

УДК 519.876.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.004)

Методика подбора режимов резания на основе контроля средней толщины стружки

М.Д. Урманов✉, Р.М. Хусаинов, Р.М. Хисамутдинов

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережные Челны, Российская Федерация*

Резюме. Управление темпом производства является актуальной проблемой для современного предприятия. Необходимо подбирать режущие инструменты и режимы резания согласно заданному графику. Ошибки в процессе производства могут привести к колоссальным затратам, как временным, так и денежным. Основная цель данной работы направлена на предоставление гибкого алгоритма, который позволит пользователю подобрать оптимальные сочетания режимов резания согласно темпу выпуска изделия. Разрабатываемый алгоритм также позволяет быстро реагировать на ошибки, возникающие в процессе производства. Теоретическая модель показывает пользователю риски при использовании того или иного темпа работы. Технолог сам сможет принять решение, взяв за основу данные о времени стойкости режущего инструмента и производительности. Представленный алгоритм основан на контроле средней толщины стружки. Это позволяет описать теоретическую «картину резания» для любой пары инструментального – обрабатываемого материала. В работе приведен сравнительный анализ алгоритма и табличных значений режимов резания, из которого видно, что представление, полученное методикой, используемой в данной работе, позволяет более детально разобрать рациональность выбора тех или иных режимов резания.

Ключевые слова: оптимальный износ инструмента, толщина стружки, подача на зуб, теоретическая сила резания, удельная сила резания, равнодействующая сила резания.

Для цитирования: Урманов М.Д., Хусаинов Р.М., Хисамутдинов Р.М. Методика подбора режимов резания на основе контроля средней толщины стружки. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1378> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.004

A technique for selecting cutting conditions based on the control of average chip thickness

M.D. Urmanov✉, R.M. Khusainov, R.M. Khisamutdinov

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, the Russian Federation

Abstract. Managing the pace of production is a relevant issue for a modern enterprise. It is necessary to select cutting tools and cutting conditions according to a given schedule. Errors in the production process can lead to huge time and money costs. The main goal of this paper is to provide a flexible algorithm that will allow the user to select the optimal combination of cutting conditions in compliance to the production rate. The algorithm being developed also helps to quickly respond to errors that occur during the production process. The theoretical model shows the user the risks when using a particular pace of work. The technologist will be able to make a decision independently while taking as a basis data on the tool life and productivity. The presented algorithm is based on the control of the average chip thickness. This makes it possible to describe the theoretical “cutting pattern” for any pair of tool and workpiece material. The paper presents a comparative analysis of the algorithm and tabular values of cutting modes. Following on from this analysis, it is apparent that the representation obtained by the technique used in this paper helps to analyze in more detail the rationality of choosing certain cutting modes.

Keywords: optimal tool wear, chip thickness, feed per tooth, theoretical cutting force, specific cutting force, net cutting force.

For citation: Urmanov M.D., Khusainov R.M., Khisamutdinov R.M. Determination of cutting modes optimal for tool wear. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1378> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.004 (In Russ.).

Введение

Применение инструментального калькулятора в металлообрабатывающем производстве является необходимым условием для эффективной работы на металлорежущих станках. Значения, полученные из данной системы, можно использовать для моделирования теоретического износа режущего инструмента на этапе технологической подготовки производства. Это позволяет пользователю управлять адаптивной системой для необходимого темпа производства. Например, для опытного производства подойдут более щадящие режимы резания для сохранения стойкости режущего инструмента. Напротив, для среднесерийного или массового производства подойдут более высокие режимы резания, что позволит выпускать изделия в кратчайшие сроки. В общем случае использование той или иной системы для расчета режимов резания повышает гибкость предприятия за счет формирования и реализации теоретической модели резания.

Описание проблемы и постановка задачи

На текущий момент на различных платформах представлено большое количество решений в виде инструментальных калькуляторов. Зачастую крупные производители режущего инструмента выпускают свои системные решения. Дополнительно предоставляются каталоги и указываются первоначальные режимы резания на упаковках режущих пластин. Казалось бы, необходимо просто взять предоставленные данные и начать работать на своем оборудовании. Однако часто имеют место следующие аспекты:

- производитель завышает режимы резания на свою продукцию на 20-40 %, чтобы иметь конкурентное преимущество перед другими поставщиками;
- производитель не дает корректировать режимы резания с учетом вашего станка;
- производитель не рекомендует необходимые коррекционные действия при плохом процессе резания.

Одним из примеров служит ситуация, описанная в [1]. Не имея большого опыта работы на предприятии, невозможно провести коррекционные действия. При этом выбранная система в источнике [1] не дает никаких советов по устранению данного дефекта. Пользователю приходится самому догадываться о том, что нужно провести те или иные коррекционные действия. Одним из способов решения данной проблемы является использование различных видов математических моделей. Это описано в работе [2], где проведен сравнительный анализ существующих математических моделей и сделан вывод о том, что именно их сочетание позволяет наиболее точно описать теоретический износ режущего инструмента. Однако данная методика является неполноценной. Она не учитывает глубину резания и подачу. Целью данной статьи является разработка алгоритма подбора режимов резания на основе теоретической картины резания с учетом всех действующих параметров режима резания, в особенности средней толщины стружки. Это позволит дополнить работу [2] и подобрать оптимальные значения для подачи на зуб и глубины резания.

Теоретическое обоснование

В работе [2] описана гибкая система, позволяющая работать с различными парами «инструментальный материал – обрабатываемый материал». Она реагирует на изменение характеристик обрабатываемого материала, а также позволяет пользователю принять нужное решение при работе рядом или внутри зоны того или иного вида износа. Однако данная система рассматривает модель процесса резания только со стороны скорости резания. Вторым фактором, оказывающим наибольшее влияние на износ режущего инструмента, является скорость подачи (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Соотношение факторов, влияющих на износ режущего инструмента
Figure 1 – Ratio of factors affecting the wear of the cutting tool

Значения, которые представлены на Рисунке 1, связаны косвенным параметром температуры резания. Как правило, в процессе резания возникает тот или иной вид износа (абразивный, адгезионный, диффузионный и др.), что способствует росту температуры. В работе [2] упоминалось об этом эффекте при нахождении v_2 . Увеличение скорости влияет на повышение температуры и стойкости режущего инструмента. Лучше всего влияние всех параметров описывает формула из источника [3]:

$$Q = P_z \cdot v, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, выделяемое при резании в единицу времени, Дж; P_z – сила резания, Н; v – скорость резания, м/мин.

Из данного равенства видно, что любое изменение скорости резания окажет большее влияние на температуру в зоне резания и износ режущего инструмента, нежели глубина и подача резания.

Определение скорости резания и формирование теоретического износа инструмента на основании этих данных было выполнено в [2]. В данной же работе речь пойдет о подаче на зуб. Скорость подачи можно разбить на следующие значения, используя формулу минутной подачи:

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z_n, \quad (2)$$

где f_z – подача на зуб в мм/зуб; n – частота вращения шпинделя в об/мин; z_n – эффективное число зубьев.

Из данного представления можно сделать вывод о том, что:

- z_n – исходный параметр, на который система не должна влиять для определения оптимальных режимов резания;
- p – параметр, который наиболее привязан к скорости резания. Его определение было выполнено в работе [2];
- f_z – параметр, который возможно регулировать в системе калькулятора режимов резания.

На первый взгляд кажется, что назначение оптимальной подачи – это подбор подачи на зуб. Однако это не так. Изучив исследования по данному вопросу [4], можно прийти к выводу о том, что это комплексное решение, учитывающее диаметр фрезерования и получаемую толщину стружки. Сочетание данных параметров в упрощенной форме средней толщины стружки можно свести к следующему виду:

$$h_m = f_z \sqrt{\frac{AE}{D_c}}, \quad (3)$$

где f_z – подача на зуб в мм/зуб; AE – ширина фрезерования в мм; D_c – диаметр инструмента в мм.

Дополнительно из источника [4] можно сделать следующие выводы:

1. Чем больше толщина стружки, тем больше необходимо приложить усилий для ее снятия. Увеличение силы резания ведет к увеличению температуры в зоне резания, износу режущего инструмента.
2. Чем меньше толщина стружки, тем процесс фрезерования более подвержен наростообразованию, который создаст зону наклепа, которую будет срезать следующий зуб.

На основании приведенных выше утверждений, можно сделать вывод о том, что оптимальная толщина стружки будет расположена между ее максимальным и минимальным допустимыми значениями. При подборе подачи на зуб для расчета скорости подачи необходимо будет анализировать толщину стружки. Из формулы 3 видно, что для ее расчета используется отношение диаметра инструмента и ширины фрезерования.

Мы не будем рассматривать влияние ширины фрезерования на образование стружки, это сделано в работе [5]. Из данной работы видно, что при уменьшении диаметра фрезерования менее 50 % необходимо увеличивать применяемый коэффициент для сохранения оптимальной толщины стружки.

В статье более подробно рассмотрим прямую зависимость подачи на зуб и толщины стружки, т. е. ее критичные значения (максимальное и минимальное).

Разработка алгоритма

Условимся, что в критических значениях будет преобладать определенная сила: удельная или равнодействующая. Рассмотрим их более подробно.

При формировании «тонкой» стружки имеет место повышенная удельная сила резания, т. е. возрастает сила на 1 мм среза. Это приведет к увеличению износа режущего инструмента (Рисунок 2). Данный процесс описывает формула Арчарда [6]. Однако для оптимального подбора подачи на зуб нам достаточно значения удельной силы резания, т. к. она используется для определения напряжений, которые возникают в зоне резания. Удельная сила резания определяется по следующей формуле:

$$k_c = \frac{1-0.01*y_0}{h_m^{m_c}} k_{c1.1}, \quad (4)$$

где h_m – толщина стружки в мм; γ_0 – передний угол в градусах; $k_{c1,1}$ – удельная сила резания для стружки с поперечным сечением в 1 мм^2 в Н/мм^2 ; m_c – поправочный коэффициент для фактического k_c .

Значения $k_{c1,1}$ и m_c возьмем из источника [7].

При формировании «толстой» стружки будем опираться на равнодействующую силу резания, т. е. общую силу резания, которая действует при резании материалов, что ведет к увеличению температуры согласно формуле 1 и, соответственно, к увеличению износа режущего инструмента (Рисунок 2). Равнодействующая сила резания определяется по следующей формуле:

$$F_c = k_{c1,1} b h_m^{1-m_c}, \quad (5)$$

где $k_{c1,1}$ – удельная сила резания для стружки с поперечным сечением в 1 мм^2 в Н/мм^2 ; h_m – толщина стружки в мм^2 ; b – глубина резания в мм.

Общая картина будет выглядеть следующим образом:

- при изменении подачи на зуб от 0 до f_z уменьшается удельная сила резания, при одновременном увеличении равнодействующей силы резания за счет увеличения h_m ;
- при изменении подачи на зуб от f_z и далее происходит увеличение равнодействующей силы резания при одновременном уменьшении удельной силы;
- в точке f_z имеется локальный минимум, который соответствует минимальному износу режущего инструмента.

Для вычисления теоретической силы резания необходимо принять следующие условия на основе утверждений, изложенных выше:

- удельная сила резания стремится к максимуму при уменьшении толщины стружки. Для расчета можно представить, что 100 % условно равно 0,01 мм толщине стружки;
- равнодействующая сила резания стремится к минимуму при уменьшении толщины стружки. Для расчета можно представить, что 1 % условно равен 0,01 мм толщине стружки;
- полученное значение двух сил необходимо разделить на 2 для того, чтобы суммарный результат не превышал 100 %.

Таким образом, общая формула будет выглядеть следующим образом:

$$F_T = \left(\frac{k_c \cdot 100}{k_{cmax}} + \frac{F_c \cdot 1}{F_{cmin}} \right) \cdot \frac{1}{2}, \quad (6)$$

где k_c – удельная сила резания в Н/мм^2 ; F_c – равнодействующая сила резания в Н, k_{cmax} – удельная сила резания в Н/мм^2 при толщине стружки 0,01 мм, F_{cmin} – равнодействующая сила резания в Н при толщине стружки 0,01 мм.

Дополнительно нужно вывести процентное соотношение следующих параметров:

- стойкость (Т) – процентное соотношение от стойкости при оптимальном f_z (Рисунок 2);
- объем снимаемого материала (Q) – процентное соотношение от значения производительности при f_z (оптимальной) (Рисунок 2).

Для определения производительности будем использовать формулу из источника [8].

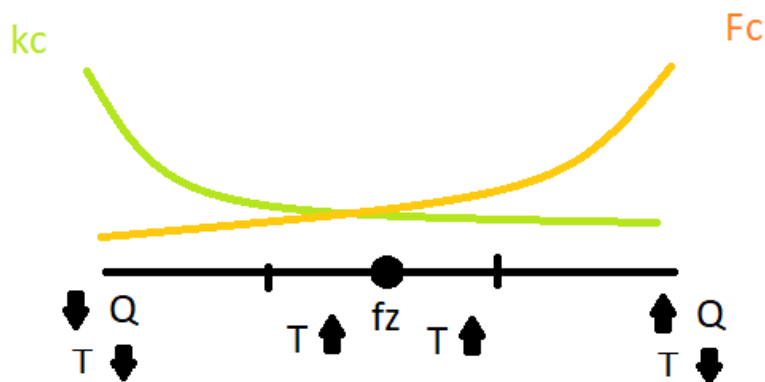


Рисунок 2 – Определение оптимальной подачи на зуб
Figure 2 – Determining the optimal feed per tooth

Анализ разработанного алгоритма

Рассмотрим процесс фрезерования стали 45 торцевой фрезой. Будем считать, что $D_c = 100$ мм, $k_{c1.1} = 1700$ Н/мм, $m = 0,25$, $t = 1$ мм, $y_0 = 0$, $n = 611$ об/мин, $z_n = 7$. Табличные данные были выбраны согласно рекомендациям из источника [7] для стали 45. В качестве проверочного значения подачи на зуб можно использовать значения показателей Таблицы 2.79 из источника [9], где идет разделение по мощности оборудования, что является несомненным плюсом для ограничения представленного графика. Пользователь на начальном этапе сможет выбрать свой тип станка: новое современное промышленное оборудование (более 10 кВт), более подержанный или менее производительное оборудование (10-5 кВт), и небольшие станки (менее 5 кВт). Для текущего алгоритма подбора подачи на зуб также возможно использовать данные ограничения. Полученные данные возможно выводить на графике для отсечения части зон, в которых станочная система будет испытывать перегрузки. В нашем случае диапазон подачи на зуб составляет 0,08-0,15 для оборудования (10-5 кВт).

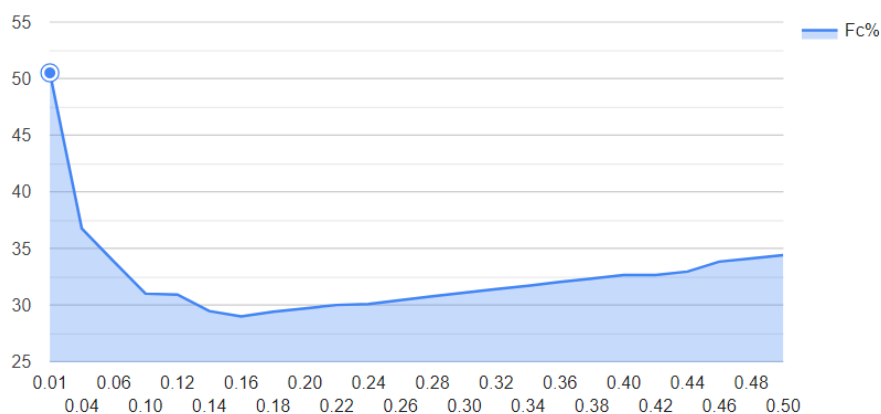


Рисунок 3 – График отношения теоритической силы резания и толщины стружки
Figure 3 – Graph of the relationship between theoretical cutting force and chip adaptation

Согласно предложенной методике, строим график (Рисунок 3). Диапазон толщины стружки для исследования возьмем от 0,01 мм до 0,43 мм (Рисунок 4).

	8	1	2	2	3	3	4	5	6	7
	fz(мм/зуб)	hm(мм)	Fc(H)	kc(H/мм ²)	Fc%	kc%	Ft(%)	F(мм/мин)	Q(см ³ /мин)	P(kw)
Формирование тонкой стружки	0.0086	0.01	107.5174404	5375.872022	1	100	50.5	33.4712	5.02068	0.562302774
	0.0344	0.04	304.1052449	3801.315562	2.828885999	70.71070472	36.76979536	133.8848	20.08272	1.590432418
	0.0516	0.06	412.185163	3434.876358	3.834280586	63.89433446	33.86430752	200.8272	30.12408	2.155676879
	0.0688	0.08	511.4420207	3196.512629	4.757600192	59.46037812	32.10898916	267.7696	40.16544	2.674777838
	0.086	0.10	604.6149994	3023.074997	5.624325576	56.23415367	30.92923962	334.712	50.2068	3.16206087
Минимальный износ	0.1032	0.12	693.2100519	2888.375216	6.448465599	53.7285168	30.0884912	401.6544	60.24816	3.62540192
	0.1204	0.14	778.1708241	2779.181515	7.238798364	51.69733484	29.4680666	468.5968	70.28952	4.069736139
	0.1376	0.16	860.1395236	2687.936011	8.001297894	50.00001881	29.00065835	535.5392	80.33088	4.498422191
	0.1548	0.18	939.5789877	2609.941633	8.740269653	50	29.37013483	602.4816	90.37224	4.913880658
	0.172	0.20	1016.837171	2542.092928	9.45895043	50	29.72947522	669.424	100.4136	5.317931301
Формирование толстой стружки	0.1892	0.22	1092.184296	2482.237036	10.15985391	50	30.07992696	736.3664	110.45496	5.711987344
	0.2064	0.24	1165.835695	2428.824365	10.84498321	50	30.42249161	803.3088	120.49632	6.097174957
	0.2236	0.26	1237.966601	2380.705002	11.51596838	50	30.75798419	870.2512	130.53768	6.474410577
	0.2408	0.28	1308.722113	2337.003773	12.17415919	50	31.08707959	937.1936	140.57904	6.84445306
	0.258	0.30	1378.224158	2297.040263	12.82068984	50	31.41034492	1004.136	150.6204	7.207940068
Ограничение по оборудованию	0.2752	0.32	1446.576484	2260.275756	13.45652543	50	31.72826272	1071.0784	160.66176	7.565414189
	0.2924	0.34	1513.868334	2226.276962	14.08249613	50	32.04124807	1138.0208	170.70312	7.917342153
	0.3096	0.36	1580.177205	2194.690563	14.69932284	50	32.34966142	1204.9632	180.74448	8.264129261
	0.3268	0.38	1645.57096	2165.224947	15.30763683	50	32.65381842	1271.9056	190.78584	8.606130423
	0.344	0.40	1710.109464	2137.63683	15.90799502	50	32.95399751	1338.848	200.8272	8.943658735
	0.3612	0.42	1773.845885	2111.721292	16.50089195	50	33.25044598	1405.7904	210.86856	9.276992248
	0.3784	0.44	1836.827718	2087.304225	17.08676947	50	33.54338474	1472.7328	220.90992	9.606379363
	0.3956	0.46	1899.097626	2064.23655	17.66602442	50	33.83301221	1539.6752	230.95128	9.932043195
	0.4128	0.48	1960.694114	2042.389702	18.23901501	50	34.11950751	1606.6176	240.99264	10.25418513
	0.43	0.5	2021.652096	2021.652096	18.806066	50	34.403033	1673.56	251.034	10.57298775

Рисунок 4 – Подбор оптимальной подачи на зуб на основе теоретической силы резания
Figure 4 – Selection of the optimal feed per tooth based on the theoretical cutting force

Алгоритм расчета выполняет следующие действия:

- 1) формирует диапазон толщины стружки;
- 2) вычисляет удельную и составляющую силу резания по формулам 4 и 5;
- 3) вычисляет в процентном соотношении удельную и составляющую силу резания;
- 4) вычисляет теоретическую силу резания по формуле 6;
- 5) вычисляет минутную подачу;
- 6) вычисляет производительность;
- 7) вычисляет потребляемую мощность главного привода;
- 8) вычисляет подачу на зуб.

В данном алгоритме выделяют несколько зон:

– первая красная зона определяет отсчет алгоритма, который был представлен ранее;

– первая белая зона определяет собой зону формирования тонкой стружки и низкой производительности оборудования;

– желтая зона определяет локальный минимум, который соответствует минимальному износу режущего инструмента;

– зеленая зона определяет оптимальную зону формирования стружки. Удельная сила резания не учитывается, т. е. остается равной 50 %. Расчет в основном ориентирован на равнодействующую силу резания. Пользователь выбирает между стойкостью режущего инструмента и производительностью;

– вторая красная зона определяет ограничение оборудования;

– вторая белая зона определяет формирование толстой стружки за границей ограничения оборудования.

По полученным данным видно, что оптимальная подача на зуб составляет 0,14 мм/зуб. Диапазон из источника [9] соответствует впадине теоретической силы резания. Соответственно можно считать, что предлагаемый алгоритм корректен.

Заключение

Используя алгоритм, представленный в работе [2] с дополнениями, которые описаны в данной работе, возможно:

- проводить рациональный подбор режимов резания на этапе технологической подготовки производства;
- пользователь получает полное представление о процессах, протекающих в «теоретической картине резания», что позволяет при необходимости проводить коррекционные действия;
- данную методику возможно применять в системах автоматизации на производстве при ведении инструментального обеспечения [10].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Урманов М.Д. Оценка эффективности применения инструментального калькулятора при фрезеровании на станке ЧПУ. *Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (МНТК-«ИМТОМ-2019»)*. 2019;1(2):138–141.
2. Урманов М.Д., Хусаинов Р.М., Хисамутдинов Р.М. Поиск оптимальной области режимов резания на основе моделирования износа режущего инструмента. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). URL: <https://moitvivot.ru/ru/journal/pdf?id=965>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.030 (дата обращения: 25.03.2023).
3. Парфеньева И.Е. *Технология конструкционных материалов*. М.: Учебное пособие; 2009. 84 с.
4. De Vos P. Развитие математических моделей толщины стружки, образующейся при фрезеровании. URL: <https://tverdysplav.ru/razvitie-matematicheskikh-modelej-tolshhiny-struzhki-obrazuyushhejsya-pri-frezerovanii/> (дата обращения: 25.03.2023).
5. Урманов М.Д., Хусаинов Р.М., Хисамутдинов Р.М. Методика поддержания средней толщины стружки при фрезеровании с различной шириной фрезерования. *Технологические инновации и научные открытия. Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции*. 2023:153–156.
6. De Vos P. Математические модели позволяют эффективно рассчитывать стойкость инструмента. URL: <https://tverdysplav.ru/matematicheskie-modeli-pozvolayut-effektivno-rasschityvat-stojkost-instrumenta/> (дата обращения: 01.05.2023).
7. Walter. Общий каталог. URL: <https://docs.steelcam.org/walter/obshij-katalog-2017-page483> (дата обращения 01.05.2023).
8. Летягина А.С., Серебренникова А.Г. Зависимость производительности Q и мощности резания P_c от режимов резания при точении титанового сплава BT20. *В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2019:102–104.
9. Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. Расчет режимов резания. *Учебное пособие*. Рыбинск: РГАТА; 2009.185 с.
10. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов. *СТИН*. 2010;1(11):2–4.

REFERENCES

1. Urmanov M.D. Evaluation of the effectiveness of the use of a tool calculator when milling on a CNC machine. *Materials of the International Scientific and Technical Conference "Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials – 2019" (IRTC-"IMTOM-2019")*. 2019;1(2):138–141. (In Russ.) (accessed on 25.03.2023).
2. Urmanov M.D., Khusainov R.M., Khisamutdinov R.M. Search for the optimal area of cutting conditions based on the simulation of cutting tool wear. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=965>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.030. (In Russ.) (accessed on 25.03.2023).
3. Parfenyeva I.E. *Technology of construction materials*. Moscow, Uchebnoe posobie; 2009. 84 p. (In Russ.).
4. De Vos P. Development of mathematical models of chip thickness during milling. URL: <https://tverdysplav.ru/razvitie-matematicheskikh-modelej-tolshhiny-struzhki-obrazuyushhejsya-pri-frezerovanii/> (In Russ.) (accessed on 25.03.2023).
5. Urmanov M.D., Khusainov R.M., Khisamutdinov R.M. A technique for maintaining an average chip thickness when milling with different milling widths. In: *Technological innovations and scientific discoveries. Collection of scientific articles based on materials of the XII International Scientific and Practical Conference*. 2023:153–156. (In Russ.).
6. De Vos P. Mathematical models allow efficient calculation of tool life. URL: <https://tverdysplav.ru/matematicheskie-modeli-pozvolyayut-effektivno-rasschityvat-stojkost-instrumenta/> (In Russ.) (accessed on 01.05.2023).
7. Walter. General directory. URL: <https://docs.steelcam.org/walter/obshij-katalog-2017-page483> (In Russ.) (accessed on 01.05.2023).
8. Letyagina A.S., Serebrennikova A.G. Dependence of productivity Q and cutting power P_c on cutting conditions when turning titanium alloy VT20. In: *Youth and science: Relevant issues of basic and applied research. Materials of the II All-Russian National Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists*. 2019:102–104. (In Russ.).
9. Bezyazyachny V.F., Averyanov I.N., Kordyukov A.V. *Calculation of cutting modes. A textbook*. Rybinsk, RGATA; 2009. 185 p. (In Russ.).
10. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Organization of tool facilities in the processing of composite materials. *STIN*. 2010;1(11):2–4. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Урманов Марат Данилович, аспирант кафедры автоматизации, информатики и вычислительной техника, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережные Челны, Российская Федерация.
e-mail: marat.urmanov@mail.ru

Marat Danilovich Urmanov, Postgraduate Student, the Department of Automation, Informatics and Computer Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, the Russian Federation.

Хусаинов Рустем Мухаметович, кандидат технических наук, доцент Казанского (Приволжский) федерального университета, Набережные Челны, Российская Федерация.
e-mail: rmh@inbox.ru
ORCID: [0000-0002-5351-4545](https://orcid.org/0000-0002-5351-4545)

Rustem Mukhametovich Khusainov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, the Russian Federation.

Хисамутдинов Равиль Миргалимович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкторско-

Ravil Mirgalimovich Khisamutdinov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Design and Technological

технологического обеспечения Support of Machine-Building Production, Kazan
машиностроительных производств (Volga Region) Federal University, Naberezhnye
Казанского (Приволжского) федерального Челны, the Russian Federation.
университета, Набережные Челны,
Российская Федерация.

e-mail: RMHisamutdinov@kpfu.ru

ORCID: [0000-0002-5107-4419](https://orcid.org/0000-0002-5107-4419)

*Статья поступила в редакцию 14.05.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023;
принята к публикации 11.07.2023.*

*The article was submitted 14.05.2023; approved after reviewing 20.06.2023;
accepted for publication 11.07.2023.*