

УДК 621.91.01
DOI: 10.12737/20293

А.Г. Серебренникова, М.А. Козлова, О.П. Харина

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена программно-аппаратная реализация определения оптимальной скорости резания при обработке труднообрабатываемого материала на примере стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ20. Описана методика проведения экспериментов, подтверждающих данный экспресс-метод.

Ключевые слова: программно-аппаратная реализация, титановый сплав ВТ20, сталь 12Х18Н10Т, скорость резания, мощность резания, температура резания, труднообрабатываемые материалы.

A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova, O.P. Kharina

FIRMWARE REALIZATION FOR OPTIMUM CUTTING SPEED DEFINITION AT HARD-TO-MACHINE MATERIAL WORKING

A scientific and technological advance is inseparably linked with the development of leading mechanical engineering branches: aerospace industry, rocket production, electronic and atomics, power and chemical engineering to which high requirements are made. A constant increase of requirements to the quality of complete products, their life and reliability causes a necessity to use the certain groups of materials possessing high mechanical strength, wear resistance, corrosion resistance, high temperature strength. To the materials with such properties belong alloys based on titanium and corrosion resistant steel forming hard-to-machine material group (HMG).

On the territory of the city of Komsomolsk-upon-Amur there are two works of defense industry (DIW). According to the mean estimate about 15-17% of DIW parts are used in ships, and about 10-20% - in planes.

The firmware realization for the optimum cutting speed definition at hard-to-machine material, by the example of 12H18N10T steel and TT20 alloy is considered. The procedure for carrying out experiments confirming this express-method is described.

Key words: firmware realization, TT20 titanium alloy, 12H18N10T steel, cutting speed, cutting temperature, hard-to-machine materials.

Непрерывное повышение требований к качеству готовых изделий, их долговечности и надежности вызывает необходимость применения определенных групп материалов, обладающих высокой механической прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью. К материалам с такими свойствами относятся сплавы на основе титана и коррозионно-стойкие стали – материалы группы труднообрабатываемых (ТОМ).

Теоретическое обоснование процесса обработки материалов данной группы приведено в статьях [1;2]. В данной работе представлена реализация экспресс-метода определения оптимальной скорости резания.

Рассмотрим такой показатель, как мощность резания в виде функции скорости резания. В соответствии с известными зависимостями механики

$$W(V) = \frac{dA}{dt} = \frac{\int P(V) ds}{dt} = \int P(V) \frac{ds}{dt} = \int P(V) dV, \quad (1)$$

где A – работа резания, Дж; P – сила резания, Н; V – скорость резания, м/с.

Представим падающую характеристику силы резания в виде какой-либо мо-

нотонно убывающей, например гиперболической, функции:

$$P_z(V) = C_1 + \frac{C_2}{V}, \quad (2)$$

где C_1 – некоторые коэффициенты.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим мощность резания в виде

$$W(V) = \int \left(C_1 + \frac{C_2}{V} \right) dV = C_1 V + C_2 \ln(V) + C_3. \quad (3)$$

В обобщенном виде графики функций приведены на рис. 1.

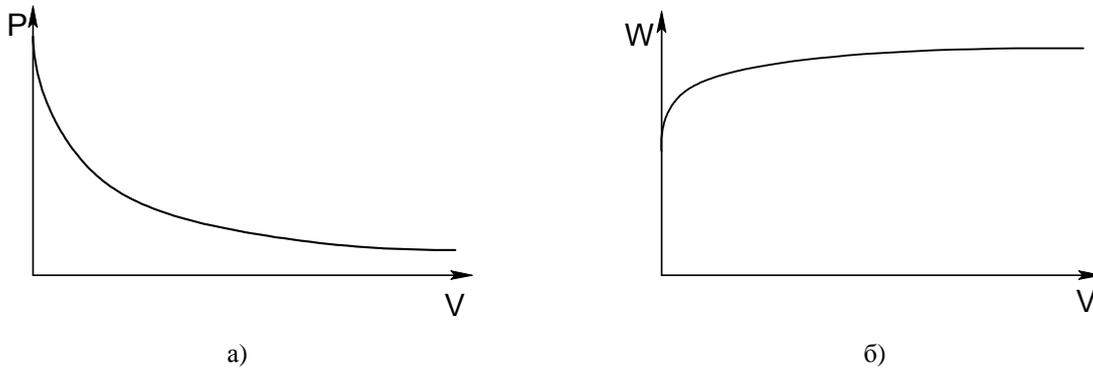


Рис. 1. Обобщенные графики падающей характеристики, отображающие стабилизацию P и W

Пользуясь языком математического анализа и рассматривая мощность как функцию скорости, можно сказать, что выражение (3) является ограниченной сверху функцией, т.е.

$$\lim_{V \rightarrow \infty} W(V) < const.$$

Таким образом, границы диапазона оптимальных скоростей определяются как значения скорости резания, значительное увеличение которых не приводит к заметному росту мощности резания, при которых температура и равнодействующая сила резания принимают минимальные значения [4].

Тогда практическая задача сводится к определению границ такого диапазона. Теоретической методики расчета пока не

создано, поэтому оптимальным на данном этапе является экспериментальный метод исследования.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы был разработан лабораторно-исследовательский комплекс на базе станка 1К625 и лабораторного стенда STD.201-2.

На рис. 2 представлен общий вид лабораторно-исследовательского комплекса. Основным элементом выступает динамометр STD 201-2, который функционально состоит из головки-резцедержателя, интерфейсного блока, модуля подключения датчиков, персонального компьютера и комплекта кабелей.



Рис. 2. Схема расположения лабораторно-исследовательского комплекса

В экспериментах использовались диски толщиной $b = 3$ мм и диаметром 180 мм из материалов 12X18H10T и BT20, относящихся к группе ТОМ.

Базовое программное обеспечение динамометра STD 201-2, который входит в программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяет провести регистрацию сил реза-

ния и вибраций (рис. 3) и получить значения в виде примитивных графиков и таблицы. Это не позволяет в полной мере провести анализ полученных данных. Поэтому для более детального анализа был разработан алгоритм и программа, входящая в ПАК.

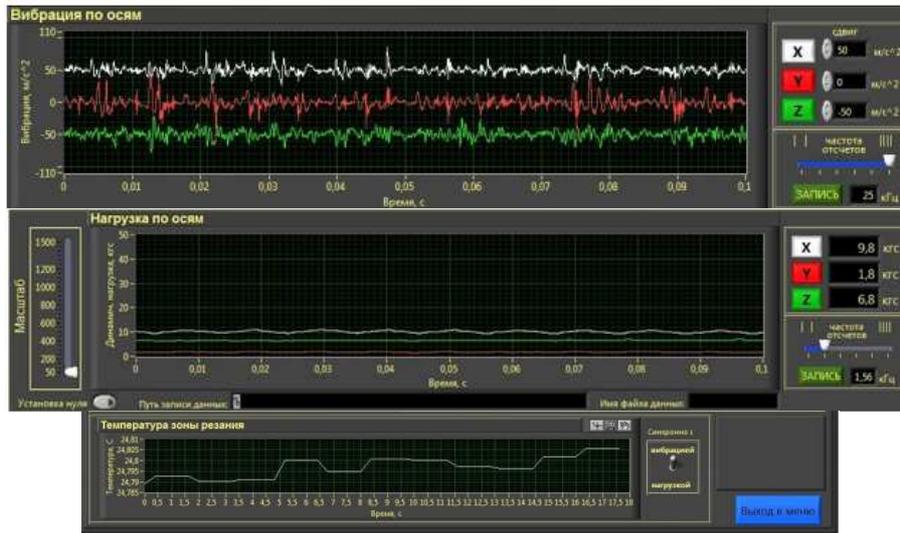


Рис. 3. Примеры регистрации вибрации, сил резания и температуры на динамометре STD 201-2

Программа реализована средствами программной среды MathLAB. Для работы программы необходимо наличие установленного пакета MathLAB на компьютере пользователя. Преимущество выбранного подхода к реализации программы заключается в скорости обработки данных. Так, при самой низкой дискретизации за время $T = 1$ с регистрируется 80 значений по ка-

ждой из осей по силе и более 2500 значений по температуре. Уже при времени обработки $T = 600$ с количество значений по каждой из осей по силе становится равным 48 000, по температуре – 1 500 000. Скорость обработки этих данных в программе не превышает 80 секунд. Окно программы для ввода исходных данных представлено на рис. 4.

Введите исходные значения

Начальный диаметр

Подача

Обороты

Частота дискретизации

Выберите характеристики для построения графиков

Временные зависимости

Силловые зависимости

Температурные зависимости

Скоростные зависимости

Мощностные зависимости

Выберите степень аппроксимации данных

1

2

3

Вычисления

Рис. 4. Окно программы для ввода исходных данных

Исходные данные передаются в программу в виде файлов MS Office Excel, которые формирует ПАК. Далее программа считывает исходные значения и формирует массив данных для последующих расчетов и анализа. Программа исключает возможную погрешность при ручном анализе данных и позволяет пользователю моделировать различные зависимости при помощи графиков.

Методика проведения эксперимента:

1. Установить и закрепить диск в специальной оправке.

2. Установить оправку в патрон токарно-винторезного станка 1К625 и поджать задним центром. Способ крепления дисков представлен на рис. 5.

3. Закрепить резец в люльке резцедержателя лабораторного стенда.

4. Установить режимы обработки: частоту вращения n , подачу S .

5. Провести процесс обработки (рис. 5).

6. В процессе обработки дисков ведется обработка и перевод интерфейсным блоком динамических сигналов, поступающих с динамометра, в электрические, поступающие в системный блок компьютера, для записи на жесткий диск.

7. После обработки данных в программной среде STD 201-2, отображающей полученные значения на мониторе компьютера в виде графиков, происходит сохранение этих значений в Excel-файле в виде ряда чисел. Пример вывода данных в Excel представлен на рис. 6.

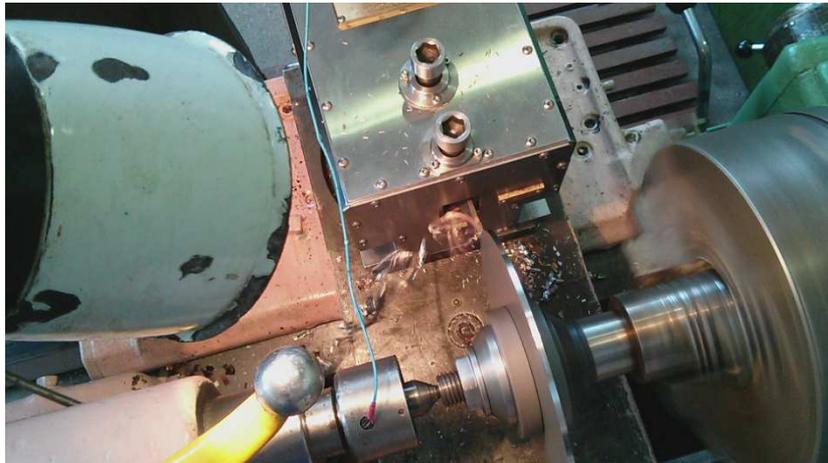


Рис. 5. Процесс обработки диска

	A	B	C	D	E	F
1	Время, с - Strain0 ()	Динамич. нагрузка, кгс - Strain0 ()	Время, с - Plot 1	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 1	Время, с - Plot 2	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 2
2	0	-2,25	0	44,54	0	20,13
3	0	-4,43	0	29,69	0	8,02
4	0	-3,68	0	48,82	0	27,56
5	0	-1,54	0	51,55	0	44,64
6	0,01	-0,7	0,01	35,95	0,01	9,3
7	0,01	2,88	0,01	41,02	0,01	11,51
8	0,01	4,49	0,01	46,3	0,01	44,78
9	0,01	-2,04	0,01	32,62	0,01	11,15
10	0,01	-5,61	0,01	33,14	0,01	-1,39
11	0,01	-1,51	0,01	37,82	0,01	31,74
12	0,01	0,72	0,01	41,08	0,01	23,56
13	0,01	2,71	0,01	53,95	0,01	26,11

Рис. 6. Пример вывода данных в Excel

8. Провести обработку сведенных усредненных значений в разработанной программе анализа данных.

Алгоритм обработки полученных значений состоит из следующих этапов:

1) расчет текущего диаметра диска D_i по формуле

$$D_i = D_0 - \frac{S_i n T_i}{60},$$

где $D_0 = 180$ – начальный диаметр диска, мм; T – текущее время, с; $S_{об}$ – подача на оборот, мм/об; n – частота вращения шпинделя, мин⁻¹;

2) расчет текущей скорости V_i по формуле

$$V_i = \frac{\pi D_i n}{1000};$$

3) расчёт равнодействующей силы резания по формуле

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2};$$

4) расчет мощности резания по формуле

$$N_{рез} = \frac{P_z V}{60 \cdot 102} + \frac{P_x S n}{1000 \cdot 60 \cdot 102},$$

Обработка титанового сплава BT20

Исходные данные при обработке титанового сплава BT20: $D_0 = 180$ – начальный диаметр диска, мм; $S = 0,07$ – подача, мм/об; $n = 200$ – частота вращения шпинделя, мин⁻¹.

где числа в знаменателе выражают перевод единиц измерения: 60 – минуты в секунды, 1000 – миллиметры в метры, 102 – Н·м/с – в кВт.

9. Построить графики зависимости параметров от времени T и скорости V .

10. Проанализировать получившиеся графики.

Исходные данные эксперимента были подобраны из расчета максимальной рекомендованной скорости резания, при которой работа станка протекает стабильно.

Ниже представлены обобщенные данные анализа обработки трех дисков из указанного материала.

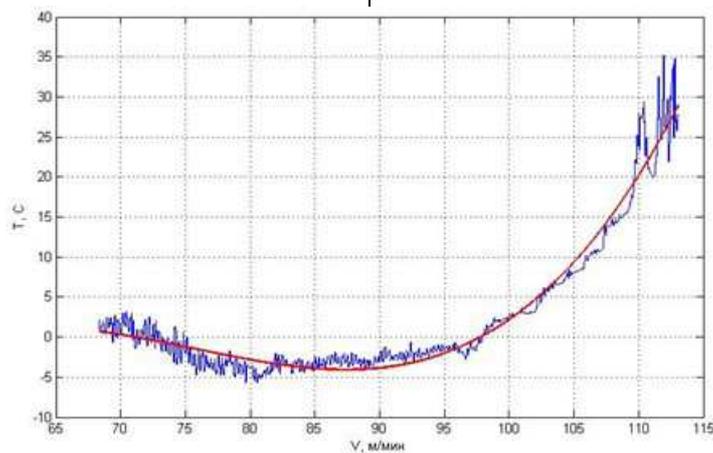


Рис. 7. График зависимости температуры резания T от скорости резания V

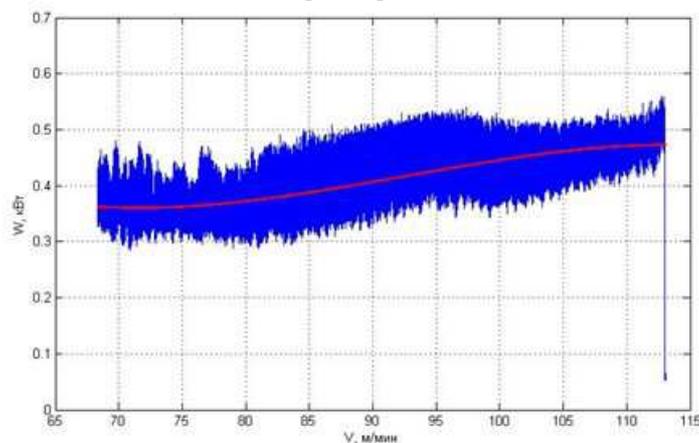


Рис. 8. График зависимости мощности резания W от скорости резания V

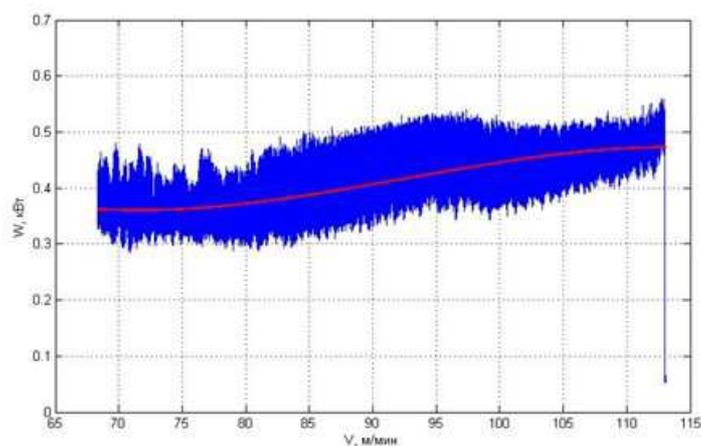


Рис. 9. График зависимости равнодействующей силы резания P от скорости резания V

Минимальные и максимальные значения основных характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица данных по трем дискам из материала ВТ20

№ диска	Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
1	P_x , кгс	-6,28	2,85
	P_y , кгс	-2,25	100,3
	P_z , кгс	0,47	76,9
	P , кгс	0,14	115,9
	T , °С	-2,85	19,53
	V , м/мин	67,65	113,04
	W , кВт	0	0,09
2	P_x , кгс	-11,01	6,16
	P_y , кгс	44,48	140,9
	P_z , кгс	28,48	96,41
	P , кгс	57,00	158,48
	T , °С	1,71	237,16
	V , м/мин	44,6	56,52
	W , кВт	0,03	0,09
3	P_x , кгс	-8,5	-0,5
	P_y , кгс	39,127	100,95
	P_z , кгс	29,45	60,21
	P , кгс	50,45	112,19
	T , °С	-14,9	52,3
	V , м/мин	64,11	113,04
	P_x , кгс	0,03	0,09

Средние значения характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения характеристик по трем дискам

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
P_x , кгс	-8,60	2,84
P_y , кгс	27,12	114,05
P_z , кгс	19,47	77,84
P , кгс	35,86	128,86
T , °C	-5,35	103,00
V , м/мин	58,79	94,20
P_x , кгс	0,02	0,09

Сравним эмпирически полученные значения оптимальной скорости резания, определенные по графику зависимости

мощности резания W от скорости резания V , с теоретическими (табл. 3).

Таблица 3

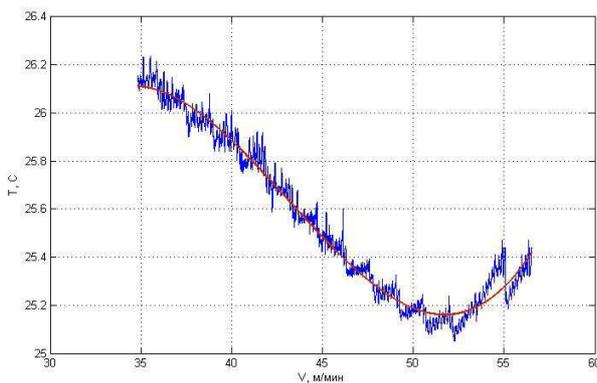
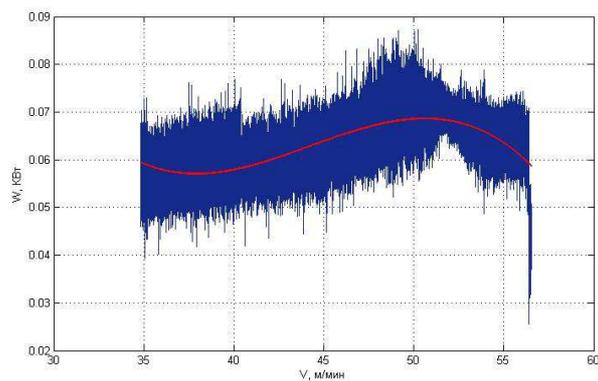
Сравнение эмпирических и теоретических значений

Скорость резания	Эмпирическое значение, м/мин	Теоретическое значение, м/мин
V1	85-103	28-90
V2	109	
V3	95	

Обработка нержавеющей стали 12X18H10T

Исходные данные при обработке нержавеющей стали 12X18H10T: $D_0 = 180$ – начальный диаметр диска, мм; $S = 0,07$ – подача, мм/об; $n = 100$ – частота вращения шпинделя, мин⁻¹.

Ниже представлены обобщенные данные анализа обработки трех дисков из указанного материала.

Рис. 10. График зависимости температуры резания T от скорости резания V Рис. 11. График зависимости мощности резания W от скорости резания V

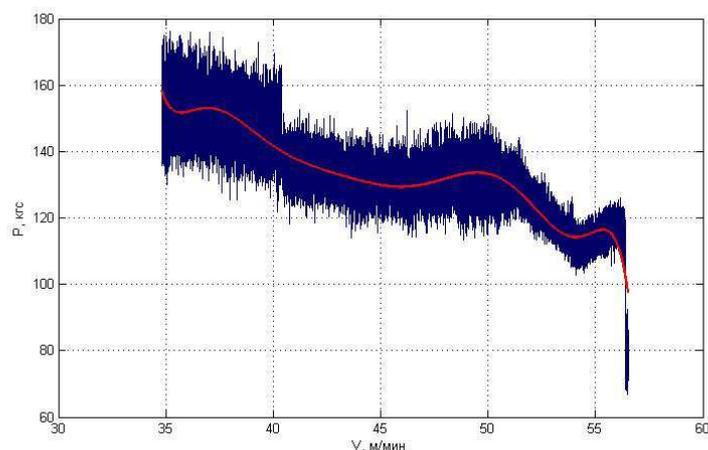


Рис. 12. График зависимости равнодействующей силы резания P от скорости резания V

Минимальные и максимальные значения основных характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сводная таблица данных по трем дискам из материала 12X18H10T

Номер диска	Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
1	P_x , кгс	-2,975	6,29
	P_y , кгс	4,28	125,4
	P_z , кгс	-15,6	125,1
	P , кгс	5,299	163,7
	T , °C	25,14	25,44
	V , м/мин	56,5	34,81
	W , кВт	-0,01	0,08
2	P_x , кгс	-10,39	-1,9
	P_y , кгс	61,128	153,17
	P_z , кгс	20,95	148,22
	P , кгс	75,85	199,19
	T , °C	24,93	27,22
	V , м/мин	56,52	34,07
	W , кВт	0,00185	0,09
3	P_x , кгс	-7,43	3,06
	P_y , кгс	75,81	117,66
	P_z , кгс	29,9	123,5
	P , кгс	89,06	159,9
	T , °C	72,1	223,7
	V , м/мин	56,5	40,43
	W , кВт	0,027	0,1

Средние значения характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 5.

Таблица 5

Средние значения характеристик по трем дискам

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
P_x , кгс	-6,93	2,48
P_y , кгс	47,07	132,08
P_z , кгс	11,75	132,27
P , кгс	56,74	174,26
T , °С	40,72	92,12
V , м/мин	56,51	36,44
W , кВт	0,01	0,09

Сравним эмпирически полученные значения оптимальной скорости резания, определенные по графику зависимости

мощности резания от скорости, с теоретическими значениями (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение эмпирических и теоретических значений

Скорость резания	Эмпирическое значение, м/мин	Теоретическое значение, м/мин
V_1	52	30-56
V_2	54	
V_3	55	

Эмпирически определенные значения скорости резания V входят в интервал рекомендуемых значений. Мы предполагаем, что предложенная методика для определения оптимальной скорости резания верна и

подойдет для других групп материалов. Однако данное предположение требует дальнейших экспериментальных исследований.

Выводы:

1. Оптимальным является такое значение скорости V_{opt} , дальнейший рост которого не приводит к увеличению мощности резания W и температуры T в зоне обработки.

2. Согласно данным, полученным при обработке титанового сплава BT20, эмпирическое значение скорости резания немного превышает ее теоретическое значение.

3. При обработке нержавеющей стали 12X18H10T полученные значения попадают в теоретический диапазон.

4. Разработан алгоритм и ПАК для расчета оптимальной скорости резания.

5. Определена оптимальная скорость резания материала BT20, которая равна 105 м/мин.

6. Определена оптимальная скорость резания материала 12X18H10T, которая равна 53 м/мин.

Работа выполнена при поддержке грантов № 2014/68 (код проекта 254) и № 9.251.2014 (код проекта 251) Министерства образования и науки РФ, а также в рамках магистерской диссертации одного из соавторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреев, С. В. Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов / С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – Комсомольск н/А: КнАГТУ, 2013. – № 3-1 (15). – С. 52 – 60.
2. Бреев, С.В. Теоретическое обоснование высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов / С.В. Бреев, А.Г. Серебренникова, М.А. Козлова// Сборник научных трудов SWorld. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2014. – Вып. 3(36). - Т. 5. – 96 с.
1. Breyev, S.V. Hard-to-machine material high-speed milling / S.V. Breyev, A.G. Serebrennikova// Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. Science of Nature and Techniques. – Komsomolsk-upon-Amur: K/ASTU, 2013. – № 3-1 (15). – pp. 52 – 60.
2. Breyev, S.V. Theoretical justification of hard-to-machine material high-speed working / S.V. Breyev, A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova// Proceedings of SWorld. – Odessa: KUPRIENKO S.V., 2014. – Issue 3(36). Vol. pp. 5. – 96.
3. Problems and achievements in innovation materials and technologies of mechanical engineering: Proceedings of Inter. Science-Tech. Conf. (Komsomolsk-upon-Amur, May 12-16, 2015) / Editorial board: O.Yu. Yerenkov (executive editor) [et al.]. – Komsomolsk-upon-Amur: K/ASTU, 2015. – pp. 320.
4. Temperature –power criterion as a method for definition of hard-to-machine material high-speed working area /S.V. Bryev, A.G. Serebrennikova, M.A. Kozlova// Modern Materials, Technics and technology: 4-th Inter. Pract. Conf. (Kursk, December 25-26, 2014). – Kursk, 2014. – pp. 96-102.

*Статья поступила в редколлегию 21.12.2015.
Рецензент: д.т.н., профессор КнАГТУ
Шпилев А.М.*

Сведения об авторах:

Серебренникова Анжела Геннадьевна, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: S_angel@kmscom.ru.

Козлова Мария Андреевна, магистрант кафедры «Технология машиностроения», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: makozlova@gmail.com.

Харина Ольга Петровна, кафедра «Высшая математика», г. Комсомольск-на-Амуре, e-mail: mathlady@mail.ru.

Serebrennikova Angela Gennadievna, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Techniques”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: S_angel@kmscom.ru.

Kozlova Maria Andreyevna, Master undergraduate of the Dep. “Engineering Techniques”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: makozlova@gmail.com.

Kharina Olga Petrovna, Dep. “Higher Mathematics”, Komsomolsk-upon-Amur, e-mail: mathlady@mail.ru.