

УДК 621.9

**А. Н. Жигалов**, кандидат технических наук, доцент; **И. А. Горавский**  
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,  
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА ОСЕВОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

При использовании метода аэродинамического звукового упрочнения для повышения стойкости осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45 выявлено увеличение стойкости в 1,5...2,1 раза в зависимости от режимов обработки и максимально допустимого износа по задней поверхности.

**Ключевые слова:** осевой фрезерный инструмент; стойкость; износ; метод аэродинамического звукового упрочнения; режимы обработки.

Рис. 13. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

**A. N. Jigalov**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; **I. A. Goravskii**  
Educational institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE WEAR OF AN AXIAL MILLING TOOL MADE OF HIGH-SPEED STEEL R6M5, HARDENED BY AERODYNAMIC SOUND METHOD

When using the aerodynamic sound hardening method of increasing durability increase of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5 when processing steel 45, an increase in 1.5...2.1 times was revealed, depending on the processing modes and the maximum allowable wear on the rear surface.

**Key words:** axial milling tool; durability; wear; method of aerodynamic sound hardening; processing modes.

Fig. 13. Table. 3. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 широко применяется в машиностроении для обработки контурных уступов и выемок, поверхностей, расположенных под прямым углом по отношению друг к другу, канавок и прочих поверхностей деталей из различных металлов. Но такой инструмент имеет один существенный недостаток — низкую стойкость, т. е. продолжительность резания новой или переточенной фрезой до ее отказа или до достижения предельно допустимого износа фрезы [1]. Стойкость фрезы является одним из основных технологических показателей эффективности процесса резания осевым фрезерным инструментом.

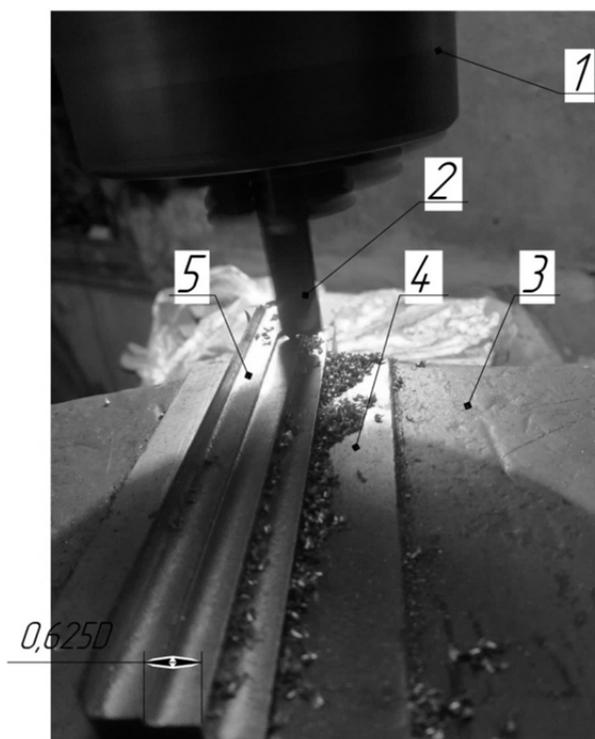
Разработанный метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ), способный повысить ударную вязкость при сохранении высокой твердости до 65 HRC, оказывает положительное влияние на повышение стойкости инструмента, работающего при процессах прерывистого резания. Метод АДУ основан на принципах изменения структуры упрочняемого изделия за счет воздействия энергии резонансных волн в звуковом спектре частот [2—4]. Осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненный

АДУ, не исследован, в связи с чем актуальным является проведение исследований влияния режимов резания на износ осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ.

**Материалы и методы исследования.** Исследованию подвергали концевые фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 диаметрами 8 и 12 мм с двумя режущими зубьями (ГОСТ 17024-82). Фрезы разделялись на две группы, одну из которой подвергали упрочнению методом АДУ, а другую оставляли без упрочнения. Упрочнение фрез осуществлялось по методике, изложенной в [5]. Испытания фрез на износ проводили на вертикально-фрезерном станке модели 675. Фрезы закреплялись в цанговом патроне. Фрезерованию подвергались прямоугольные заготовки размером  $100 \times 20$  и  $300 \times 50$  мм из стали 45 твердостью 187...207 НВ (ГОСТ 1050), зажимаемых в тисках универсальных (рисунок 1).

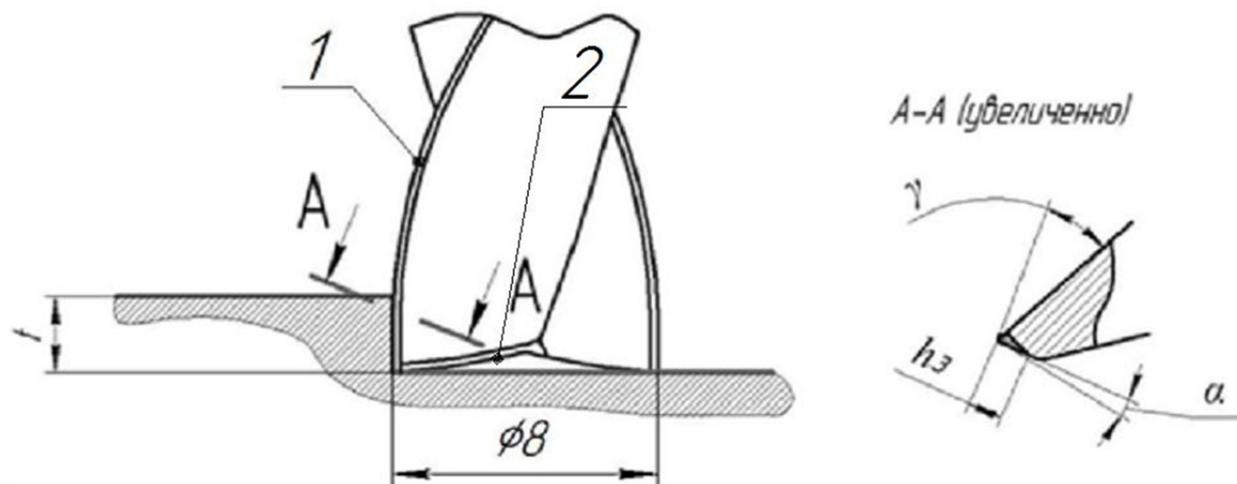
Обработка осуществлялась методом попутного фрезерования — движение подачи совпадает с направлением вращения фрезы вокруг своей оси. Ширина фрезерования  $H$  составляла  $0,625D$  мм. Режимы резания изменялись в следующих диапазонах: скорость резания  $v = 12,56...20,1$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,02...0,0334$  мм/зуб, глубина фрезерования  $t = 0,5...2,1$  мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялся 5 %-ный раствор эмульсола в воде с расходом 6...8 л/мин. За критерий затупления принимался износ по задней поверхности  $h_3$ , измерение которого осуществлялось следующим образом.

На рисунке 2 показана схема резания концевой фрезой с величиной износа по задней поверхности  $h_3$ .



1 — цанговый патрон; 2 — концевая фреза;  
3 — тиски универсальные; 4 — рабочие губки тисков; 5 — прямоугольная заготовка

**Рисунок 1. — Схема фрезерования заготовок из стали 45 концевой фрезой на фрезерном станке модели 675**



1 — режущая кромка главного лезвия; 2 — режущая кромка вспомогательного лезвия

**Рисунок 2. — Схема резания концевой фрезой**

Так как режущий зуб фрезы имеет криволинейную режущую кромку  $1$  главного лезвия, то при измерении износа по задней поверхности  $h_3$  в направлении режущей кромки  $1$  (см. рисунок 2) будет присутствовать погрешность в измерении из-за потери базовой точки измерения износа, находящейся на режущей кромке главного лезвия. Кроме того, погрешность измерения будет накапливаться из-за происходящего одновременного износа режущих кромок как главного, так и вспомогательного лезвия.

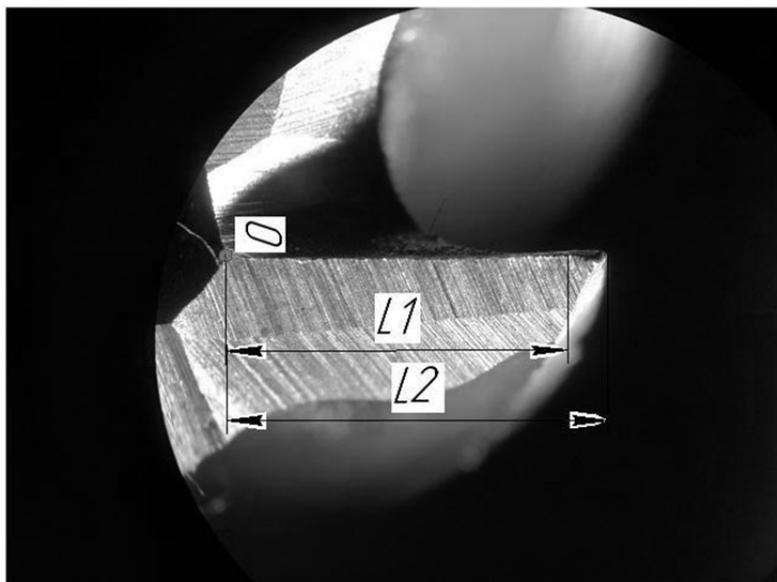
В связи с этим предложено замеры износа по задней поверхности  $h_3$  осуществлять по линии режущей кромки вспомогательного лезвия (рисунок 3) относительно базовой точки, являющейся крайней точкой, расположенной на задней режущей кромке вспомогательного лезвия и наиболее приближенной к оси вращения фрезы (на рисунке 3 точка  $O$ ), которая не подвержена износу. Тогда, согласно рисунку 3, величина износа по задней поверхности  $h_3$  будет равна разнице расстояний между длинами режущих кромок вспомогательного лезвия до износа  $L_2$  и после износа  $L_1$ :

$$h_3 = L_2 - L_1. \quad (1)$$

Износ по задней поверхности  $h_3$  замерялся через каждые 600 мм пути резания фрезы или через 15...20 мин обработки на микроскопе Galileomicroskan HV1 AC с точностью измерений 0,001 мм.

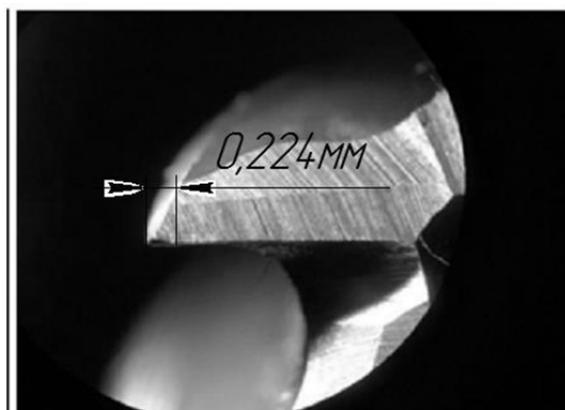
Сначала проводились исследования однофакторного влияния режимов резания при обработке фрезами, упрочненными аэродинамическим звуковым методом, на износ по задней поверхности зуба фрезы. Концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 12 мм,  $z = 5$ , из которых две фрезы были упрочнены методом АДУ в течение 3,5 мин на резонансной частоте 148 Гц с предварительным нагревом их до 260 °С и выдержкой при такой температуре в нагревательной печи в течение 60 мин, а две — без упрочнения, производили фрезерование образцов размером 100 × 20 × 60 мм из стали 45 на фрезерном станке модели 675 на режимах: скорость резания — 15,072 м / мин, подача на зуб — 0,032 мм / зуб, глубина резания — 1,0 мм, подача стола станка — 64 мм / мин, ширина фрезерования — 7 мм.

На рисунке 4 показаны съемки износа по задней поверхности  $h_3$  на зубе фрезы, неупрочненной ( $a$ ) и упрочненной АДУ ( $b$ ), от времени резания  $\tau$  на указанных режимах резания.

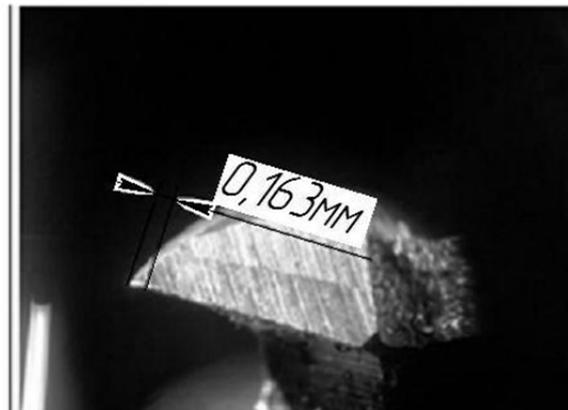


$L_1$  — длина режущей кромки вспомогательного лезвия фрезы после износа;  $L_2$  — длина режущей кромки вспомогательного лезвия фрезы до износа

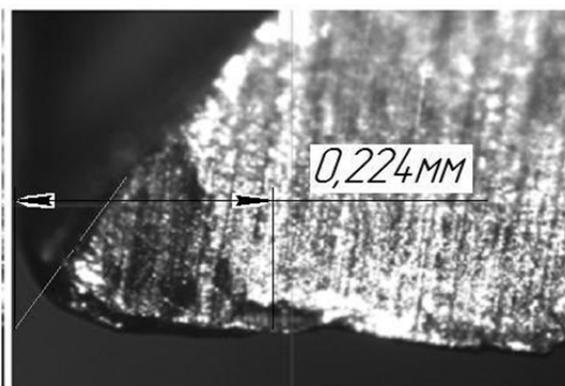
**Рисунок 3. — Вид концевой фрезой со стороны вспомогательного лезвия фрезы**



$h_3 = 0,224$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 5$ )

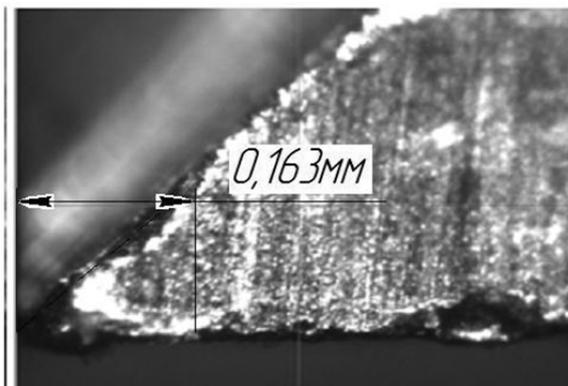


$h_3 = 0,163$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 5$ )



$h_3 = 0,224$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 30$ )

а)



$h_3 = 0,163$  мм,  $\tau = 15$  мин (увеличение  $\times 30$ )

б)

**Рисунок 4. — Износ по задней поверхности  $h_3$  зуба фрезы из стали Р6М5 от времени резания  $\tau$ : а — неупрочненной; б — упрочненной АДУ**



$h_3 = 0,279$  мм,  $\tau = 30$  мин (увеличение  $\times 20$ )



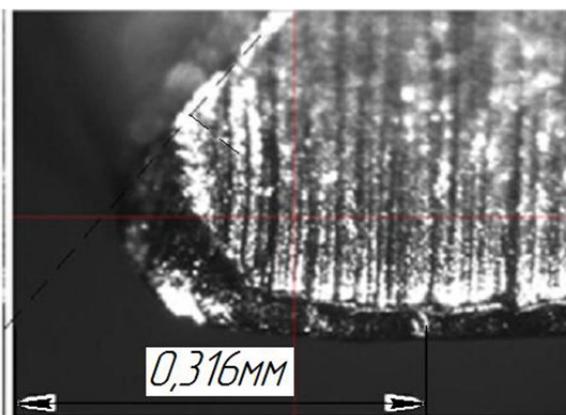
$h_3 = 0,212$  мм,  $\tau = 30$  мин (увеличение  $\times 20$ )



$h_3 = 0,298$  мм,  $\tau = 50$  мин (увеличение  $\times 20$ )

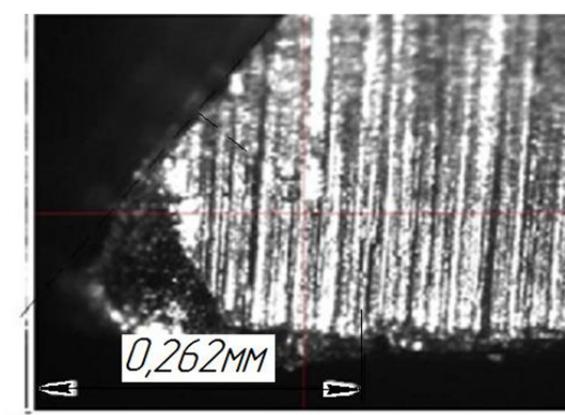


$h_3 = 0,236$  мм,  $\tau = 50$  мин (увеличение  $\times 20$ )



$h_3 = 0,316$  мм,  $\tau = 55$  мин (увеличение  $\times 30$ )

а)



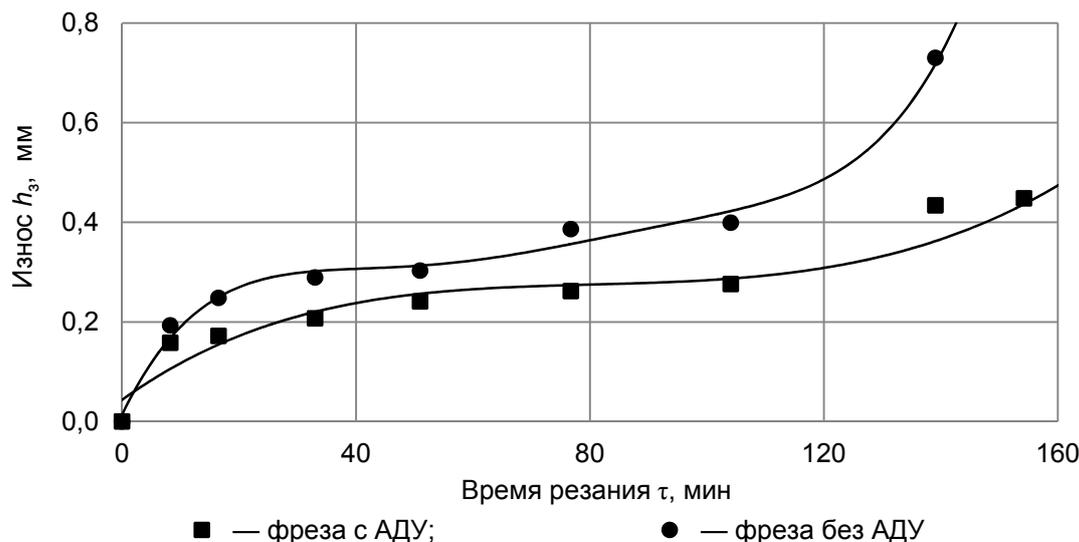
$h_3 = 0,262$  мм,  $\tau = 55$  мин (увеличение  $\times 30$ )

б)

Окончание рисунка 4

**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты износа по задней поверхности  $h_3$  зуба фрезы быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 12 мм, неупрочненных и упрочненных АДУ, от времени резания  $\tau$  приведены на рисунке 5.

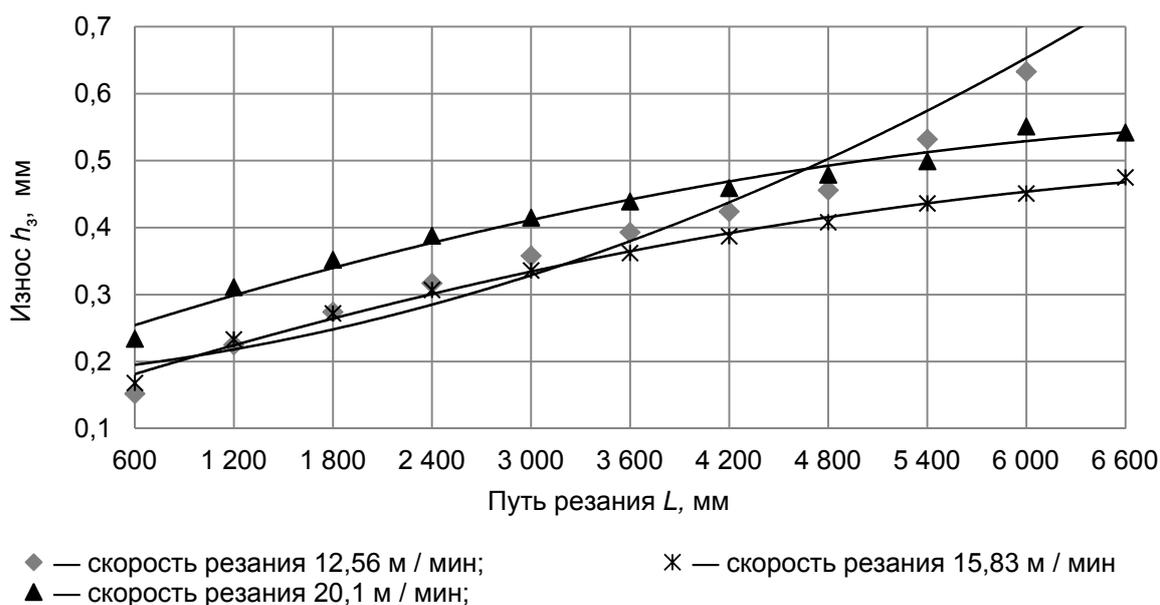
Анализ зависимостей рисунка 5 показывает, что при фрезеровании образцов из стали 45 износ  $h_3 = 0,4$  мм для фрезы диаметром 12 мм, упрочненной методом АДУ, наступает при  $\tau = 150$  мин, а без упрочнения — при  $\tau = 95$  мин, т. е. стойкость повышается в 1,58 раза [6; 7].



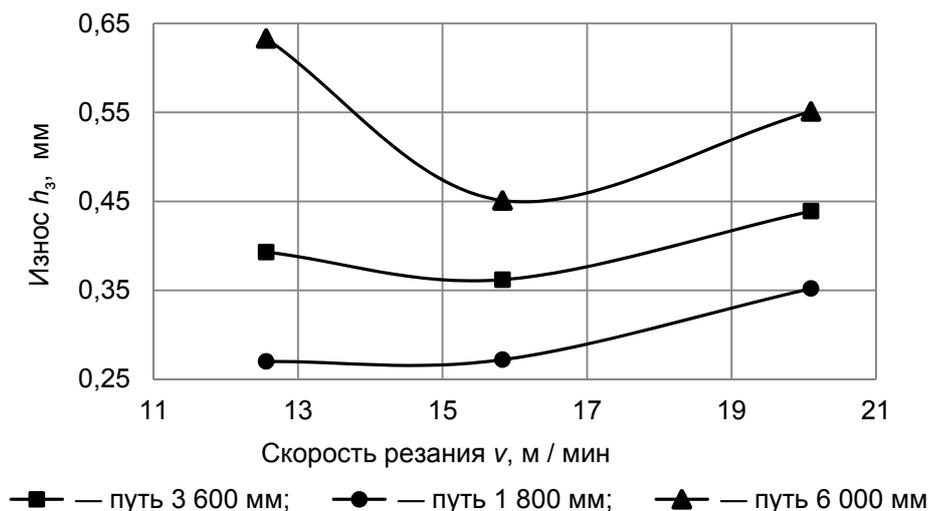
**Рисунок 5.** — Зависимости износа  $h_3$  по задней поверхности зуба фрез диаметром 12 мм,  $z = 5$  из Р6М5, неупрочненных и упрочненных аэродинамическим звуковым методом, от времени резания  $\tau$  образцов из стали 45 на режимах:  $v = 15,072$  м / мин,  $s_z = 0,032$  мм / зуб,  $t = 1,0$  мм

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости износа  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 от влияния одного из режимов резания  $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ .

Анализ влияния скорости резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной методом АДУ, при фрезеровании образцов из стали 45 показывает (см. рисунки 6 и 7), что в начале обработки до пути резания  $L = 3\ 000$  мм при увеличении скорости резания с 12,56 до 20,1 м / мин величина износа  $h_3$  увеличивается. При дальнейшей обработке происходит увеличение износа  $h_3$  при меньших скоростях резания ( $v = 12,56$  м / мин) по сравнению со скоростями резания  $v = 15,83$  м / мин и  $v = 20,1$  м / мин.



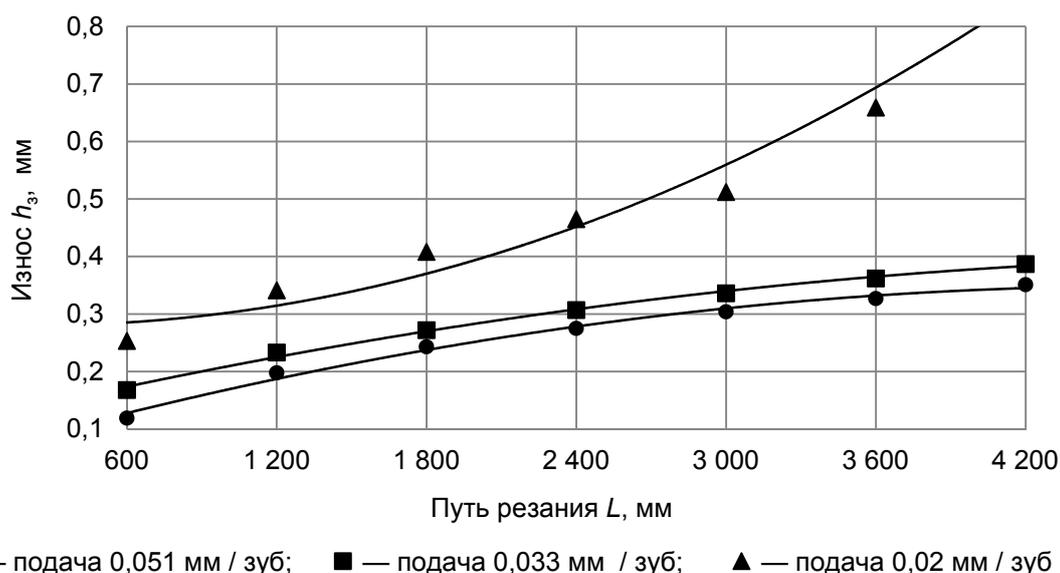
**Рисунок 6.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ от пути резания при фрезеровании стали 45 на скоростях резания  $v$ : 12,56; 15,83; 20,1 м / мин ( $s_z = 0,033$  мм / зуб,  $t = 1,3$  мм)



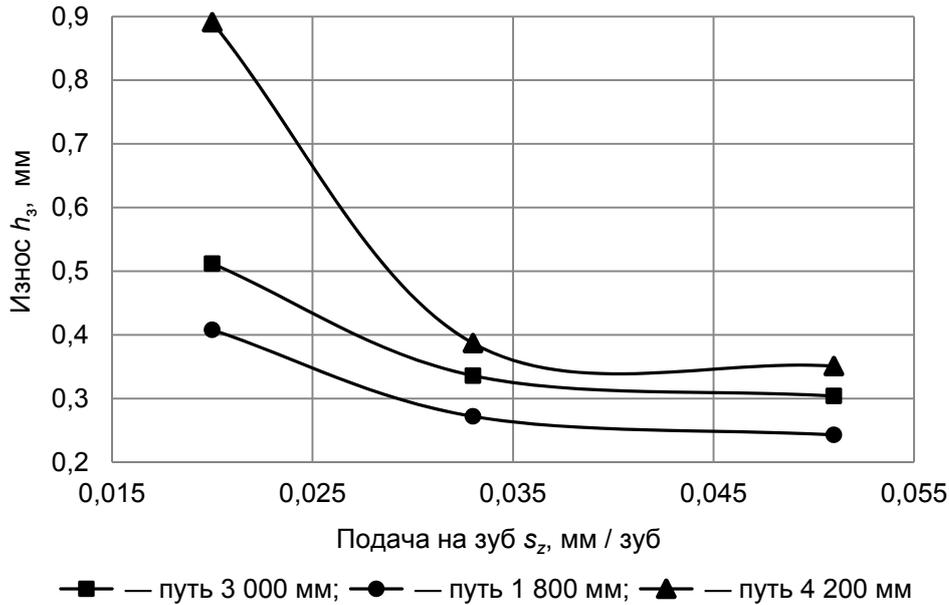
**Рисунок 7.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от скорости резания при путях резания  $L$ : 1 800; 3 600; 6 000 мм ( $s_z = 0,033$  мм / зуб,  $t = 1,3$  мм)

Анализ зависимостей (см. рисунок 7) показывает, что влияние скорости резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, носит экстремальный характер. Практически на любом промежутке резания при скорости  $v = 15,83$  м / мин наблюдается минимальный износ зуба фрезы.

Из рисунков 8 и 9 следует, что при увеличении подачи на зуб износ  $h_3$  зуба фрезы из стали Р6М5, упрочненной методом АДУ, при фрезеровании образцов из стали 45 уменьшается, при этом экстремума износа от подачи на зуб не наблюдается, а также при увеличении подачи с 0,02 до 0,033 мм / зуб интенсивность снижения износа значительно больше, чем при увеличении подачи с 0,033 до 0,051 мм / зуб.

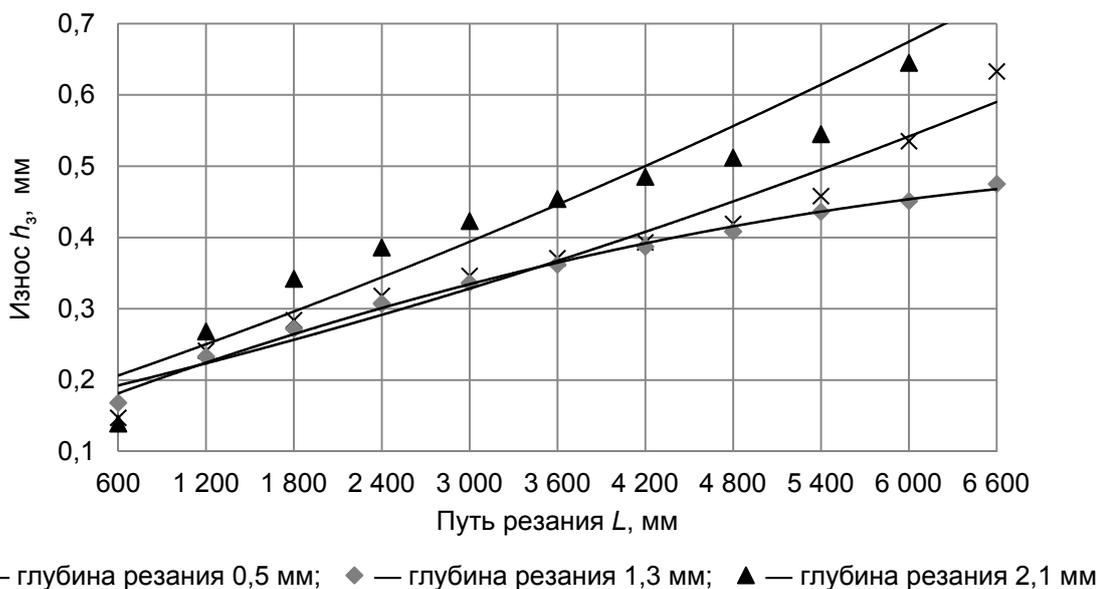


**Рисунок 8.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 при подачах на зуб  $s_z$ : 0,02; 0,033; 0,051 мм / зуб ( $v = 15,83$  м / мин,  $t = 1,3$  мм)

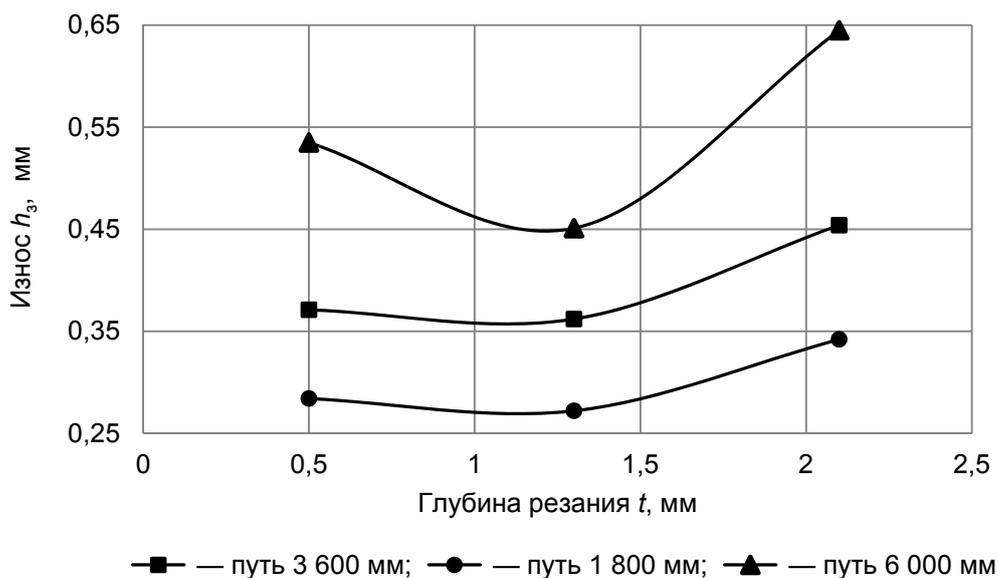


**Рисунок 9.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от подачи  $s_z$  при путях резания  $L$ : 1 800; 3 000; 4 200 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $t = 1,3$  мм)

Анализ влияния глубины резания на износ  $h_3$  по задней поверхности зуба фрезы из Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали (рисунки 10 и 11) показывает, что на всех глубинах резания при увеличении пути резания наблюдается износ зуба фрезы с различной интенсивностью. При небольших глубинах резания (до  $t = 1,3$  мм) при увеличении глубины резания происходит снижение износа зуба фрезы, а при глубинах резания свыше 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит увеличение износа зуба фрезы. Влияние глубины резания на износ носит экстремальный характер.



**Рисунок 10.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 при глубинах резания  $t$ : 0,5; 1,3; 2,1 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $s_z = 0,033$  мм / зуб)



**Рисунок 11.** — Зависимости износа  $h_3$  зуба фрезы диаметром 8 мм из Р6М5 с АДУ при фрезеровании стали 45 от глубины резания  $t$  при путях резания  $L$ : 1 800; 3 600; 6 000 мм ( $v = 15,83$  м / мин,  $s_z = 0,033$  мм / зуб)

Таким образом, при обработке фрезами из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ, явно прослеживается наличие оптимальных режимов резания ( $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ ), при которых присутствует минимальный износ зуба фрезы. Определение таких оптимальных режимов резания позволит дополнительно повысить стойкость фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ.

Проведены экспериментальные исследования износа фрез по методике, изложенной в работе [8], которая позволяет наряду с небольшим количеством опытов (для трех параметров — семь опытов) получать расширенную информацию по взаимному влиянию каждого из исследуемых параметров, а также комплексному влиянию, на результирующие показатели износа фрез. Согласно методике определения износа в качестве количественной оценки выбиралась величина износа режущего лезвия по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  в виде степенной функции

$$h_3 = aL^n, \quad (2)$$

где  $a$  — коэффициент, характеризующий абсолютную величину износа от пути резания;

$n$  — коэффициент, представляющий собой показатель интенсивности износа.

Путем логарифмирования зависимости (1) коэффициенты  $a$  и  $n$  определяются следующим образом:

$$a = \frac{h_{3_i}}{\tau_i^n} + \frac{h_{3_1}}{\tau_1^n}, \quad n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i} - h_{3_1}}{\tau_i - \tau_1}, \quad (3)$$

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

$\tau_i$  и  $\tau_1$  — значения времени в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно.

Проведенные однофакторные исследования показали, что скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$  оказывают существенное влияние на износ концевых фрез из быстрорежущей стали P6M5 с АДУ.

С учетом этого проведен полнофакторный эксперимент, состоящий из семи опытов по трем режимам резания ( $v$ ,  $s$  и  $t$ ). Концевыми фрезами диаметром 8,0 мм из P6M5 без упрочнения и с АДУ фрезеровали заготовки из стали 45. Для каждого режима резания назначались пределы варьирования, определенные из предварительных исследований и рекомендаций литературы, с учетом возможности установки на станке реальных режимов резания, которые представлены в таблице 1.

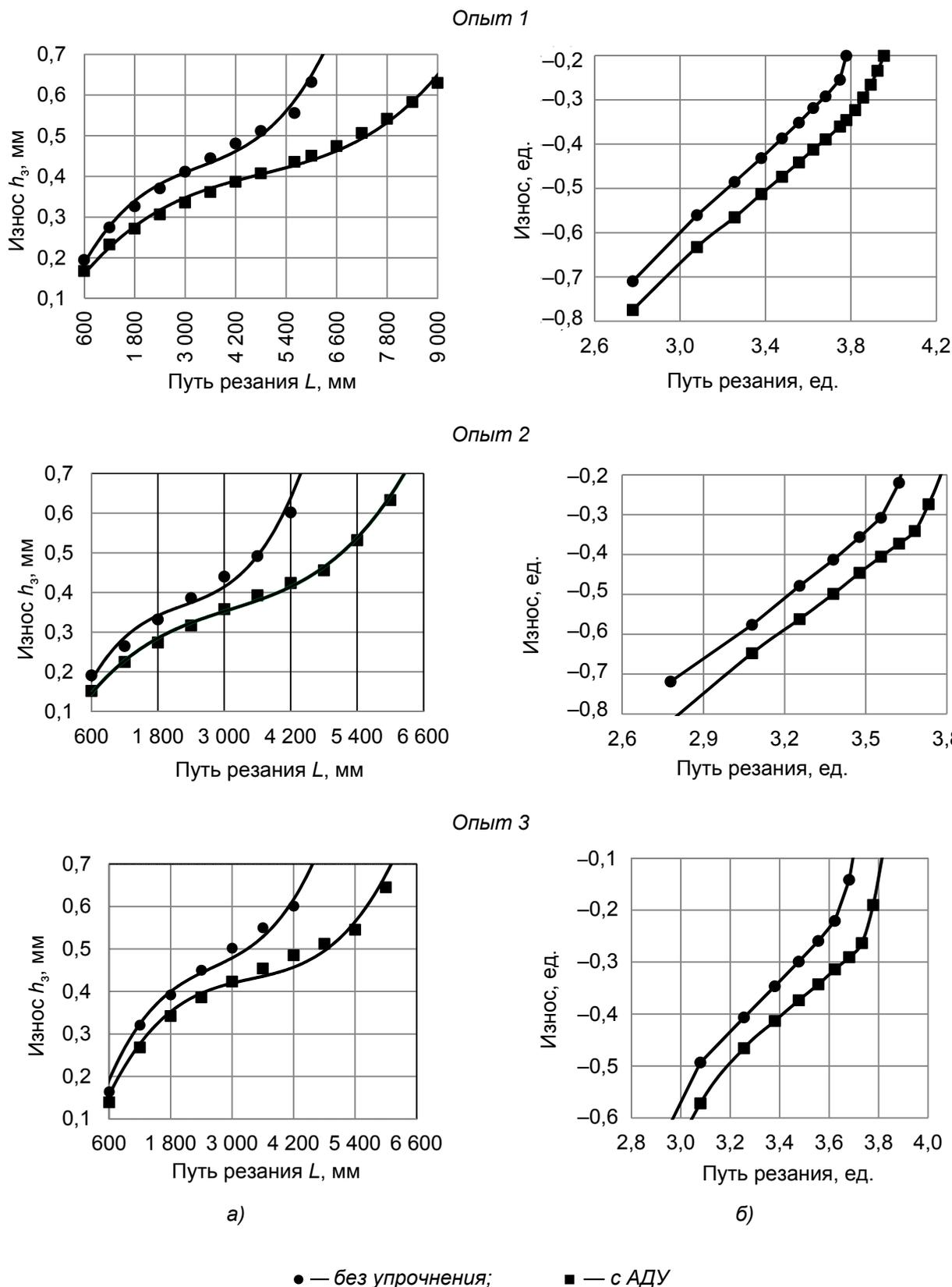
Значение износа  $h_3$  на зубе бралось по результатам замеров на трех фрезах, по которым определялась величина среднего значения износа  $h_3$ . При выходе значения замера за 20 % от среднего арифметического значения из трех замеров такое значение исключалось из расчетов. Замеры износа по задней поверхности  $h_3$  производились через 600 мм резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе GalileomicroskanHV1 AC.

После проведенных семи опытов от  $v$ ,  $s_z$  и  $t$  по матрице таблицы 1 для каждого опыта строились графики изменения износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  для зоны устоявшегося резания в абсолютной системе. Затем строились графики износа от пути резания в логарифмической системе по десятичному логарифму. Зависимости представлены на рисунке 12.

Графики (см. рисунок 12) обрабатывались на основании рекомендаций [4; 8]. На графиках, построенных в логарифмической системе, замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии. Например, для опыта № 7 (см. рисунок 12): в логарифмической системе координаты кривой, соответствующей неупрочненной фрезе, для второй точки  $h_{32} = -0,4425$  и  $L_2 = 3,0792$ ; для седьмой точки  $h_{37} = -0,2434$  и  $L_7 = 3,6233$ . Затем на графиках в абсолютной системе определялись координаты для аналогичных точек из графиков в логарифмической системе:  $h_{32} = 0,361$ ;  $L_2 = 1200$ ;  $h_7 = 0,571$ ;  $L_7 = 4\ 200$ . Для упрочненной фрезы: в логарифмической системе —  $h_{32} = -0,5072$ ,  $L_2 = 3,0792$ ,  $h_{310} = -0,2832$ ,  $L_{10} = 3,7782$ ; в абсолютной системе —  $h_{32} = 0,311$ ,  $L_2 = 1200$ ,  $h_{10} = 0,521$ ,  $L_{10} = 6\ 000$ . По начальным и конечным координатам прямолинейных частей графиков в логарифмической и абсолютной системах рассчитывались по (3) коэффициенты  $a$ ,  $n$ , а затем по (2) зависимости износа по задней поверхности  $h_3$ . Результаты координат для всех опытов сведены в таблице 2.

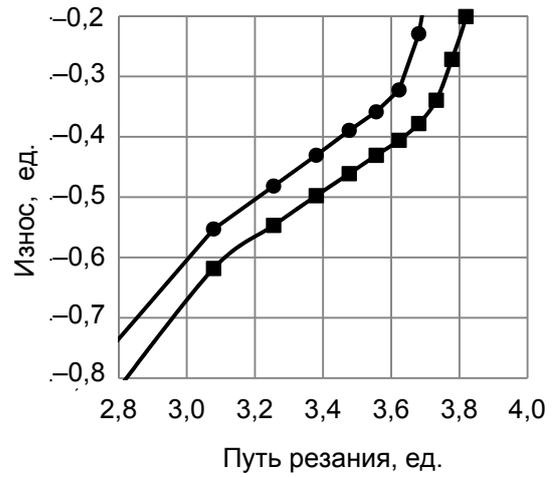
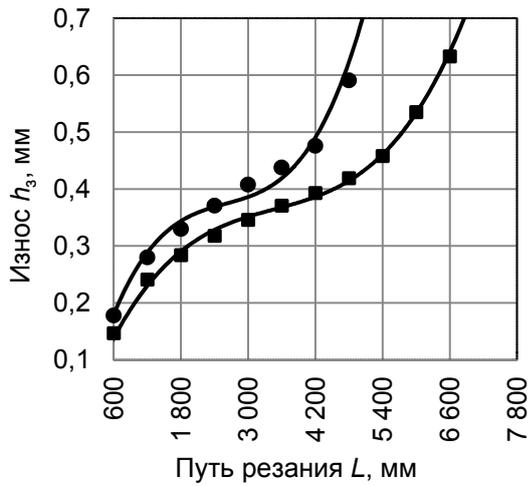
Т а б л и ц а 1. — Режимы резания при фрезеровании заготовок из стали 45 концевыми фрезами из быстрорежущей стали P6M5 без упрочнения и с АДУ

Номер опыта	Скорость резания $v$ , м / мин	Подача на зуб $s_z$ , мм / зуб	Глубина фрезерования $t$ , мм	Число оборотов фрезы $n_f$ , об. / мин	Подача стола $s_{ст}$ , мм / об
1	15,83	0,0334	1,3	630	42
2	12,56	0,033	1,3	500	33
3	15,83	0,0334	2,1	630	42
4	15,83	0,0334	0,5	630	42
5	15,83	0,02	1,3	630	26
6	15,83	0,051	1,3	630	64
7	20,10	0,033	1,3	800	52

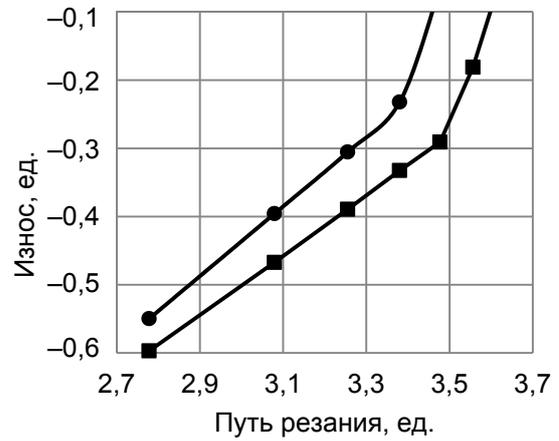
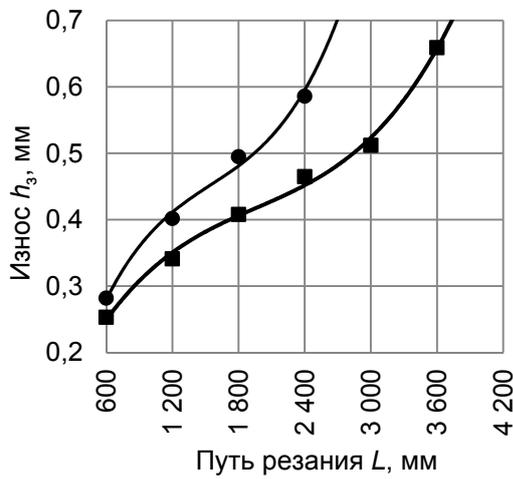


**Рисунок 12.** — Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  концевых фрез из Р6М5 без упрочнения и с АДУ от пути резания при фрезеровании стали 45: а — в абсолютной системе; б — в логарифмической системе

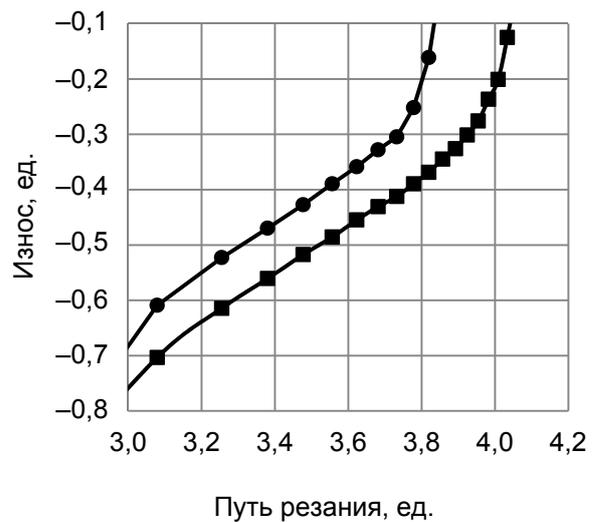
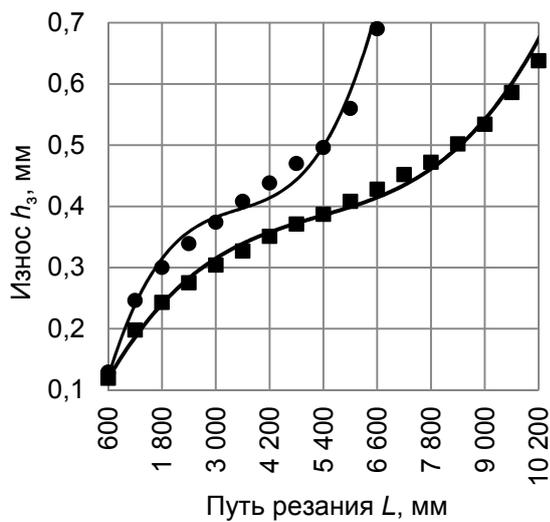
Опыт 4



Опыт 5



Опыт 6

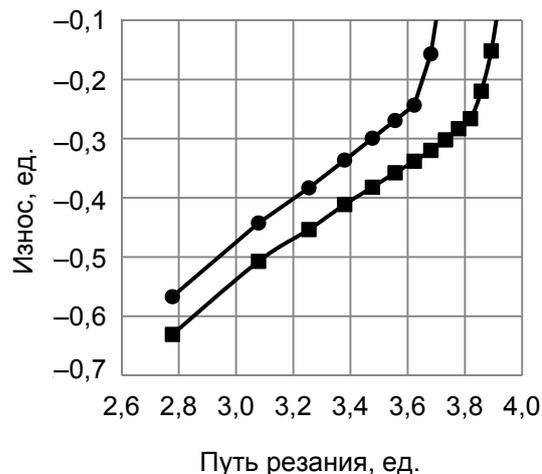
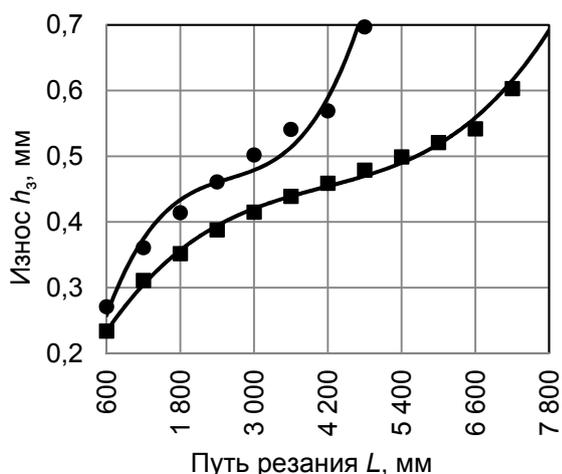


а)

б)

Продолжение рисунка 12

Опыт 7



Окончание рисунка 12

После обработки экспериментальных данных (таблица 2) по (2) получены зависимости износа  $h_3$  от пути резания  $L$  в виде степенных функций, значения которых приведены в таблице 3.

Экспериментальные кривые и зависимости, построенные по формулам таблицы 3, износа по задней поверхности  $h_3$  от пути резания  $L$  для концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5 при фрезеровании заготовок из стали 45 на различных режимах резания представлены на рисунке 13.

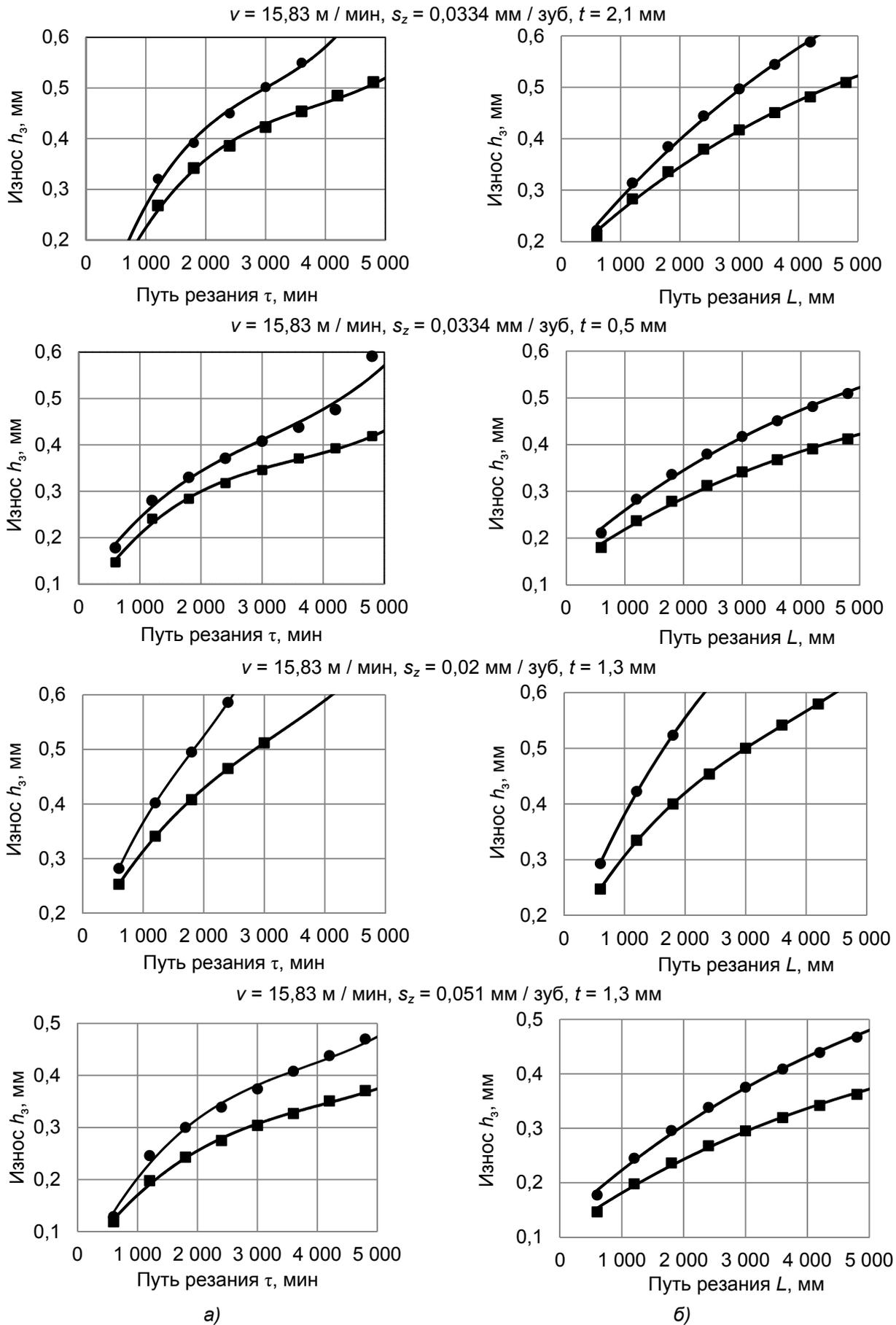
Т а б л и ц а 2. — Результаты расчетов коэффициентов для зависимостей износа от времени и коэффициентов повышения стойкости фрез диаметром 8 мм из Р6М5

Координаты	Номер точки		$h_{31}$	$h_{3i}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$
<b>Опыт 1</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	9	-0,5607	-0,2526	3,0792	3,7482	<b>0,460</b>	
Абсолютные	2	9	0,275	0,556	1 200	5 600		<b>0,01</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	10	-0,6326	-0,3458	3,0792	3,7782	<b>0,41</b>	
Абсолютные	2	10	0,233	0,451	1 200	6 000		<b>0,013</b>
<b>Опыт 2</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	6	-0,5768	-0,3080	3,0792	3,5563	<b>0,563</b>	
Абсолютные	2	6	0,265	0,492	1 200	3 600		<b>0,005</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	8	-0,6478	-0,3410	3,0792	3,6812	<b>0,510</b>	
Абсолютные	2	8	0,222	0,452	1 200	4 800		<b>0,006</b>

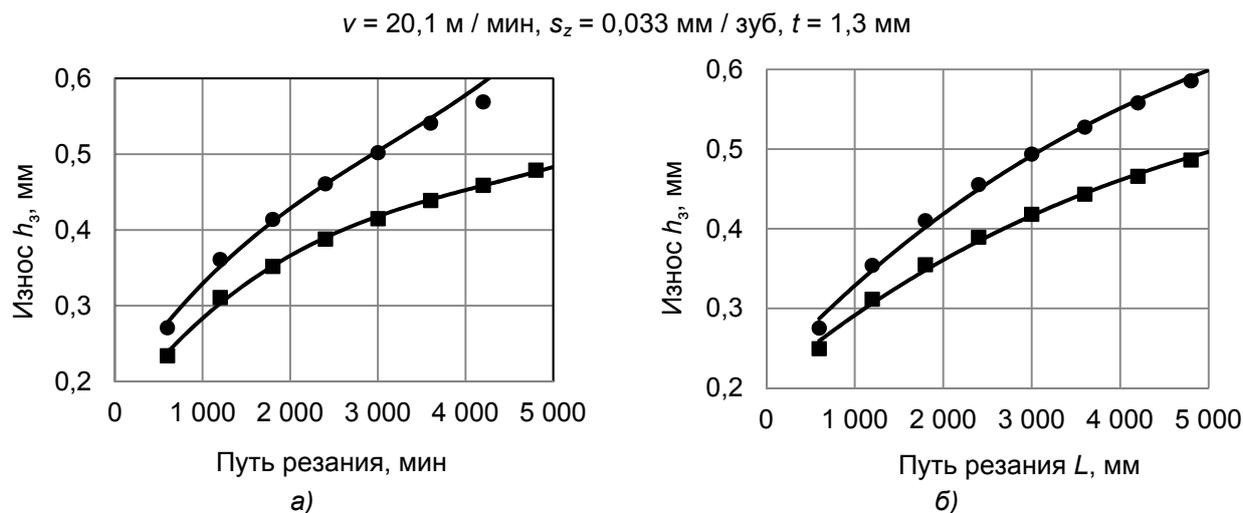
Окончание таблицы 2

Координаты	Номер точки		$h_{31}$	$h_{3i}$	$L_1$	$L_i$	$n_0$	$a$
<b>Опыт 3</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,4935	-0,2211	3,0792	3,6232	<b>0,501</b>	
Абсолютные	2	7	0,321	0,601	1 200	4 200		<b>0,009</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	3	9	-0,4660	-0,2636	2,6956	3,1727	<b>0,424</b>	
Абсолютные	3	9	0,342	0,545	1 800	5 400		<b>0,014</b>
<b>Опыт 4</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,5528	-0,3224	3,0792	3,6232	<b>0,424</b>	
Абсолютные	2	7	0,280	0,476	1 200	4 200		<b>0,014</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	8	-0,6180	-0,3778	3,0792	3,6812	<b>0,399</b>	
Абсолютные	2	8	0,241	0,419	1 200	4 800		<b>0,014</b>
<b>Опыт 5</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	1	4	-0,5498	-0,2321	2,7782	3,3802	<b>0,528</b>	
Абсолютные	1	4	0,282	0,586	600	2 400		<b>0,010</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	1	5	-0,5969	-0,2907	2,7782	3,4771	<b>0,438</b>	
Абсолютные	1	5	0,253	0,512	600	3 000		<b>0,015</b>
<b>Опыт 6</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	9	-0,6091	-0,3045	3,0792	3,7324	<b>0,466</b>	
Абсолютные	2	9	0,246	0,496	1 200	5 400		<b>0,009</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	3	11	-0,6144	-0,3686	3,2553	3,8195	<b>0,436</b>	
Абсолютные	3	11	0,243	0,428	1 800	6 600		<b>0,009</b>
<b>Опыт 7</b>								
<i>Фреза неупрочненная</i>								
Логарифмические	2	7	-0,4425	-0,2449	3,0792	3,6232	<b>0,363</b>	
Абсолютные	2	7	0,361	0,569	1 200	4 200		<b>0,027</b>
<i>Фреза, упрочненная АДУ</i>								
Логарифмические	2	10	-0,5072	-0,2832	3,0792	3,7782	<b>0,321</b>	
Абсолютные	2	10	0,311	0,521	1 200	6 000		<b>0,032</b>





Продолжение рисунка 13



Окончание рисунка 13

Анализ зависимостей, построенных по формулам, и экспериментальных показывает достаточно хорошую их сходимость (погрешность при  $L$  от 0 до 4 000 мм до 8 %). При  $v = 12,56 \dots 20,1 \text{ м / мин}, s_z = 0,02 \dots 0,0334 \text{ мм / зуб}, t = 0,5 \dots 2,1 \text{ мм}$  при фрезеровании заготовок из стали 45 на концевых фрезах из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения образуется износ по задней поверхности  $h_3 = 0,44 \dots 0,81 \text{ мм}$ , а на фрезах, упрочненных методом АДУ, величина износа по задней поверхности составляет  $h_3 = 0,37 \dots 0,58 \text{ мм}$ . Величина износа снижается на 18...51 %.

**Заключение.** Установлено, что износ по задней поверхности, равный  $h_3 = 0,4 \text{ мм}$  для фрез диаметром 12 мм из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 наступает при  $\tau = 150 \text{ мин}$ , а для фрез диаметром 12 мм из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения — при  $\tau = 95 \text{ мин}$ , т. е. стойкость повышается в 1,58 раза. Влияние скорости резания на износ по задней поверхности зуба фрезы из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, носит экстремальный характер, причем на скорости резания 15,83 м / мин наблюдается минимальная величина износа. При увеличении подачи на зуб износ зуба фрезы из стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании образцов из стали 45 уменьшается, при этом экстремума износа от подачи на зуб не наблюдается. При глубинах резания до 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит снижение износа зуба фрезы, а при глубинах резания свыше 1,3 мм при увеличении глубины резания происходит увеличение износа зуба фрезы, влияние глубины резания на износ носит экстремальный характер.

Полученные эмпирические зависимости износа фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ и без упрочнения, от пути фрезерования, имеющие достаточно хорошую сходимость (погрешность до 8 %), показывают, что для всех режимов резания в диапазоне: скорость резания — 12,56...20,1 м / мин, подача на зуб — 0,02...0,0334 мм / зуб, глубина фрезерования — 0,5...2,1 мм, при фрезеровании заготовок из стали 45 на концевых фрезах из быстрорежущей стали Р6М5 без упрочнения образуется износ по задней поверхности 0,44...0,81 мм, а на фрезах, упрочненных методом АДУ, величина износа по задней поверхности составляет 0,37...0,58 мм. Полученными зависимостями рекомендовано пользоваться при определении прогнозируемой величины износа при указанных режимах резания для определения технологической стойкости концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом АДУ.

При обработке фрезами из быстрорежущей стали P6M5, упрочненными методом АДУ, явно прослеживается наличие оптимальных режимов резания, при которых присутствует минимальный износ зуба фрезы. Определение таких оптимальных режимов резания позволит дополнительно повысить стойкость фрез из быстрорежущей стали P6M5, упрочненных методом АДУ [9].

Таким образом, осевой фрезерный инструмент из быстрорежущей стали P6M5, упрочненный аэродинамическим звуковым методом, при фрезеровании заготовок из стали 45 обеспечивает относительно неупрочненных фрез из стали P6M5 снижение износа по задней поверхности на 18...51 % на длине фрезерования 4 000 мм при различных режимах резания.

#### Список цитируемых источников

1. *Кожевников, Д. В.* Резание материалов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. — М. : Машиностроение, 2007. — 304 с.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков; дата публ.: 20.07.2015.
3. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков ; дата публ.: 30.06.2017.
4. *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.
5. *Горавский, И. А.* Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 83—84.
6. *Горавский, И. А.* Методика проведения измерения износа вращающегося режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23—24 апр. 2020 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2020. — С. 37—38.
7. *Горавский, И. А.* Методика проведения измерения износа вращающегося режущего инструмента по задней поверхности / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука—практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 42—43.
8. *Жигалов, А. Н.* Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалова // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. № 7. — С. 49—63.
9. *Жигалов, А. Н.* Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В354, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. № 8. — С. 21—32.

Поступила в редакцию 09.09.2021.