственно, по формулам (21) и (23) при скорости резания, соответствующей нижнему уровню варьирования скоростей, т. е. при v_1 , подачи и глубины резания, соответствующих основным уровням варьирования, т. е. при s_2 и t_2 . Тогда для (26) имеем

$$T_{v_1} = 0,6 / \left(\begin{array}{l} \left(\frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 + \right. \\ \left. + \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_1 + \right. \\ \left. + \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_1 + c_{1_{v_1}} \right)^{\frac{1}{n_{c_{v_1}}}} \quad (27) \end{array} \right)$$

где $n_{c_{v_1}}$, c_1 и $c_{1_{v_1}}$ равны

$$n_{c_{v_1}} = \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_1^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 +$$

$$+ n_{c_2} - \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2.$$

$$\begin{aligned}
c_1 = a_{c_2} & - \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\
& - \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2. \\
c_{1_{v_1}} = a_{c_2} & - \frac{(a_{v_3} - a_{v_1}) - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v_3 - v_1)}{v_3^2 - v_1^2} v_1^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 - \\
& - \frac{(a_{s_3} - a_{s_1}) - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s_3 - s_1)}{s_3^2 - s_1^2} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(a_{t_3} - a_{t_1}) - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t_3 - t_1)}{t_3^2 - t_1^2} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.
\end{aligned}$$

Аналогично, как определяли T_{v_1} , определяем T_{v_2} и T_{v_3} . Из-за громоздкости расчетов результаты T_{v_2} и T_{v_3} не приводим. Принимаем, что стойкость связана с режимами обработки квадратичной функцией. Тогда, для уровней варьирования скоростей резания (нижний — v_1 , основной — v_2 (центр плана) и верхний — v_3) система уравнений, описывающих влияние стойкости T_v от скоростей резания, будет равна

$$T_{v_1} = a_{T_v} v_1^2 + b_{T_v} v_1 + c_{T_v}; \quad (28)$$

$$T_{v_2} = a_{T_v} v_2^2 + b_{T_v} v_2 + c_{T_v}; \quad (29)$$

$$T_{v_3} = a_{T_v} v_3^2 + b_{T_v} v_3 + c_{T_v}, \quad (30)$$

где $T_{v_1}, T_{v_2}, T_{v_3}$ — стойкость соответственно при v_1, v_2 и v_3 .

Из уравнения (28) находим коэффициент c_{T_v}

$$c_{T_v} = T_{v_1} - a_{T_v} v_1^2 - b_{T_v} v_1. \quad (31)$$

Из уравнений (29) и (31) находим коэффициент b_{c_v}

$$b_{c_v} = \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v} (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (32)$$

Из уравнений (30), (31) и (32) находим коэффициент a_{c_v}

$$a_{c_v} = \frac{(T_{v_2} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_3} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (33)$$

Тогда с учетом (31), (32), (33) стойкость T_v равна

$$T_v = \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{T_v}. \quad (34)$$

Аналогично определяем T_s и T_t

$$T_s = \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{T_s}. \quad (35)$$

$$T_t = \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{T_t}. \quad (36)$$

Суммируя T_v, T_s, T_t , определяем величину износа T от v, s, t

$$T_c = T_v + T_s + T_t + c_T, \quad (37)$$

где c_T — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2, v, s^2, s, t^2, t .

Из (21) для центра плана определим коэффициент c_T как

$$c_T = T_{v_2} - \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - T_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\ - \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - T_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\ - \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - T_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2. \quad (38)$$

Следует отметить, что при фрезерно-карусельном резании, когда подача s_z носит переменный характер, наиболее эффективным параметром, характеризующим состояние инструмента, является его ресурсная стойкость, т. е. способность инструмента произвести определенное количество годной продукции. При этом ресурсную стойкость T_p можно определить через стойкость T в виде [4]

$$T_p = 10^{-3} T_{v_s}. \quad (39)$$

Тогда с учетом (34—39) зависимость, описывающая ресурсную стойкость режущего инструмента T_p от параметров обработки v, s, t , равна

$$T_p = 10^{-3} v s \left[\frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} (v^2 + v_2^2) + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v + v_2) + \right. \\ \left. + \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} (s^2 + s_2^2) + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s + s_2) + \right. \\ \left. + \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} (t^2 + t_2^2) + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t + t_2) - T_{v_2} \right]. \quad (40)$$

Исходя из большого количества входящих в зависимости (39) и (40) факторов и сопутствующих коэффициентов, производить расчеты ресурсной стойкости T_p и износа по задней поверхности h_3 аналитическим образом довольно трудоемко и непроизводительно. Для автоматизации и ускорения расчетов на базе приведенных выше математических выкладок для определения износа h_3 и ресурсной стойкости T_p режущего инструмента при фрезеровании разработана блок-схема алгоритма, для которого создана компьютерная программа определения зависимостей износа и стойкости от параметров обработки для процесса резания.

На основе разработанной математической модели создана методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, с помощью которых проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурсной стойкости для твердого сплава MC111, неупрочненного и упрочненного методом АДУ, от комплексного влияния режимом резания. Сплавами MC111 обрабатывали заготовки из стали 45 на определенных режимах (таблица 1). Замеры износа по задней поверхности h_3 осуществляли на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм. В таблице 1 приведены результаты для сплава MC111, упрочненного методом АДУ, расчетов всех составляющих, входящих в математическую модель, с указанием алгоритмических действий в соответствии с методикой параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента.

Т а б л и ц а 1. — Методика расчета ресурсной стойкости твердосплавных пластин MC111 упрочненных методом АДУ от режимов обработки (скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t) при обработке стали 45

Экспериментальные результаты				Теоретические результаты							
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$ и определение коэффициентов a, n											
Определение коэффициентов a и n от режимов резания v, s, t в виде степенной функции $h_3 = at^n$ и определение коэффициентов a, n											
Представление зависимости износа и интенсивности износа от скорости резания (м / мин) в виде квадратичных функций $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$, определение коэффициентов $a_{av}, b_{av}, c_{av}, a_{nv}, b_{nv}, c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
№	Параметры обработки		Износ h_3 , мм			Расчетные коэффициенты					
	Постоянные	Изменяющиеся									
	Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин										
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,13	1,0	124,6			0,118			-0,00002567	0,00850895	-0,54365016

Продолжение таблицы 1

	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v	
1	0,13	1,0		158,3			0,160		-0,00002567	0,00850895	-0,54365016	
7	0,13	1,0			197,8			0,135	-0,00002567	0,00850895	-0,54365016	
Результат		$a_v = -0,00002567v^2 + 0,00850895v - 0,54365016$										
Определение n_v при С												
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v	
2	0,13	1,0	124,6			0,295			0,0000915	-0,28368	2,409614	
1	0,13	1,0		158,3			0,211		0,0000915	-0,28368	2,409614	
7	0,13	1,0			197,8			0,377	0,0000915	-0,28368	2,409614	
Результат		$n_v = 0,0000915v^2 - 0,283685v + 2,409614$										
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб												
	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v	
5	158,3	1,0	0,11			0,115			-16,4871795	6,206923	-0,368267	
1	158,3	1,0		0,13			0,160		-16,4871795	6,206923	-0,368267	
6	158,3	1,0			0,26			0,131	-16,4871795	6,206923	-0,368267	
Результат		$a_s = -16,4871795s^2 + 6,206923s - 0,368267$										
Определение n_v при С												
	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v	
5	158,3	1,0	0,11			0,370			58,1794872	-21,913077	2,07647	
1	158,3	1,0		0,13			0,211		58,1794872	-21,913077	2,07647	
6	158,3	1,0			0,26			0,312	58,1794872	-21,913077	2,07647	
Результат		$n_s = 58,179487s^2 - 21,913077s + 2,07647$										
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм												
	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t	
4	158,3	0,13	0,5			0,135			-0,096	0,194	0,062	
1	158,3	0,13		1,0			0,160		-0,096	0,194	0,062	
3	158,3	0,13			1,5			0,137	-0,096	0,194	0,062	
Результат		$a_t = -0,096t^2 + 0,194t + 0,062$										
Определение n_v при С												
	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t	
4	158,3	0,13	0,5			0,266			0,214	-0,431	0,428	
1	158,3	0,13		1,0			0,211		0,214	-0,431	0,428	
3	158,3	0,13			1,5			0,263	0,214	-0,431	0,428	
Результат		$n_t = 0,214t^2 - 0,431t + 0,428$										
Представление зависимости износа от многофакторных показателей — скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t , в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + a_{av}s^2 + b_{av}s + a_{av}t^2 + b_{av}t + c_1$ и определение коэффициента c_1 для центра плана												
$C_1 = 0,160 - 0,00003 \cdot 158,3^2 + 0,00851 \cdot 158,3 - 16,48718 \cdot 0,13^2 + 6,20692 \cdot 0,13 - 0,096 \cdot 1,0^2 + 0,194 \cdot 1,0 = -1,17$												
$C_2 = 0,211 - 0,00009 \cdot 158,3^2 + 0,28368 \cdot 158,3 + 58,17949 \cdot 0,13^2 - 21,9131 \cdot 0,13 + 0,214 \cdot 1,0^2 - 0,431 \cdot 1,0 = -4,49$												
Представление зависимости износа от скорости резания в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и определение коэффициентов при вариации скорости v , м / мин												
Определяем зависимость стойкости от v, s, t , как $T = f(v, s, t)$ при заданном значении h_3												
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин												
	s	t	τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	a_v	b_v	c_v	
2	0,13	1,0	124,6						247,818			
									τ_{v1}	-0,27619	86,37197	-6226,25577

Окончание таблицы 1

	s	t	T_{V1}	T_{V2}	T_{V3}	T_{V1}	T_{V2}	T_{V3}	a_v	b_v	
1	0,13	1,0		158,3		525,445	T_{V2}				
7	0,13	1,0			197,8	52,282	T_{V3}				
Результат		$a_v = -0,27619v^2 + 86,37197v - 6226,25577$									
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
	v	t	s_1	s_2	s_3	T_{s1}	T_{s2}	T_{s3}	a_n	b_n	c_v
5	158,3	1,0	0,11			86,909		T_{s1}	-166392,2891	61860,96854	-4704,45114
1	158,3	1,0		0,13		525,445		T_{s2}			
6	158,3	1,0			0,26	131,282		T_{s3}			
Результат		$a_s = -166392,2891s^2 + 61860,968539s - 4704,45114$									
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
	v	s	t_1	t_2	t_3	T_{t1}	T_{t2}	T_{t3}	a_t	b_t	c_t
4	158,3	0,13	0,5			272,524		T_{t1}	-1007,28099	2016,76452	-484,03844
1	158,3	0,13		1,0		525,445		T_{t2}			
3	158,3	0,13			1,5	274,726		T_{t3}			
Результат		$a_t = -1007,28099s^2 + 2016,76452s - 484,03844$									
При среднем опыте											
	v	s	t	t_1	t_2	t_3	$h_{зт1}$	$h_{зт3}$	a_t	b_t	c_t
	158,3	0,13	1,0				525,445				-12465,6355
Стойкость упрочненной АДУ пластины МС111											
$T_y = -0,277 \cdot v^2 + 86,37 \cdot v - 166392,29 \cdot s^2 + 61860,97 \cdot s - 1007,28 \cdot t^2 + 2016,76 \cdot t - 12465,64$											

Аналогично расчетам таблицы 1 определены зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p для сплава МС111 неупрочненного (таблица 2).

Т а б л и ц а 2. — Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p для сплавов МС111, МС131, В35, неупрочненных и упрочненных методом АДУ

Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p	
сплав МС111н	
$h_{3,н} = a \cdot t^n$, где	
$a = -0,0000005v^2 - 0,00031v - 1,51282s^2 + 0,71308s + 0,00000001t^2 + 0,3t + 0,138$;	
$n = -0,000041v^2 - 0,00966v + 4,564103s^2 - 1,595385s + 0,0004t^2 + 0,044t + 1,067$;	
$T_{p,н} = 10^{-3} vs (-0,003v^2 + 0,74v - 176,2s^2 + 14,7s + 0,1t^2 - 3,6t - 16,2)$	

Анализ зависимостей (таблицы 1 и 2) показывает, что наибольшее влияние на износ h_3 и стойкости (T и T_p) оказывает подача, затем скорость резания v , наименьшее влияние оказывает глубина резания t .

Оптимальные значения параметров резания определялись путем компьютерного моделирования на базе полученных зависимостей (см. таблицы 1 и 2). Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях неприемлема в связи с достаточно высокой степенью взаимного влияния исследуемых параметров. На рисунке 1 приведена графическая интерпретация зависимостей ресурсной стойкости (из таблицы 1 и 2) для твердосплавных пластин РНУА-110408 ГОСТ 19064-80 сплава МС111, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке стали 45.

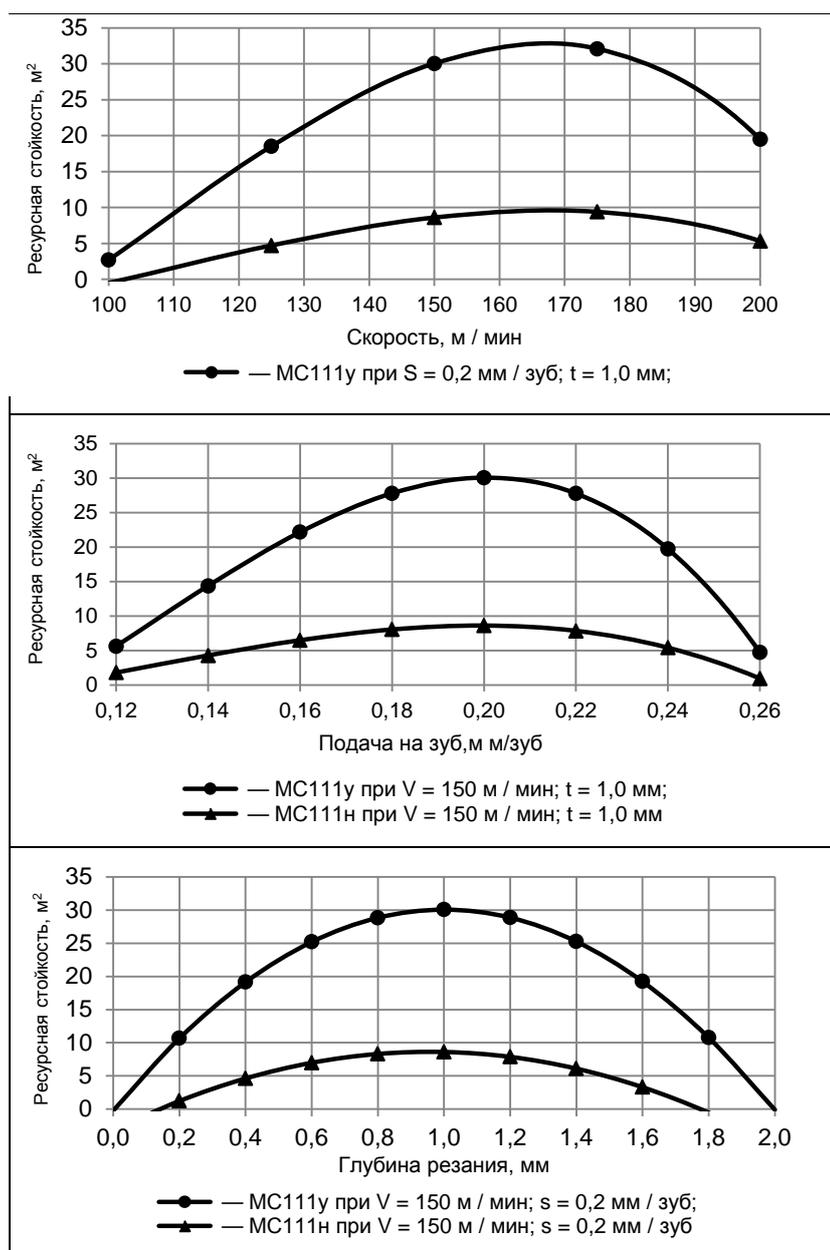


Рисунок 1 — Зависимости ресурсной стойкости для пластин PNUA-110408 сплава MC111 при фрезеровании стали 45

После компьютерного моделирования зависимостей ресурсной стойкости найдены оптимальные значения подачи s , скорости v и глубины резания t , при которых обеспечивается максимальная ресурсная стойкость (таблица 3).

Т а б л и ц а 3. — Оптимальные значения параметров процесса фрезерования стали 45 пластинами MC111, неупрочненными и упрочненными методом АДУ, для достижения максимальной ресурсной стойкости T_p .

Параметры	Неупрочненного	Упрочненного АДУ	Рост, %
$V_{\text{опт}}$, м / мин	155	160	+ 3,2 %
$s_{\text{опт}}$, мм / зуб	0,18	0,19	+ 5,6 %
$t_{\text{опт}}$, мм	1,0	1,0	0
T_p , м²	8,47	31,61	+ 273 %

На рисунке 2 приведены графические интерпретации полученных зависимостей ресурсной стойкости T_p для твердосплавных пластин PNUA-110408, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке стали 45 от двух технологических параметров при постоянном значении третьего.

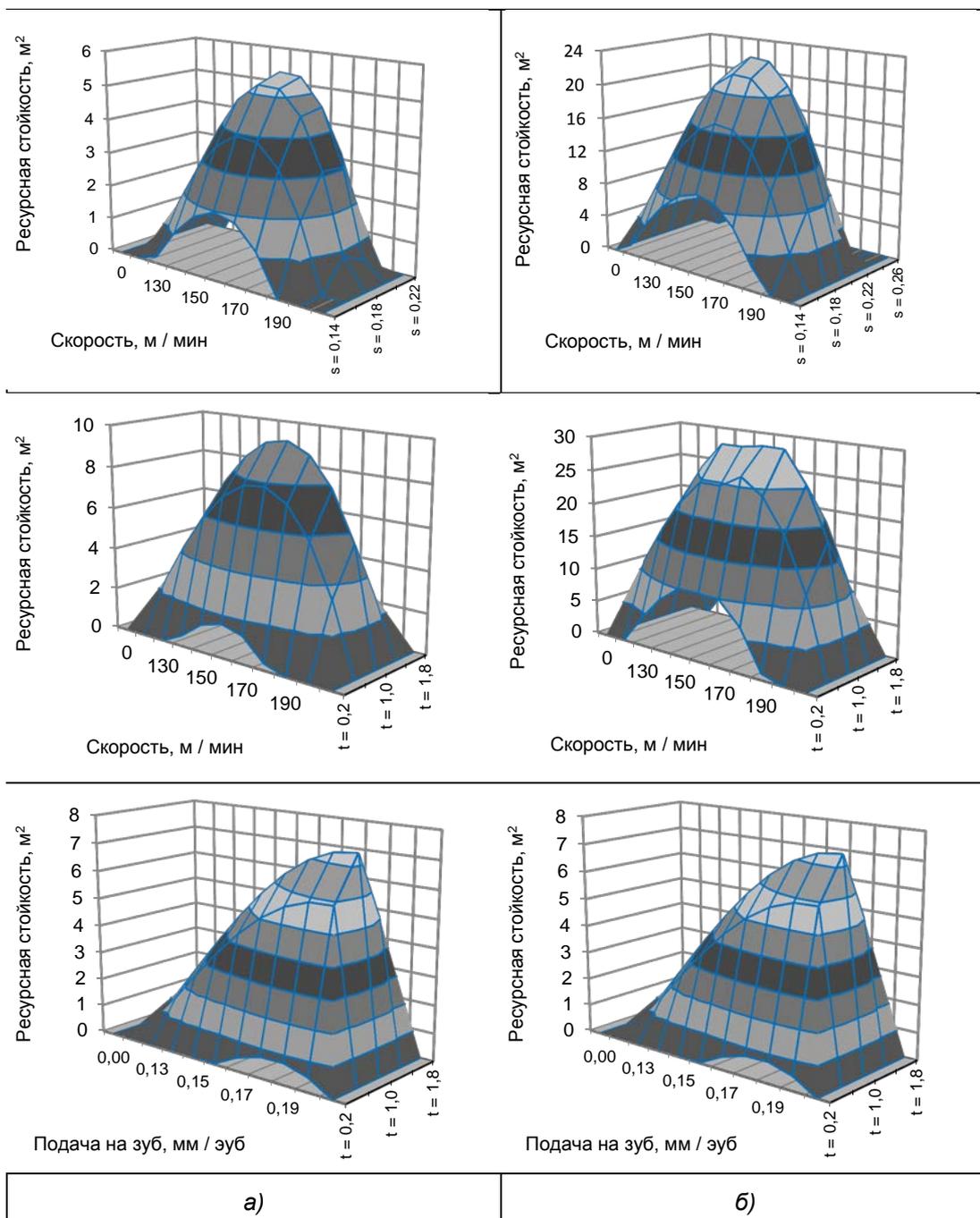


Рисунок 2. — Зависимости ресурсной стойкости при фрезеровании стали 45 пластинами PNUA-110408 сплава MC111, неупрочненными (а) и упрочненными АДУ (б), от комплексного влияния параметров обработки v , s , t

Заключение. Разработанная математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента для функционально-ориентированного технологического процесса резания, в основу которой заложены новые подходы в математическом моделировании статистических процессов, позволяют оперативно с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результаты, которые также могут быть использованы при исследовании и других статистических процессов. Применение указанной математической модели и методики параметрической оптимизации показало, что при обработке твердым сплавом MC111, упрочненным АДУ, наблюдается повышение ресурсной стойкости в 2,7 раза и производительности обработки на 5,6 % по сравнению с обработкой неупрочненным сплавом.

Список цитируемых источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. — № а 20131132; заявл. 30.09.2013 ; опубл. 30.06.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2017. — № 3. — С. 98.
2. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 31 / под ред. В. К. Шелега. — Минск : БНТУ, 2018. — С. 37—48.
3. Жигалов, А. Н. Моделирование процесса резания твердосплавным инструментом, упрочненным аэродинамическим воздействием, в программном продукте DEFORM / А. Н. Жигалов // Современные проблемы машиностроения (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22—23 нояб. 2018 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. — Гомель, 2018. — С. 94—96.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.
5. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. — Минск : Высш. шк., 1990. — 512 с.
6. Шатуров, Д. Г. Методика исследования технологических параметров через полином второй степени / Д. Г. Шатуров, А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27—28 мая 2019 г. — Брест : БрГТУ, 2019. — С. 117—120.

Поступил в редакцию 17.05.2019