

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.24412/2077-8481-2023-4-5-13

УДК 621.923

**А. Н. ЖИГАЛОВ**<sup>1, 2</sup>, *д-р техн. наук, доц.*

**И. А. ГОРАВСКИЙ**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

<sup>3</sup>Барановичский государственный университет (Барановичи, Беларусь)

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ СТАЛИ Р6М5

#### Аннотация

Установлено, что при обработке инструментом с аэродинамическим звуковым упрочнением (АДУ) на оптимальных технологических режимах резания обеспечивается увеличенный в 1,8 раза ресурс инструмента в отличие от обработки аналогичным инструментом без упрочнения. Наряду с повышением ресурса упрочненного инструмента одновременно обеспечивается и увеличение производительности обработки на 7,5 %.

#### Ключевые слова:

концевой фрезерный инструмент из стали Р6М5, метод аэродинамического звукового упрочнения, износ, ресурс.

#### Для цитирования:

Жигалов, А. Н. Технологическое обеспечение ресурса концевой фрезерного инструмента из стали Р6М5 / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 5–13.

#### Введение

Около 60 % механической обработки деталей машин связано с процессами прерывистого резания. При таких процессах возникают явления удара при врезании зуба инструмента в материал и при выходе из материала, циклические воздействия температуры на инструмент при входе и выходе его из заготовки, охлаждении инструмента при холодных ходах. Эти явления усугубляются из-за малых диаметров инструмента, в результате чего режущие зубья инструмента скалываются и ресурс такого инструмента является невысоким. Типичным представителем инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, является концевой фре-

зерный инструмент (концевые, шпоночные и другие фрезы). Концевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей широко применяется в современном машиностроении для обработки различных пазов, уступов, шпоночных канавок и других поверхностей деталей машин. Наиболее распространен инструмент из быстрорежущей стали Р6М5, потребление которого достигает 80 % от всего объема выпуска быстрорежущей стали.

Концевой фрезерный инструмент из стали Р6М5 обладает низкой ударной вязкостью, равной 27...48 кДж/м<sup>2</sup>, при высокой твердости 63...65 HRC, что не позволяет осуществлять эффективную обработку при процессах прерывистого резания. Концевой фрезерный ин-

струмент имеет пониженный в 1,6–2 раза период стойкости в сравнении с другими видами фрез (цилиндрическими, дисковыми и др.). Противостоять этому возможно путем совершенствования структуры инструмента методами упрочнения, такими как ионно-плазменная обработка, цементация, ионно-катодное распыление, электроискровое легирование, магнитно-импульсное упрочнение, криогенная обработка и др.

Наиболее перспективным в научном и эффективным в прикладном плане является метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), позволяющий при сохранении исходной твердости обеспечивать повышение ударной вязкости сплавов и за счет этого повышать ресурс металлорежущего инструмента, работающего при прерывистых процессах резания.

Метод АДУ заключается в предварительном нагреве изделия до температуры хладостойкости и затем воздействии на него энергией от резонансных волн звуковой частоты [1]. Однако метод АДУ не приспособлен для концевых фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей, т. к. не исследован для такого рода инструмента, отсутствуют рекомендации по его техническому применению.

Повышение эффективности работы концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали связано с увеличением качества и количества обработанных деталей при минимальной добавочной стоимости, с заданными параметрами точности, шероховатости и режимами резания. Согласно ГОСТ 25751–83 под ресурсом режущего инструмента (лезвия) следует понимать наработку режущего инструмента (лезвия) от начала резания новым инструментом (лезвием) до достижения им предельного состояния, под которым подразумевается состояние режущего инструмента (лезвия), характеризующее невозможностью или нецелесообразностью его восстановления.

Для эффективного применения концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ, необходимо знать оптимальные режимы резания, позволяющие достигать наибольший ресурс такого инструмента. На ресурс инструмента наибольшее влияние оказывает износ режущих лезвий зубьев фрез. При фрезеровании изнашиванию подвергаются задние поверхности главных лезвий на цилиндрической части и вспомогательных лезвий на торцевой части зубьев фрез. Наиболее интенсивному изнашиванию подвергаются главные лезвия, в связи с чем измерение износа ведется по значению износа на задней поверхности  $h_z$  главных лезвий режущих зубьев. На ресурс, в свою очередь, огромное влияние оказывают такие режимы резания, как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$  [2].

### Основная часть

Для установления эффективности резания концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного методом АДУ, были проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурса концевых фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного и с АДУ, от комплексного влияния трех режимов резания (скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$ , глубины резания  $t$ ). Проводились семь опытов при вариации максимальных и минимальных значений исследуемых режимов резания ( $v, s, t$ ) по [3].

Математическое описание количественной оценки величины износа режущего лезвия по задней поверхности  $h_z$  от пути резания  $L$  описывалось в виде степенной функции [4]:

$$h_z = a \cdot L^n, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий абсолютную величину износа от времени;  $n$  – коэффициент, представляющий собой показатель интенсивности износа.

Коэффициенты  $a$  и  $n$  определялись от прологарифмированной функции (1) в виде

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{z_i} - h_{z_1}}{L_i - L_1}; \quad (2)$$

$$a_u = \frac{h_{z_i}}{2L_i^n} + \frac{h_{z_1}}{2L_1^n}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол подъема кривой износа от пути резания;  $h_{z_i}$ ,  $h_{z_1}$  – значения износа в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно;  $L_i$ ,  $L_1$  – значения пути в логарифмической системе координат в  $i$ -й и первой точках соответственно.

По результатам замеров из экспериментальных опытов строились графики изменения износа  $h_z$  от пути резания  $L$  в абсолютной и логарифмической системах [5]. На графиках в логарифмической системе замерялись значения координат для начальной и конечной точек, между которыми соблюдалась прямолинейность линии, и соответствующие им значения на графиках в абсолютной системе.

Затем определялись показатели  $a$  и  $n$  по зависимостям (2) и (3) при уровнях варьирования факторов (нижний, основной, верхний) через системы уравнений в виде квадратичных функций, которые решались посредством представления зависимостей износа от однофакторных и многофакторных параметров резания ( $v$ ,  $s_z$ ,  $t$ ) в виде также квадратичных функций, для которых определялись коэффициенты в центре плана. Графики износа в абсолютных и логарифмических системах координат приведены в [5].

Далее были произведены расчеты и получены значения стойкости  $T$

концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5:

– без упрочнения

$$T_H = -166v^2 + 5451v - 10463787s_z^2 + 932316s_z - 2531t^2 + 4896t - 58886; \quad (4)$$

– с АДУ

$$T_Y = -195v^2 + 6483v - 9680439s_z^2 + 1032595,4s_z - 2763t^2 + 3906t - 66435. \quad (5)$$

Ресурс  $T_p$  инструмента от стойкости определялся по зависимости [6]

$$T_p = 10^{-3} v s_z T. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) зависимости ресурса  $T_p$  для фрез из Р6М5 без и с АДУ следующие:

$$T_{pH} = 10^{-3} v s_z (-166v^2 + 5451v - 10463787s_z^2 + 932316s_z - 2531t^2 + 4896t - 58886); \quad (7)$$

$$T_{pY} = 10^{-3} v s_z (-195v^2 + 6483v - 9680439s_z^2 + 1032595s_z - 2763t^2 + 3906t - 66435). \quad (8)$$

Анализ зависимостей (7) и (8) позволил установить, что комбинация режимов резания для концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного АДУ, оказывает на 15 % большее влияние на величину износа по сравнению с неупрочненным инструментом.

В результате математического моделирования зависимостей (7) и (8) от режимов резания установлено, что наибольшее влияние на ресурс фрез из Р6М5 с АДУ оказывает скорость резания

(87 %), затем подача на зуб (12 %), глубина резания оказывает незначительное влияние (1 %) в отличие от инструмента без упрочнения, для которого влияние скорости резания – 19,6 %, подачи на зуб – 78 %, глубины резания – 2,4 %, что надо учитывать при назначении режимов резания.

Предложены принципы оптимизационного управления при назначении режимов обработки концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым воздействием, – необходимо работать на повышенных скоростях резания и подачах на зуб.

На рис. 1 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса

концевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного  $T_{рн}$  (7) и упрочненного АДУ  $T_{ру}$  (8), при обработке стали 45 от одного из параметров, таких как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$ .

На рис. 2 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, неупрочненного  $T_{рн}$  (7) и упрочненного АДУ  $T_{ру}$  (8), при обработке стали 45 от двух технологических параметров, таких как скорость резания  $v$ , подача на зуб  $s_z$  и глубина резания  $t$ , при постоянном значении третьего.

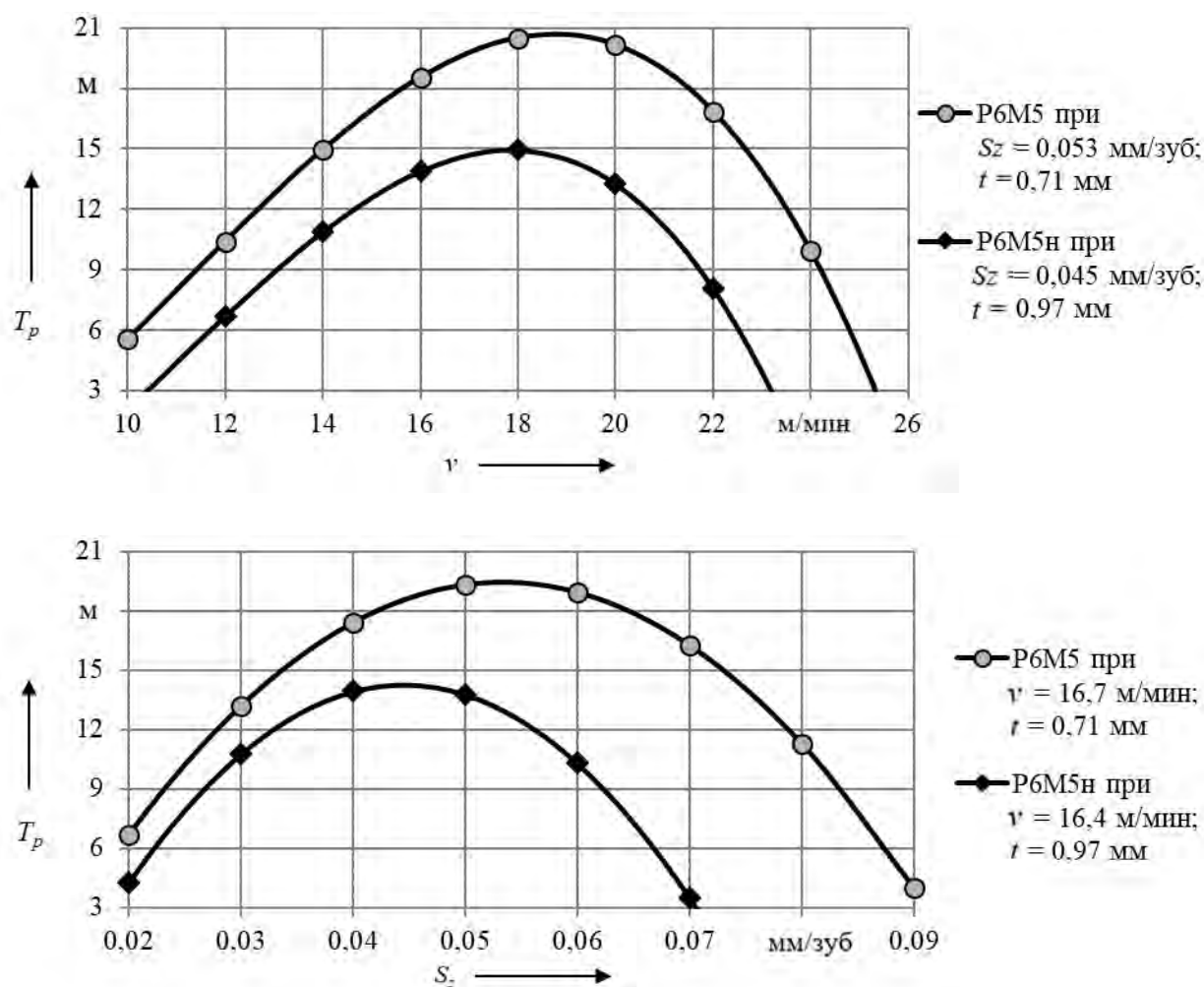
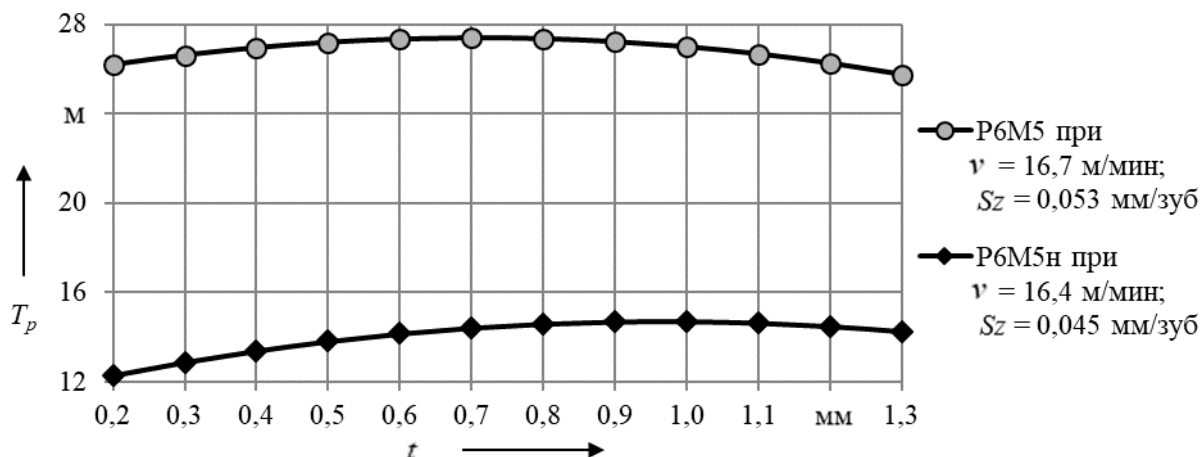


Рис. 1. Зависимости ресурса  $T_p$  фрез  $\varnothing 8$  Р6М5 без и с АДУ при фрезеровании стали 45 от скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$  и глубины резания  $t$



Окончание рис. 1

Оптимальные значения режимов резания определялись путем компьютерного моделирования полученных зависимостей ресурса инструмента (7) и (8). Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях неприемлема в связи с достаточно высокой степенью взаим-

ного влияния исследуемых параметров.

Оптимальные значения скорости резания, подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечивается максимальный ресурс концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 без и с АДУ, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Оптимальные технологические режимы резания при фрезеровании стали 45 фрезами P6M5 без и с АДУ, обеспечивающие наибольшую производительность и ресурс концевой фрезерного инструмента из P6M5

Технологический режим резания	Обработка фрезой P6M5		Рост, %
	без	с АДУ	
Скорость резания $v_{opt}$ , м/мин	16,4	17,3	+6
Подача на зуб $s_{zopt}$ , мм/зуб	0,045	0,053	+18
Глубина резания $t_{opt}$ , мм	0,97	0,71	-26
Производительность $\Pi_{opt}$ , см <sup>3</sup> /мин	0,97	0,71	-26
Ресурс $T_p$ , м	8,972	16,4	+80

Для концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали P6M5 после АДУ с целью повышения ресурса инструмента необходимо повышать скорости резания на 6 %, подачу на зуб на 18 % по сравнению с неупрочненным инструментом. Исходя из чего установлено, что при фрезеровании стали 45

концевыми фрезами из быстрорежущей стали P6M5, упрочненных АДУ, на оптимальных режимах резания одновременно с увеличением ресурса инструмента в 1,8 раза повышается и производительность обработки на 7,5 % за счет увеличения скорости резания на 6 % и подачи на зуб на 18 %.

а)

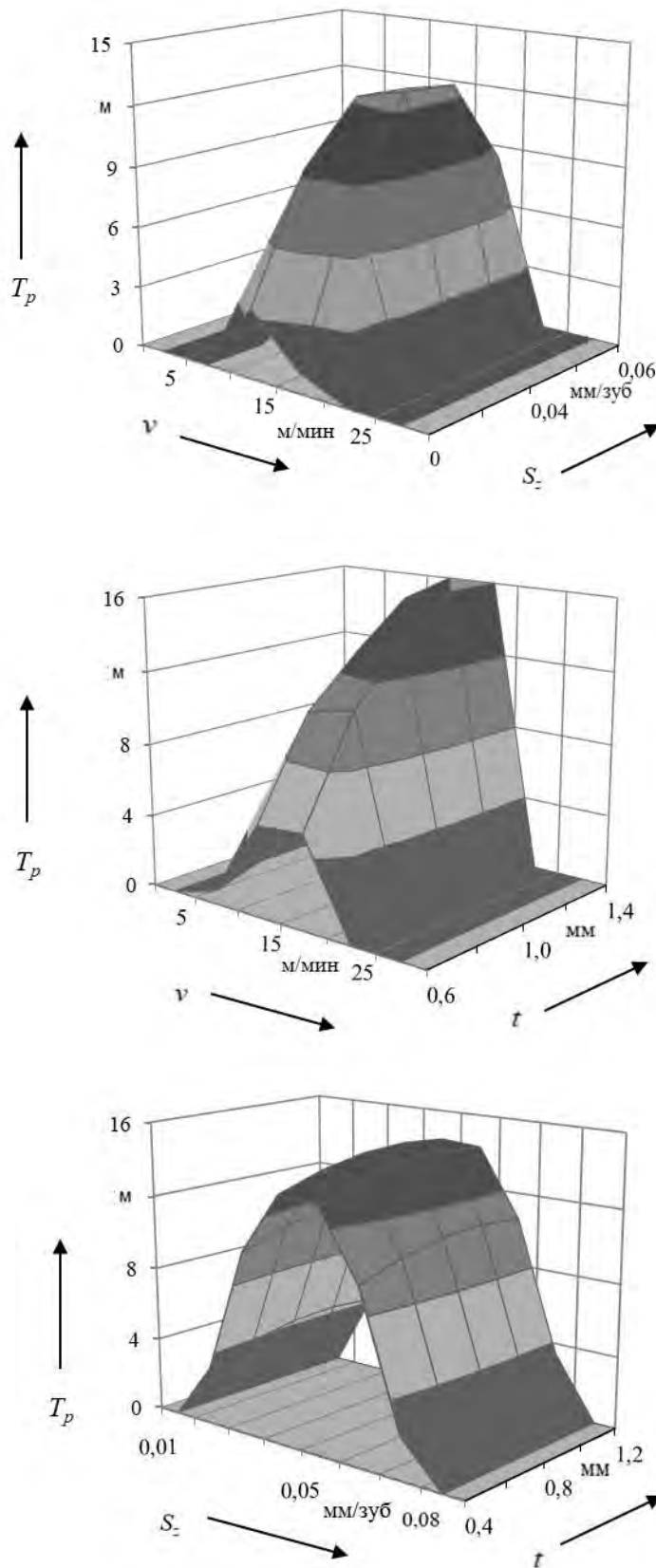
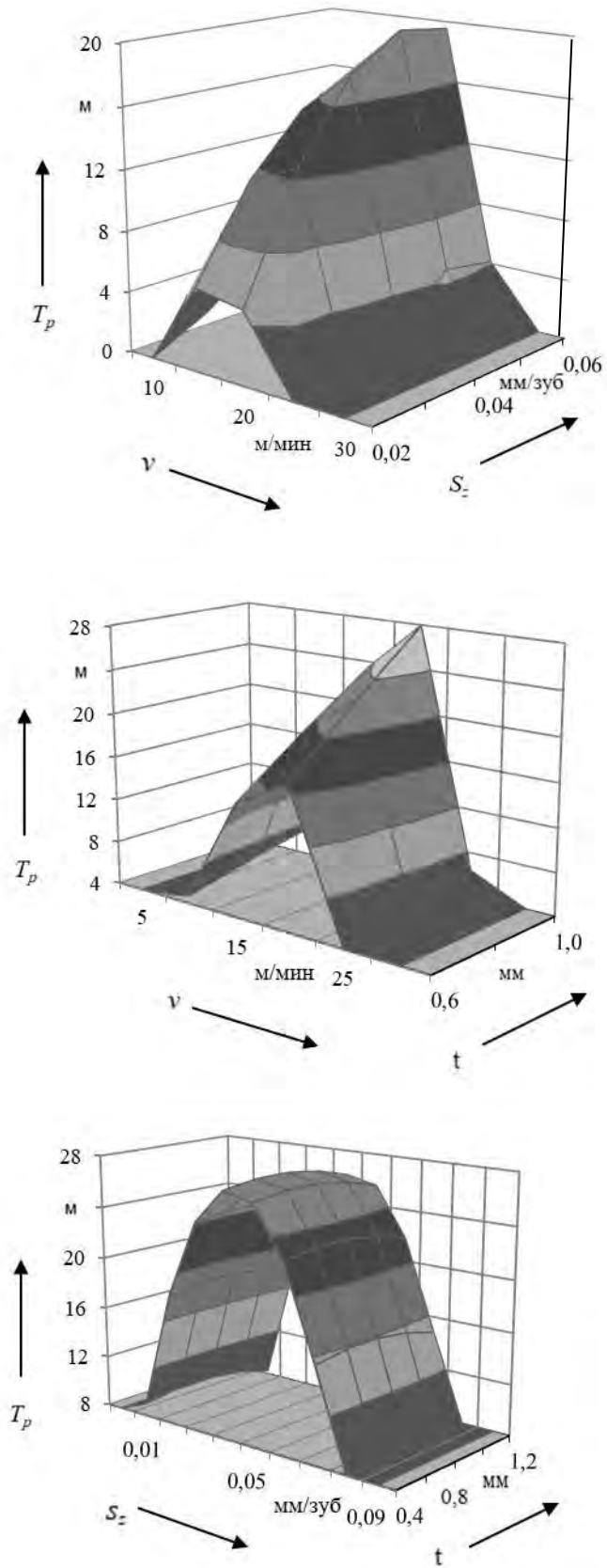


Рис. 2. Зависимости ресурса  $T_p$  фрез из Р6М5 без (а) и с АДУ (б) при фрезеровании стали 45 от скорости резания  $v$ , подачи на зуб  $s_z$  и глубины резания  $t$

б)



Окончание рис. 2

### **Выводы**

В результате многофакторных экспериментальных и теоретических исследований влияния технологических режимов резания при обработке стали 45 концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 на ресурс инструмента установлено, что при обработке инструментом с АДУ на оптимальных технологических режимах резания (скорость резания – 17,3 м/мин, подача на зуб – 0,053 мм/зуб, глубина резания – 0,71 мм) обеспечивается увеличенный в 1,8 раза ресурс инструмента в отличие от обработки аналогичным инструментом без упрочнения, для которого оптимальные значения следующие:

скорость резания – 16,4 м/мин, подача на зуб – 0,045 мм/зуб, глубина резания – 0,97 мм. Наряду с повышением ресурса упрочненного инструмента одновременно обеспечивается и увеличение производительности обработки на 7,5 %.

Рекомендовано осуществлять механическую обработку заготовок концевым фрезерным инструментом из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненным аэродинамическим звуковым воздействием, на повышенных технологических режимах резания, определенных путем оптимизации, что позволит обеспечить не только повышение ресурса самого режущего инструмента, но и производительности обработки.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **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.
2. **Жигалов, А. Н.** Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2022. – № 1 (11). – С. 14–23.
3. **Горавский, И. А.** Методология повышения ресурса инструмента из быстрорежущей стали аэродинамическим звуковым воздействием / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Е. А. Дерман // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 20–21 окт. 2022 г. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 104–107.
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. Техн. науки. – 2019. – № 7. – С. 49–63.
5. **Жигалов, А. Н.** Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2021. – № 2 (10). – С. 24–41.
6. **Грановский, Г. И.** Резание металлов: учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.

*Статья сдана в редакцию 30 октября 2023 года*

Контакты:

jigalov6@mail.ru (Жигалов Анатолий Николаевич);  
igorgoravskii@mail.ru (Горавский Игорь Андреевич).



**A. N. ZHIGALOV, I. A. GORAVSKY**

**TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE LIFE CYCLE OF END MILLING TOOLS  
MADE OF R5M5 STEEL**

**Abstract**

It has been established that machining with a tool hardened by aerodynamic sound method (ASH) increases tool life by 1,8 times at optimal technological cutting conditions, in contrast to processing with a similar tool without hardening. Along with increasing the service life of the hardened tool, a 7,5 % increase in machining productivity is simultaneously ensured.

**Keywords:**

end milling tool made of R6M5 steel, aerodynamic sound hardening method, wear, service life.

**For citation:**

Zhigalov, A. N. Technological support of the life cycle of end milling tools made of R5M5 steel / A. N. Zhigalov, I. A. Goravsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 4 (81). – P. 5–13.