

УДК 621.9

А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗНОСА И РЕСУРСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА СПЛАВА В35, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

С использованием разработанной математической модели и методики параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента установлено, что при обработке металлорежущими твердосплавными пластинами сплава В35, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, при прерывистом фрезеровании чугуна СЧ20 на оптимальных режимах резания со значениями $v = 146,5$ м / мин, $s_z = 0,09$ мм / зуб, $t = 3,1$ мм ресурс инструмента повышается на 209 %. Метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для увеличения производительности обработки.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; износ; ресурс металлорежущих твердосплавных пластин В35.

Рис. 3. Табл. 5. Библиогр.: 5 назв.

A. N. Jigalov, I. A. Goravskii, D. D. Bogdan

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

OPTIMIZATION OF THE WEAR AND RESOURCE OF A METAL-CUTTING CARBIDE TOOL OF B35 ALLOY STRENGTHENED BY THE AERODYNAMIC SOUND METHOD

By the use of the developed mathematical model and the method of parametric optimization of wear and resource of a metal-cutting tool, it was found out that at operating a metal-cutting carbide inserts of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method, by intermittent milling of GC20 cast iron at optimal cutting conditions equal to $v = 146.5$ m / min, $s_z = 0.09$ mm / tooth, $t = 3.1$ mm, the tool's resource is increased by 209 %. The method of aerodynamic sound hardening is recommended not only to increase the resource of metal-cutting carbide tools used in intermittent cutting processes, but also to increase the productivity of processing.

Keywords: method of aerodynamic sound hardening; wear; resource of metal-cutting carbide inserts B35.

Fig. 3. Table 5. Ref.: 5 titles.

Введение. Созданный метод АДУ [1] металлорежущего твердосплавного инструмента способен с небольшой добавленной стоимостью обеспечивать повышение ударной вязкости до 90 КДж / м² и предела прочности при изгибе до 2 230 Мпа при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15·10³ кг / см³. Наиболее эффективен метод АДУ инструмента, работающего при процессах прерывистого резания [1—3].

Для ускоренного исследования эффективности нового наукоемкого метода АДУ разработаны математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, упрочненного методом АДУ, позволяющие установить

оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышенный ресурс инструмента [4].

При процессе фрезерно-карусельного резания, являющегося типичным представителем прерывистого резания, подача носит переменный характер, в результате чего наиболее эффективным параметром, характеризующим состояние инструмента, является его ресурсная стойкость, т. е. способность инструмента произвести определенное количество годной продукции. Ресурс режущего инструмента T_p зависит от стойкости T инструмента, скорости резания v и подачи s [5] и вычисляется по формуле

$$T_p = 10^{-3} Tvs. \quad (1)$$

В работе [5] установлено, что с учетом (1) зависимость, описывающая ресурс режущего инструмента T_p от параметров обработки v, s, t , равна

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

В зависимость (2) для расчета ресурсной стойкости T_p входит большое количество факторов и сопутствующих коэффициентов, в связи с чем производить расчеты аналитическим способом довольно трудоемко и непроизводительно. Для автоматизации и ускорения расчетов для определения износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p режущего инструмента при фрезеровании разработана блок-схема алгоритма метода параметрической оптимизации ресурса металлорежущего инструмента.

Разработанные математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, отличающиеся установлением связей между износом, зависящим от технологических режимов резания в виде степенных зависимостей, величинами стойкостей, описываемых от однофакторных и многофакторных параметров резания в виде квадратичных функций второй степени, и ресурсом инструмента, связанным с режимами резания и стойкостями, определяемых в пределах устанавливаемых вариаций режимов резания, позволяют устанавливать оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышение ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ.

Кроме того, предложенная методика параметрической оптимизации износа и ресурса инструмента для функционально ориентированного технологического процесса резания, в основу которой заложены новые подходы в математическом моделировании статистических процессов, позволяет оперативно и с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результат. Данная методика, разработанная для исследования влияния метода АДУ на технологические параметры процесса резания, может также быть использована при исследовании и других статистических процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. С использованием разработанной математической модели и применением компьютерной обработки проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурса металлорежущего инструмента из твердого сплава В35, неупрочненного и упрочненного методом АДУ, от комплексного влияния режимов резания (скорость резания v , подача на зуб s_z , глубина резания t). Обработывали методом фрезерования заготовки из чугуна СЧ20 на режимах ($n_{\text{ф}}$ — число оборотов фрезы, $s_{\text{ст}}$ — подача стола), указанных в таблице 1.

При исследованиях износа пятигранные твердосплавные пластины формы PNUA-110408 размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане имели следующие показатели: $\varphi = 64^\circ$, $\varphi_1 = 8^\circ$, $\gamma_3 = 10^\circ$ соответственно, передний угол заточки $\gamma_3 = 10^\circ$, задний угол заточки $\alpha_3 = 10^\circ$. Обработка производилась на карусельно-фрезерном специальном станке модели ГФ2211 фрезами торцовыми диаметром $d = 63$ и 200 мм. Обработке подвергались специально изготовленные заготовки из чугунных отливок материала СЧ25 ГОСТ 1412-85 с твердостью $HB 156...170$. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Замеры износа производились по задней поверхности пластин через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм.

В таблице 2 приведены данные всех составляющих, полученных при реализации математической модели, с указанием алгоритмических шагов и последовательных действий, расчета ресурсной стойкости для сплава В35, упрочненного методом АДУ, а в таблице 3 — для сплава В35 неупрочненного.

Т а б л и ц а 1. — Применяемые режимы резания при фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20 твердосплавными пластинами В35, не упрочненными и упрочненными АДУ

Вариации режимов обработки для пластин В35								
Номер опыта	v , м / мин		s_z , мм / об		t , мм		$n_{\text{ф}}$, об / мин	$s_{\text{ст}}$, мм / об
	1	124,6	0	0,21	0	3,0		
2	98,9	-1	0,21	0	3,0	0	500	630
3	124,6	0	0,21	0	4,0	+1	630	800
4	124,6	0	0,21	0	2,0	-1	630	800
5	124,6	0	0,13	-1	3,0	0	630	500
6	124,6	0	0,33	+1	3,0	0	630	1 250
7	158,3	+1	0,21	0	3,0	0	800	1 000

Т а б л и ц а 2. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35, упрочненных АДУ, от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

Экспериментальные результаты						Теоретические результаты					
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v , s_z , t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. 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 $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
Номер опыта	Параметры обработки				Износ по задней поверхности, 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	0,21	3,0	98,9			0,022			0,0000185	-0,004022	0,238641

Продолжение таблицы 2

Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
1	0,21	3,0		124,6			0,025		0,0000185	-0,004022	0,238641
3	0,21	3,0			158,3			0,066	0,0000185	-0,004022	0,238641
Результат			$a_v = 0,0000185v^2 - 0,004022v + 0,238641$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			0,521			0,0000239	-0,00795	1,07343
1	0,21	3,0		124,6			0,454		0,0000915	-0,28368	2,409614
3	0,21	3,0			158,3			0,414	0,0000915	-0,28368	2,409614
Результат			$n_v = 0,0000239v^2 - 0,00795v + 1,07343$								
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,015			-1,125	0,5075	-0,03196
1	124,6	3,0		0,21			0,025		-1,125	0,5075	-0,03196
5	124,6	3,0			0,33			0,013	-1,125	0,5075	-0,03196
Результат			$a_s = -1,125s^2 + 0,5075s - 0,03196$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,455			1,5625	-0,54375	0,49928
1	124,6	3,0		0,21			0,454		1,5625	-0,54375	0,49928
5	124,6	3,0			0,33			0,490	1,5625	-0,54375	0,49928
Результат			$n_s = 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,49928$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,006			-0,0195	0,1165	-0,149
1	124,6	0,21		3,0			0,025		-0,0195	0,1165	-0,149
7	124,6	0,21			4,0			0,005	-0,0195	0,1165	-0,149
Результат			$a_t = -0,0195t^2 + 0,1165t - 0,149$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,677			0,2195	-1,3205	2,44
1	124,6	0,21		3,0			0,454		0,2195	-1,3205	2,44
7	124,6	0,21			4,0			0,670	0,214	-0,431	0,428
Результат			$n_t = 0,2195t^2 - 1,3205t + 2,44$								
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 $C_1 = 0,025 - 0,0000185 \cdot 124,6^2 + 0,004 \cdot 124,6 + 1,125 \cdot 0,21^2 - 0,5075 \cdot 0,21 + 0,0195 \cdot 3,0^2 - 0,1165 \cdot 3,0 = 0,008$ $C_2 = 0,454 - 0,000024 \cdot 124,6^2 + 0,008 \cdot 124,6 - 1,5625 \cdot 0,21^2 + 0,54375 \cdot 0,21 - 0,2195 \cdot 3,0^2 + 1,321 \cdot 3,0 = 3,105$											
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											
Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$ при заданном h_3											
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин											
Номер опыта	s	t	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	av	bv	cv
2	0,21	3,0	98,9			2 155,31		T_{v_1}	-3,86634	976,707	-56 623,572

Окончание таблицы 2

Номер опыта	s	t	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	av	bv	cv
1	0,21	3,0		124,6		5 048,641		T_{v_2}			
3	0,21	3,0			158,3	1 103,068		T_{v_3}			
Результат			$a_v = -3,86634v^2 + 976,707v - 56 623,572$								
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s ₁	s ₂	s ₃	T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_3}	a _n	b _n	c _v
2	124,6	3,0	0,13			15 227,035		T_{s_1}	852 839,1724	-417 195,2419	55 049,4348
1	124,6	3,0		0,21		5 048,641		T_{s_2}			
3	124,6	3,0			0,33	10 249,191		T_{s_3}			
Результат			$a_s = 852 839,1724s^2 - 417 195,2419s + 55 049,4348$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t, мм											
Номер опыта	v	s	t ₁	t ₂	t ₃	T_{t_1}	T_{t_2}	T_{t_3}	a _t	b _t	c _t
2	124,6	0,21	2,0			2 505,317		T_{t_1}	-2 011,281	12 600,5857	-14 650,0465
1	124,6	0,21		3,0		5 048,641		T_{t_2}			
7	124,6	0,21			4,0	3 569,062		T_{t_3}			
Результат			$a_t = -2 011,281s^2 + 12 600,5857s - 14 650,0465$								
При среднем опыте											
Номер опыта	v	s	t	t ₁	t ₂	t ₃	h_{3t1}	h_{3t3}	a _t	b _t	c _t
	124,6	0,21	3,0				5 048,641				-26 321,4664
Стойкость пластин В35, упрочненных АДУ											
$T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$											

Т а б л и ц а 3. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35 неупрочненных от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

Экспериментальные результаты						Теоретические результаты					
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v , s_z , t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. 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 $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
Номер опыта	Параметры обработки					Износ по задней поверхности, 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	0,21	1,0	98,9			0,031			0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
1	0,21	3,0		124,6			0,025		0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
7	0,21	3,0			158,3			0,080	0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
Результат			$a_v = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,4411025$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			0,518			0,0000067	-0,003168	0,765874

Продолжение таблицы 3

Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
1	0,21	3,0		124,6			0,475		0,0000067	-0,003168	0,765874
7	0,21	3,0			158,3			0,432	0,0000067	-0,003168	0,765874
Результат		$n_v = 0,0000067v^2 - 0,003168v + 0,765874$									
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,019			-0,8333333	0,358333	-0,0135
1	124,6	3,0		0,21			0,025		-0,8333333	0,358333	-0,0135
5	124,6	3,0			0,33			0,014	-0,8333333	0,358333	-0,0135
Результат		$a_s = -0,8333333s^2 + 0,358333s - 0,0135$									
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,479			2,6666667	-0,9566667	0,5583
1	124,6	3,0		0,21			0,475		2,6666667	-0,9566667	0,5583
5	124,6	3,0			0,33			0,533	2,6666667	-0,9566667	0,5583
Результат		$n_s = 2,6666667s^2 - 0,9566667s + 0,5583$									
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,015			-0,0135	0,0775	-0,086
1	124,6	0,21		3,0			0,025		-0,0135	0,0775	-0,086
7	124,6	0,21			4,0			0,008	-0,0135	0,0775	-0,086
Результат		$a_t = -0,0135t^2 + 0,0775t - 0,086$									
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,587			0,143	-0,827	1,669
1	124,6	0,21		3,0			0,475		0,143	-0,827	1,669
7	124,6	0,21			4,0			0,649	0,143	-0,827	1,669
Результат		$n_t = 0,143t^2 - 0,827t + 1,669$									
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											
$C_1 = 0,025 - 0,00003 \cdot 124,6^2 + 0,00725 \cdot 124,6 + 0,833 \cdot 0,21^2 - 0,3583 \cdot 0,21 + 0,0135 \cdot 3,0^2 - 0,078 \cdot 3,0 = 0,292$											
$C_2 = 0,475 - 0,000007 \cdot 124,6^2 + 0,00317 \cdot 124,6 - 2,667 \cdot 0,21^2 + 0,9567 \cdot 0,21 - 0,143 \cdot 3,0^2 + 0,827 \cdot 3,0 = 2,043$											
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											
Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$, при заданном h_3											
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин											
Номер опыта	s	t	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			1 162,221		T_{v_1}	-2,973489	754,09992	-44 333,9497
1	0,21	3,0		124,6			3 463,022	T_{v_2}			
3	0,21	3,0			158,3		527,756	T_{v_3}			
Результат		$a_v = -2,973489v^2 + 754,09992v - 44 333,9497$									

Окончание таблицы 3

Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_3}	a_n	b_n	c_v
2	0,21	3,0	0,13			5 737,485		T_{s_1}	174 274,2541	-87 684,041	-14 191,17588
1	0,21	3,0		0,21		3 463,022		T_{s_2}			
3	0,21	3,0			0,33	4 233,909		T_{s_3}			
Результат			$a_s = 174 274,25412s^2 - 8 7684,04093s + 14 191,175877$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	T_{t_1}	T_{t_2}	T_{t_3}	a_t	b_t	c_t
2	124,6	0,21	2,0			1 746,069		T_{t_1}	1 462,890931	9 031,407927	-10 465,18351
1	124,6	0,21		3,0		3 463,022		T_{t_2}			
7	124,6	0,21			4,0	2 254,193		T_{t_3}			
Результат			$a_t = 1 462,890931s^2 + 9 031,407927s - 10 465,183513$								
При среднем опыте											
	v	s	t	t_1	t_2	t_3	$h_{3т1}$	$h_{3т3}$	a_t	b_t	c_t
	124,6	0,21	3,0				3 463,022				-47 534,00106
Стойкость пластин В35 неупрочненных											
$T_{PH} = 10^{-3}vs(-2,97v^2 + 754,1v + 17 4274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$											

После компьютерной обработки результатов таблиц 2 и 3 получены зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента из сплава В35, не упрочненного (В35н) и упрочненного методом АДУ (В35у). Значения зависимостей приведены в таблице 4.

Анализ зависимостей (см. таблицу 4) показывает, что наибольшее влияние на износ h_3 и ресурс инструмента T_p оказывает подача на зуб s_z , затем скорость резания v , наименьшее влияние оказывает глубина резания t . Оптимальные значения параметров резания определялись путем компьютерного моделирования полученных зависимостей из таблицы 4. Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях не приемлема в связи с достаточно высокой степенью взаимного влияния исследуемых параметров.

Т а б л и ц а 4. — Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента для сплава В35, не упрочненного и упрочненного методом АДУ

Сплав	Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса инструмента T_p
В35у	$h_3 = a \cdot t^{n_0}$, где $at = 0,000018517v^2 - 0,004021727v - 1,125s^2 + 0,5075s - 0,0195t^2 + 0,1165t + 0,008$; $n_0 = 0,000023907v^2 - 0,00795016v + 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,2195t^2 - 1,3205t + 3,105$
	$T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$
В35н	$h_3 = a t^{n_0}$, где $a = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,8333s^2 + 0,3583s - 0,0135t^2 + 0,0775t + 0,292$; $n_0 = 0,0000066867v^2 - 0,003167619v + 2,66667s^2 - 0,95667s + 0,143t^2 - 0,827t + 2,043$
	$T_{PH} = 10^{-3}vs(-2,97v^2 + 754,1v + 174 274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$

На рисунке 2 приведены графические интерпретации зависимостей (из таблицы 4) ресурса металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава В35, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке чугуна СЧ20 от одного из технологических параметров v , s_z , t .

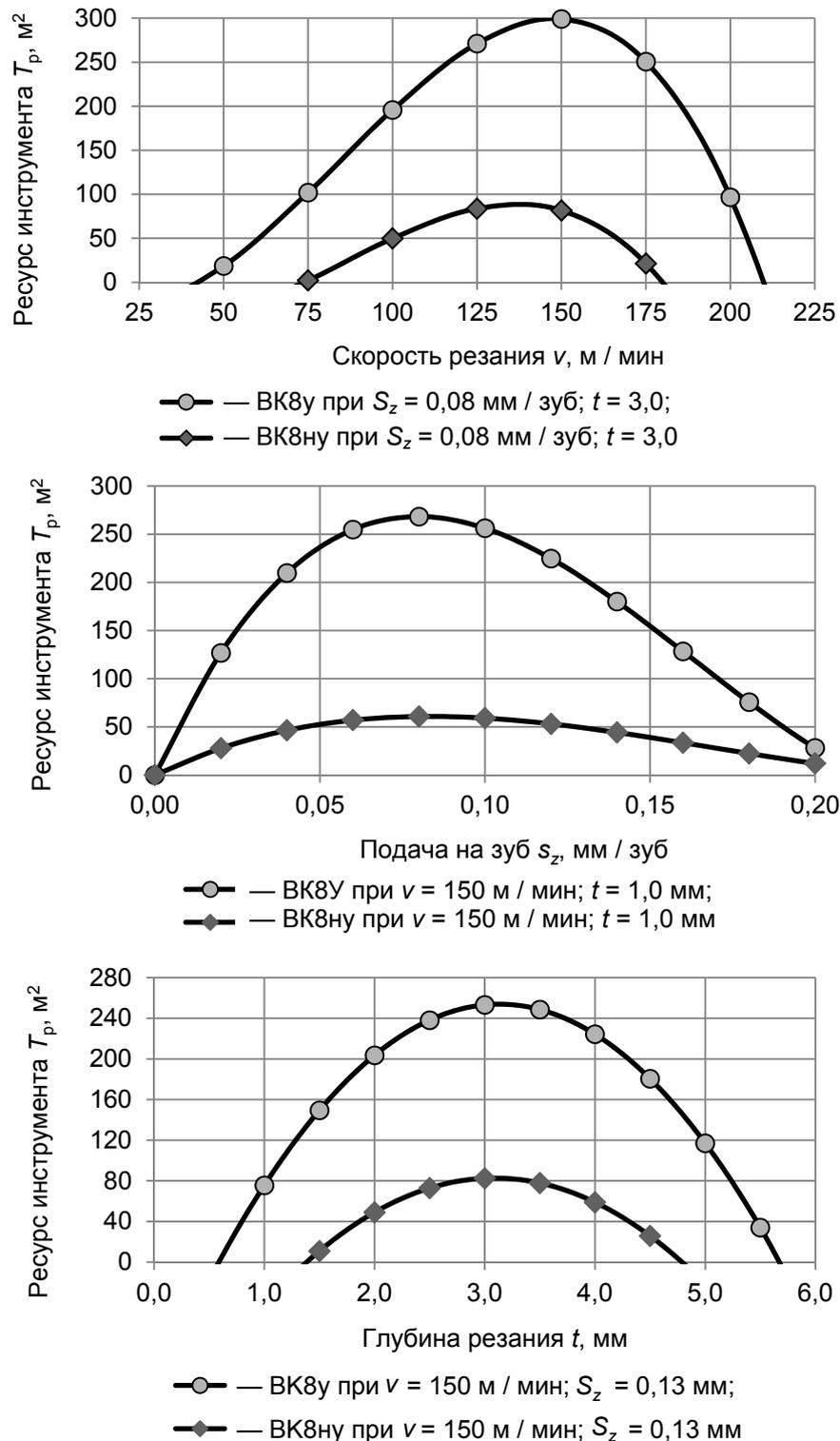


Рисунок 2. — Зависимости ресурса T_p металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 сплава В35, неупрочненных (VK8ну) и упрочненных АДУ (VK8у), при фрезеровании чугуна СЧ20 от влияния режимов резания v , s_z , t

На рисунке 3 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса металло-режущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава ВК8, неупрочненных и упрочненных АДУ, при фрезеровании чугуна СЧ20 от двух технологических режимов резания при постоянном значении третьего.

Проведя компьютерное моделирование зависимостей T_{py} и T_{pn} для сплава В35 (из таблицы 4) найдены оптимальные значения v , s_z , t , при которых обеспечивается максимальная ресурсная стойкость (таблица 5).

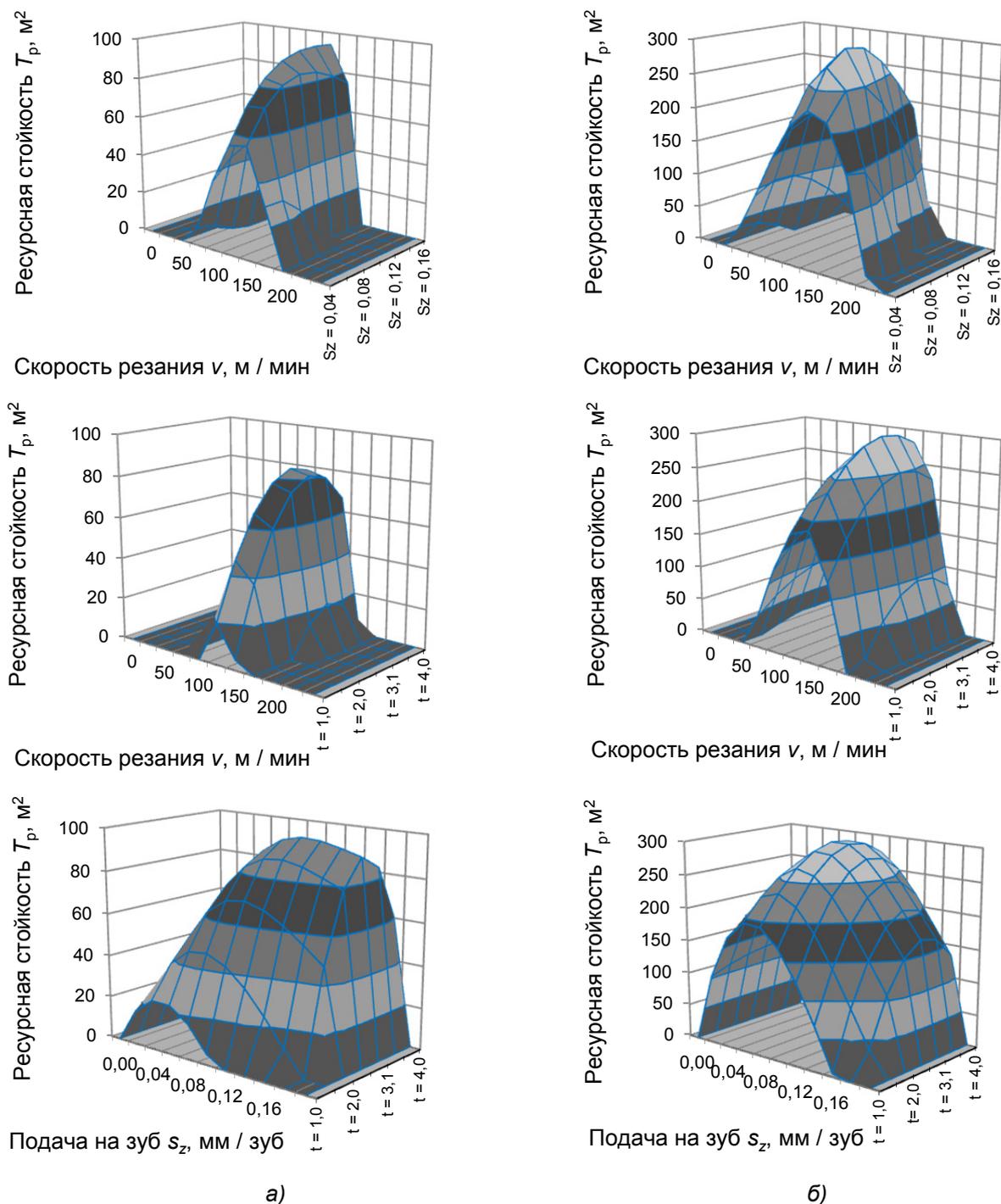


Рисунок 3. — Зависимости ресурса T_p пластин твердосплавных PNUA-110408 сплава В35, не упрочненных (а) и упрочненных АДУ (б), при фрезеровании чугуна СЧ20 от комплексного влияния режимов резания v , s_z , t

Т а б л и ц а 5. — Оптимальные значения режимов резания при фрезеровании чугуна СЧ20 пластинами В35, не упрочненными и упрочненными методом АДУ

Режим	Неупрочненная	Упрочненная АДУ	Рост, %
$V_{\text{опт}}, \text{ м / мин}$	133,90	146,50	+9,4
$s_{z\text{опт}}, \text{ мм / зуб}$	0,13	0,09	-30,8
$t_{\text{опт}}, \text{ мм}$	3,10	3,10	0
$T_p, \text{ м}^2$	97,71	301,65	+209,0

При упрочнении методом АДУ снижение оптимальной подачи на зуб на 30,8 % компенсируется повышением на 209 % ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35.

При повышении производительности обработки для пластин ВК8, упрочненных АДУ, по сравнению с неупрочненными, за счет увеличения режимов резания, например, на 26 %, что возможно осуществить за счет повышения минутной подачи на 26 % (при $v = 146,5 \text{ м / мин}$ и $s_z = 0,15 \text{ мм / зуб}$), ресурсная стойкость увеличивается в 2,28 раза и составляет $222,6 \text{ м}^2$.

Заключение. С использованием экспериментально-расчетных исследований и компьютерного моделирования на основе разработанной математической модели и метода параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, учитывающих влияние режимов резания и их взаимосвязи на износ инструмента, получены степенные зависимости ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента из сплава В35, не упрочненных и упрочненных методом АДУ, от времени резания, которые позволяют назначать оптимальные режимы резания для достижения наибольшей ресурсной стойкости инструмента. Показано, что для металлорежущих твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, существенным является то, чтобы пластины работали на оптимальных режимах резания, имеющих при фрезеровании чугуна СЧ20 сплавом В35 следующие показатели: $v = 146,5 \text{ м / мин}$, $s_z = 0,09 \text{ мм / зуб}$, $t = 3,1 \text{ мм}$.

Установлено, что комбинация режимов резания оказывает существенное влияние на ресурс твердосплавных пластин В35, упрочненных методом АДУ: при $h_{\text{здоп}} = 0,6 \text{ мм}$ на режимах резания $v = 158,3 \text{ м / мин}$; $s_z = 0,21 \text{ мм / зуб}$; $t = 3,0 \text{ мм}$, $T_{\text{py}} = 1369,7 \text{ м}^2$, а на режимах резания $v = 98,8 \text{ м / мин}$; $s_z = 0,21 \text{ мм / зуб}$; $t = 3,0 \text{ мм}$, $T_{\text{py}} = 571,8 \text{ м}^2$ ресурс повышается в 2,4 раза.

Метод АДУ рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для повышения производительности обработки. При фрезеровании на оптимальных режимах чугуна СЧ20 упрочненным АДУ сплавом В35 повышение производительности обработки на 26 % сопровождается увеличением стойкости в 2,28 раза.

Список цитируемых источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков ; дата публ. 30.06.2017.
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. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
4. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. 7. — С. 49—63.
5. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.

Поступила в редакцию 30.03.2020