

УДК 519.876.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.34.3.030](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.030)

Поиск оптимальной области режимов резания на основе моделирования износа режущего инструмента

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

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

Резюме. В статье затрагивается вопрос эффективности использования калькуляторов режимов резания от производителей. Анализируются применяемые в них методы. Приведен эксперимент, который демонстрирует обратный эффект, а именно получение процесса резания с неудовлетворительным качеством поверхности и повышенным износом режущего инструмента при применении инструментального калькулятора. Рассматриваются процессы, влияющие на износ режущего инструмента. Выделяют их основные виды для построения зон, в которых будет преобладать тот или иной тип. Предлагается методика поиска оптимальной области режимов резания в виде карты износа. Описывается ее гибкое применение с заданием своих параметров, таких, как ограничение возможностей оборудования и введения поправочных зон, которые необходимы для учета погрешностей свойств обрабатываемого материала. Также приведен алгоритм ее работы при использовании абразивной, адгезионной и диффузионной математической модели износа режущего инструмента. Проведен сравнительный анализ, при котором использовался инструментальный калькулятор производителя режущего инструмента и методика поиска оптимальной области режимов резания в виде карты. Приведены источники для наполнения базы, на основе которой предполагается работа карты износа инструмента.

Ключевые слова: область оптимальных режимов резания, карта износа, абразивный износ, адгезионный износ, диффузионный износ

Для цитирования: 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). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=965> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.030

Search for optimum range of cutting conditions based on modeling of the cutting tool wear

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

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

Abstract: This article addresses the issue of the effectiveness of using manufacturers' cutting data calculators. The methods utilized in them are analyzed. An experiment is presented that demonstrates the opposite effect, namely, obtaining a cutting process with an unsatisfactory surface quality and increased wear of the cutting tool when using an instrumental calculator. The processes affecting the wear of the cutting tool are considered. Their main types are distinguished for the purpose of zones construction in which one or another type will prevail. A method of searching for the optimal area of cutting conditions in the form of a wear map is proposed. It describes its flexible application with its parameters' settings, such as limiting the capabilities of the equipment and the introduction of correction zones, which are necessary for accounting for the errors in the properties of the material being processed. An algorithm for its operation while using an abrasive, adhesive and diffusion mathematical model of cutting tool wear is also given. A comparative analysis was carried out, in which the tool calculator of the cutting tool manufacturer and the method for finding the optimal area of cutting conditions in the form of a map were used. Sources for filling the base are given, which are applied to assume the tool wear map functioning.

Keywords: area of optimal cutting conditions, wear map, abrasive wear, adhesive wear, diffusion wear

For citation: Urmanov M.D., Khusainov R.M., Khisamutdinov R.M. Search for the optimal area of cutting conditions based on modeling the wear of the cutting tool. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=965> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.030 (In Russ).

Введение

Подбор оптимальных режимов резания всегда был актуальной проблемой для предприятий. Это связано с тем, что стоимость режущего инструмента зачастую превышает стоимость одной партии изготавливаемой детали, а использование рациональных режимов резания позволяет не только увеличить производительность, но и обеспечить стабильный процесс резания.

На многих предприятиях для назначения режимов резания при использовании режущих инструментов применяют различные методы:

- нормативные (табличные);
- эмпирический;
- автоматизированные на основе ЭВМ.

Описание проблемы и постановка задачи

Из описанных выше методов широко используемым является применение инструментального калькулятора производителей режущих инструментов. Однако эффект от данного метода не всегда оправдывает ожидание. Главной причиной являются условия проведения эксперимента. Например, это может быть разница в свойствах обрабатываемого материала. Несмотря на то, что в интерфейсе калькуляторов имеется обширная библиотека материалов, их свойства отличаются от свойств материала, которые поступают на склад завода в виде заготовок. К тому же есть разница в состоянии оборудования, на котором производится эксперимент. Можно сказать, что предоставленные режимы резания определяются в иных условиях.

Исходя из описанного выше, можно сделать вывод о том, что для получения объективных данных, т. е. неких коэффициентов для расчета математической модели «пары» (инструмент – материал детали), необходимо провести эксперимент, максимально приближенный к реальности.

Для достоверности был проведен эксперимент с использованием калькулятора режимов резания одного из производителей. Данные исследования были приведены в [1]. В итоге получили некорректные режимы резания, которые привели к вибрациям, что могло привести к интенсивному износу, а то и к поломке режущего инструмента.

Другим немаловажным фактором является рациональный расчет стойкости режущего инструмента. Так как при определении оптимальных режимов резания необходимо знать о том, насколько можно увеличить производительность обработки, не ухудшая при этом процесс резания.

Теоретическое обоснование

В статье будет проведен анализ существующих математических моделей износа режущего инструмента и предложена карта для выбора наиболее оптимального варианта.

Для начала необходимо рассмотреть имеющиеся математические модели. Естественно, производители режущих инструментов не будут раскрывать, на основании каких моделей они прогнозируют износ режущих инструментов. Но, как правило, это модель, основанная на абразивном износе с поправочными коэффициентами согласно

[2]. Это связано с тем, что данный вид износа является самым распространенным и предпочтительным, так как он обеспечивает стабильную и предсказуемую стойкость режущего инструмента. Однако такой подход позволяет рассмотреть данную проблему с одной стороны. Исходя из описанного выше, можно сделать вывод о том, что при моделировании износа режущего инструмента необходимо проводить комплексный анализ.

В качестве примера проанализируем точение детали на токарном станке. Предположим, имеется партия деталей из стали 45, а в качестве режущего инструмента был выбран твердосплавный инструмент. Для расчета используется абразивная математическая модель износа. Например, расширенная модель Тейлора. В качестве данных для ее расчета используется скорость резания, толщина и ширина стружки, свойство обрабатываемого материала и значение угла режущего инструмента. Если использовать данную модель на небольших скоростях резания, то согласно [3] данная модель применима. Однако если эту же «пару» использовать на оборудовании, которое позволяет производить обработку с более высокими скоростями резания, и для повышения производительности увеличить скорость резания, данная модель будет уже не эффективна. Так как с увеличением скорости резания увеличивается температура в зоне резания, что приводит к образованию других процессов износа режущего инструмента. И наоборот, если использовать только диффузионную модель, для которой преобладающим фактором является температура в зоне резания, то невозможно получить достоверные данные на низких скоростях, т. к. диффузионные процессы не возникают.

Соответственно можно прийти к выводу о том, что использование одной математической модели не эффективно. Ниже будет предложено решение данной проблемы.

Один из вариантов комплексного анализа износа режущего инструмента рассмотрен в [3]. На основании представленных данных можно сформировать начальное представление о карте износа режущего инструмента. Она позволит моделировать износ в зависимости от преобладающего в тот или иной момент времени вида износа, либо же в зависимости от видов износа, протекающих одновременно. Благодаря количественному соотношению значения износа к скорости резания, полученной из карты, можно будет подобрать оптимальные режимы резания.

Для работы были условно выделены следующие группы:

- быстрорежущие;
- твердосплавные.

Такая классификация выбрана вследствие того, что первая группа инструментов лучше применима на низких скоростях резания, а вторая – на более высоких.

Карта износа режущего инструмента будет отображать зависимость между скоростью резания (м/мин) по оси абсцисс и износом режущего инструмента (мм) по оси ординат, так как скорость резания является одним из главных факторов, влияющих на износ режущего инструмента. В качестве рассматриваемых видов износа были выделены: абразивный, адгезионный и диффузионный. Соответственно на карте будут отображены три зоны износа. Необходимо рассмотреть их основные особенности для выявления границ каждой зоны и составления алгоритма для построения карты.

Абразивный износ.

Механизм данного износа заключается в том, что твердые частицы обрабатываемого материала, внедряясь в контактные площадки режущего инструмента, царапают их, действуя как микрорезцы. Интенсивность данного износа зависит от

твердости инструментального материала и увеличивается по мере ее уменьшения. Интенсивность данного вида износа возрастает при увеличении содержания в сталях цементита и сложных карбидов, в чугунах цементита и фосфидов, в жаропрочных сплавах интерметаллидов, которые сохраняют высокую твердость даже при высоких температурах резания. Контактные поверхности инструмента могут также царапать частицы нароста. Данный вид износа проявляется на низких скоростях резания и особенно – при обработке материалов с ярко выраженными абразивными свойствами. Абразивный износ проявляется в большей степени для быстрорежущего инструмента и в меньшей степени – для инструмента, оснащенного твердым сплавом, твердость которого значительно выше твердости быстрорежущей стали [3].

Из описанного выше можно предположить о том, что абразивный износ будет преобладать на невысоких скоростях резания, т.е. от 0 до некоторого значения v_1 .

Также можно сделать выводы о том, что:

- зона абразивного износа быстрорежущего инструмента будет значительно больше, чем у твердосплавного инструмента;
- твердость материала увеличивает зону абразивного износа режущего инструмента.

Адгезионный износ.

Высокие температуры и нагрузки, действующие на контактных площадках режущего инструмента, способствуют адгезионному взаимодействию материала инструмента и обрабатываемой заготовки. В результате этого на контактных площадках режущего инструмента образуются «мостики схватывания».

При перемещении стружки по передней и задней поверхностям заготовки эти «мостики схватывания» разрушаются и образуются вновь. Повторение циклов образования и разрушения «мостиков схватывания» приводит к циклическому нагружению поверхностного объема инструментального материала и вызывает местное усталостное разрушение контактного слоя режущего инструмента, протекающее в виде выкрашивания отдельных частиц инструментального материала. Вырванные с контактных поверхностей частицы инструментального материала уносятся сходящей стружкой и поверхностями заготовки. Чем выше циклическая прочность и ниже хрупкость инструментального материала, тем выше его износостойкость при равной теплостойкости [3].

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы:

- адгезионный износ образуется на низких скоростях резания, т. к. с увеличением скорости уменьшается образование нароста;
- на низких скоростях быстрорежущие инструменты менее подвержены образованию адгезионного износа по сравнению с твердосплавным инструментом;
- согласно [3] с увеличением скорости адгезионный износ для твердосплавных инструментов уменьшается, а для быстрорежущих увеличивается.

Диффузионный износ.

Высокие температуры и нагрузки, действующие на контактных площадках инструмента, высокая деформация прирезцовых слоев стружки (слоев, прилегающих к передней поверхности), схватывание на контактных площадках режущего инструмента приводят к взаимному диффузионному растворению инструментального и

обрабатываемого материала, которое сопровождается диффузией отдельных элементов инструментального материала в стружку и обрабатываемый материал и наоборот. В результате процессов диффузии и самодиффузии в контактных слоях режущего инструмента происходят структурные превращения, которые вызывают их разупрочнение и охрупчивание. В результате этого контактные слои режущего инструмента, ослабленные диффузионными процессами, разрушаются и уносятся сходящей стружкой и поверхностью заготовки [3].

Из сказанного выше можно сделать следующие выводы:

- диффузионный износ образуется на высоких скоростях резания;
- согласно [3] с увеличением скорости резания до скорости v_2 и выше диффузионный износ для твердосплавного инструмента увеличивается, а для быстрорежущих инструментов данный процесс начинает протекать гораздо раньше.

Разработка алгоритма

После проведения теоретического исследования можно выделить следующие зоны скоростей резания для выбора математических моделей:

- для быстрорежущего инструмента в зоне от 0 до v_1 будет преобладать абразивный износ инструмента, при наличии адгезионного износа. Дальнейшее увеличение скорости приведет к увеличению наростообразования. Соответственно в зоне v_1-v_2 , которое представлено на Рисунке 1, будет преобладать адгезионный износ с последующим переходом в диффузионный от значения v_2 и далее;
- для твердосплавного инструмента в зоне от 0 до v_1 действуют два вида износа: адгезионный и абразивный. Однако первый будет оказывать большее влияние на низких скоростях резания. С увеличением скорости в зоне v_1-v_2 будет преобладать абразивный износ, который в последующем перейдет в диффузионный, как представлено на Рисунке 2.

Таким образом, можно сделать следующий вывод о том, что для твердосплавного инструмента оптимальная зона износа будет находиться во второй части графика, как показано на Рисунке 2, а для быстрорежущих инструментов в первой, как показано на Рисунке 1. Это зоны абразивного износа.

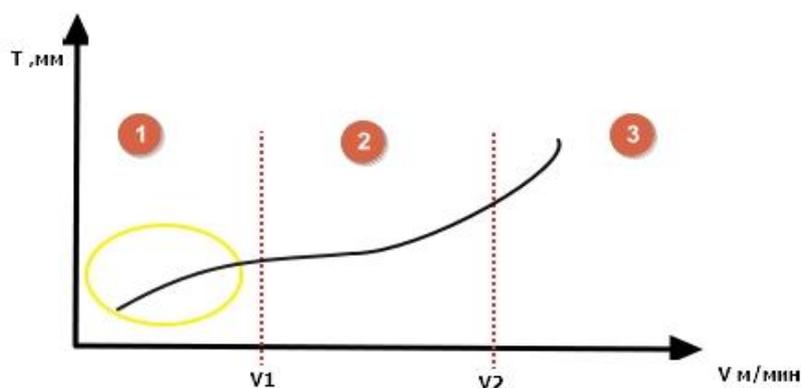


Рисунок 1 – Карта для определения вида износа для быстрорежущего инструмента
Figure 1 – Card for determining the type of wear for high-speed steel-cutting tool

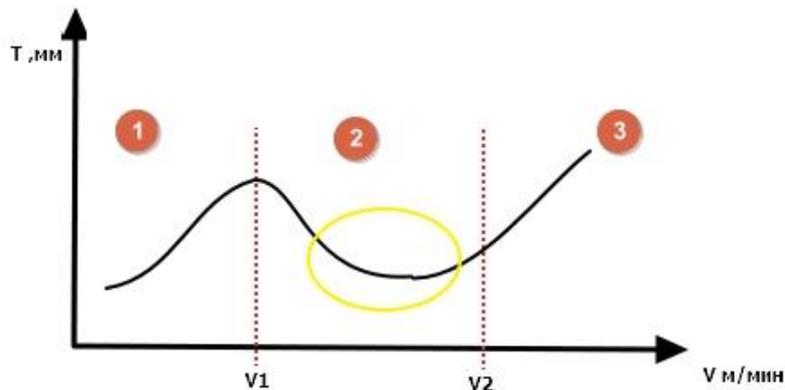


Рисунок 2 – Карта для определения вида износа для твердосплавного инструмента
Figure 2 – Card for determining the type of wear for carbide tools

Для уточнения ширины каждой зоны необходимо разобрать влияние обрабатываемого материала. Выделим следующие группы материалов:

- сталь;
- чугун;
- цветные металлы.

В свою очередь, каждая группа материалов будет иметь подгруппы.

Для начала необходимо определить приближенное значение скорости v_1 , т. е. значение пограничной зоны между абразивным и адгезионным износом. Для этого предполагается использовать коэффициенты обрабатываемости для каждого материала, так как одним из параметров, влияющих на него, является твердость обрабатываемого материала. Именно этот параметр в большей степени влияет на наростообразование. В качестве эталона, т. е. когда коэффициент обрабатываемости равен единице, обычно принимают сталь 45 при скорости резания 135 м/мин для твердосплавного и 75 м/мин для быстрорежущего инструмента. Ее твердость составляет 180 НВ. Возьмем приведенные выше скорости резания в качестве граничных v_1 и разберем их более подробно.

Данный коэффициент также учитывает вид обработки и способ получения заготовки. Так, например, низколегированные стали, полученные в виде поковок, имеют коэффициенты обрабатываемости от 1.5 до 2.1 для твердосплавного инструмента при точении. Соответственно это скорости от 202 м/мин до 283.5 м/мин. Для быстрорежущих инструментов 1.2-1.7.

Из расчетов видно, что в данной подгруппе сталей зона адгезионного износа будет больше для твердосплавного инструмента, так как материал имеет более вязкую структуру, ведущую к образованию нароста. Для быстрорежущих инструментов применение более вязких материалов приводит к возможности использовать более высокопроизводительные режимы резания.

Например, для легированных сталей, твердость которых намного выше низколегированных, коэффициенты составляют:

- от 0.7 до 1.1 (от 94 м/мин до 148 м/мин) для твердосплавных инструментов;
- для быстрорежущих от 0.4 до 0.7 (от 30 м/мин до 52 м/мин).

Это приведет к тому, что зоны оптимальных режимов резания сместятся влево по графику.

Таким образом, приближенное значение можно вычислять как произведение коэффициента обрабатываемости на соответствующую скорость резания (для твердосплавных инструментов 135 м/мин, для быстрорежущего инструмента 75 м/мин).

Для определения ориентировочного значения скорости резания v_2 необходимо знать температуру начала диффузии, так как на низких скоростях резания данный процесс не наблюдается.

Изучив источник [4], можно столкнуться с таким понятием, как оптимальная или предельная температура резания, т. е. в данных условиях износ инструмента имеет корреляционную связь с температурой. Предположим, что данные значения будут соответствовать T_2 .

В [4] приведен пример эксперимента, связанного с диффузионным износом. В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь ШХ15 при точении резцом с пластиной Т14К8. Процесс диффузии возник при температуре 700°C , что примерно соответствует значению, приведенному в таблице 750°C [1].

Рассмотрим другой эксперимент, приведенный в [5]. В данном исследовании рассматривалось точение чугуна ИЧХ20р твердосплавным инструментом ВК6М. По графику износа видно, что диффузия возникает при скорости резания $v = 55$ м/мин, что соответствует температуре 780°C . По данным из источника [4], температура составляет $720-750^\circ\text{C}$.

Можно сделать вывод о том, что данные значения применимы в качестве T_2 . Для назначения данной температуры можно использовать [6], т. к. в нем приведено больше примеров.

Следующим шагом является определение v_2 на основе T_2 . В [6] источнике приведена следующая формула:

$$T_2 = C_\theta v^z S^y t^y, \quad (1)$$

где C_θ , z , y – коэффициенты, полученные опытным путем; v – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм.

Также в ходе экспериментов были выделены следующие замечания:

- из элементов режимов резания на температуру резания наиболее сильно влияет скорость резания, меньше – подача и еще меньше – глубина резания;
- большое влияние оказывают свойство обрабатываемого материала, режущего инструмента, геометрические параметры инструмента, СОЖ и др.

Проанализировав высказывания, приведенные выше, и рассчитав значения подач (0,77-0,83) и глубины резания (1-0,87) по проведенным экспериментам в [6], можно прийти к тому же выводу, что и автор, т. е. для упрощенного расчета пренебрегать данными значениями.

Таким образом, упрощенная формула для определения v_2 будет выглядеть:

$$v_2 = \sqrt[0.36]{\frac{T_2}{C_\theta}}$$

Коэффициент C_θ зависит от предела прочности обрабатываемого материала (σ_B). Для некоторых материалов приведены значения в [6]. Изучив эти данные, можно прийти к выводу, что для приближенного расчета можно принять, что 1 единица C_θ равна 5.5 единиц предела прочности в кгс/мм² для сталей.

Если применить данную формулу к эксперименту, проведенному в [5], при $\sigma_B = 39$ кгс/мм², то мы получим скорость резания, равную 41 м/мин.

Таким образом, определив ориентировочные скорости резания v_1 и v_2 , можно составить алгоритм работы карты для той или иной «пары».

Для построения карты в качестве входных данных будут использованы особенности материалов «пары» и ограничения оборудования (максимально

допустимые скорости резания). На основе этих данных алгоритм пытается рассчитать скорости v_1 и v_2 . Затем строится карта, на которой отображены основные зоны (абразивная, адгезионная и диффузионная). Введенные ранее ограничения оборудования указываются на графике красными границами. За пределами данных границ расчет производиться не будет так же, как и вблизи. Затем строится график износа в выделенном диапазоне на основе той или иной математической модели (Рисунок 3).

Однако стоит помнить, что данный метод не учитывает большинство особенностей таких, как углы инструмента, ширина фрезерования и другое, так как данные параметры рассчитываются в той или иной математической модели, поэтому при поиске оптимальных режимов резания границы, обозначенные ранее, будут шире. Алгоритм будет рассчитывать износ инструмента по приведенной ниже схеме.



Рисунок 3 – Схема расчета износа инструмента на карте с учетом поправочных зон для твердосплавного инструмента

Figure 3 – The scheme for calculating tool wear on the map, taking into account the correction zones for the carbide tool

В желтой зоне будет производиться расчет по математической модели абразивного износа. В зонах, обозначенных красным цветом, используется модель данной зоны. В пересечениях красной и желтой зоны (зеленая зона) будут использованы обе модели, как показано на Рисунке 3. По умолчанию величина поправочных зон будет равна 10 м/мин. При необходимости на карте их можно расширить, либо уменьшить, т. е. пользователю будет предоставлена возможность вводить исходные данные обрабатываемого материала в диапазоне. Например: твердость заготовки стали 45, может быть, от 156 до 197 НВ при отпуске.

Анализ разработанного алгоритма

Для проверки данного алгоритма можно проанализировать эксперимент, приведенный в [1]. Разберем его более подробно. Исходными данными для карты являются:

- материал инструмента – твердосплавный инструмент (номер по каталогу Walter M4132-100-B27-80-09);
- материал детали – алюминиевая бронза (CuAl10Fe3Mn3);
- диаметр фрезы, равный 100 мм.

Калькулятор режимов резания для данного случая предложил использовать скорость резания, равную 211 м/мин. При таких режимах резания были замечены вибрации и неудовлетворительное качество обрабатываемой поверхности. Используя рекомендации сайта Sandvik Coromant [7], было принято решение увеличить скорость

резания до 314 м/мин. Это привело к улучшению процесса резания и качества получаемой поверхности.

Таким образом, можно предположить, что для расчетов оптимальных режимов резания была использована математическая модель абразивного износа в зоне образования нароста, т. е. обработка велась в первой зоне карты для твердосплавного инструмента. Отрицательное влияние нароста заключается в том, что он увеличивает шероховатость обработанной поверхности. Частицы нароста, внедрившиеся в обработанную поверхность, при работе детали с сопрягаемой деталью вызывают повышенный износ пары [8]. Для устранения данного эффекта были введены поправки в виде увеличения скорости резания.

Твердость обрабатываемого материала составляет 125 НВ. Это характерно для группы с вязкой структурой материала. Соответственно на карте зона образования нароста будет увеличена. Согласно [9] можно взять коэффициент, равный 1,9, т. к. в сплаве присутствует и бронза и алюминий (значение между 2.3-1.4). Это соответствует скорости резания 257 м/мин. Предполагается, что с данной скорости (± 10 м/мин поправочная зона) начинается абразивный износ, т. е. зона оптимальных режимов резания. Соответственно данные, которые были приведены в калькуляторе, являются неверными.

Заключение

Как и описывалось ранее, многие производители при подборе режимов резания чаще всего применяют математические модели абразивного износа. При анализе данного вопроса было выявлено, что данная зона является оптимальной. Однако приведенный пример в статье доказывает, что использование данного подхода не всегда приводит к ожидаемым результатам. Необходим более глубокий анализ.

Благодаря предложенному методу пользователи смогут эффективно рассчитать стойкость режущего инструмента и подобрать оптимальные режимы резания, основываясь на своих математических моделях, которые имеют свои плюсы и минусы в определенном диапазоне скоростей. Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенная карта, которая работает по алгоритму, описанному выше, позволяет подобрать оптимальный режим резания.

Однако стоит помнить, что для ее эффективной работы необходимо наполнить библиотеку ориентировочных скоростей для каждой пары. В качестве примера можно использовать данные, приведенные в [10]. Также необходимо более подробно изучить зоны вблизи границ v_1 и v_2 .

ЛИТЕРАТУРА

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. Patrick de Vos Математические модели позволяют эффективно рассчитывать стойкость инструмента. Доступно по: <https://tverdysplav.ru/matematicheskie-modeli-rozvoluyayut-effektivno-rasschityvat-stojkost-instrumenta/> (дата обращения: 19.09.2021).
3. Макаров А.Д. *Износ и стойкость режущих инструментов*. М.: Машиностроение, 1966:264.
4. Резников А.Н. *Теплофизика процессов механической обработки*. М.: Машиностроение. 1981:279.

5. Трухин В.В. Исследование износа режущего инструмента. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007;2:103-105.
6. Макаров А.Д. *Оптимизация процессов резания*. М.: Машиностроение, 1974:320.
7. Решение проблем при фрезеровании Доступно по: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx> (дата обращения: 19.09.2021).
8. Дальский А.М., Барсукова Т.М., Бухаркин Л.Н. и др. *Технология конструкционных материалов*. М.: Машиностроение, 2004:512.
9. Даниленко Б.Д. Возможности использования показателя обрабатываемости материала в качестве поправочного коэффициента при расчете скорости резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2013;2:32-35.
10. Локтев А.Д. *Общемашиностроительные нормативы режимов резания*. Справочник М.: Машиностроение. 1991:640.

REFERENCES

1. Urmanov M.D. Evaluation of the effectiveness of using a tool calculator when milling on a CNC machine. *Materials of the International Scientific and Technical Conference "Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials - 2019" (MNTK- "ИМТОМ-2019")*. 2019;1(2):138-141.
2. Patrick de Vos Mathematical models make it possible to effectively calculate the tool life. Available at: <https://tverdyslav.ru/matematicheskie-modeli-pozvolyayut-effektivno-rasschityvat-stojkost-instrumenta/> (accessed 19.09.2021).
3. Makarov A.D. Wear and durability of cutting tools. Moscow: Mechanical Engineering, 1974:320.
4. Reznikov A.N. *Thermal physics of machining processes*. М.: Mechanical engineering, 1981:279.
5. Trukhin V.V. *Investigation of cutting tool wear*. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2007;2:103-105.
6. Makarov A.D. *Optimization of cutting processes*. Moscow: Mechanical Engineering, 1974:320.
7. Solving problems in milling. Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx> (accessed 19.09.2021).
8. Dalsky A.M., Barsukova T.M., Bukharkin L.N. and other. *Technology of structural materials*. Moscow: Mechanical Engineering, 2004:512.
9. Danilenko B.D. Possibilities of using the index of machinability of the material as a correction factor when calculating the cutting speed. *Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2013;2:32-35.
10. Loktev A.D. *General machine-building standards for cutting conditions*. Directory М.: Mechanical Engineering. 1991:640.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Урманов Марат Данилович, аспирант кафедры автоматизация, информатика и вычислительная техника, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережные Челны, Российская федерация.
e-mail: marat.urmanov@mail.ru

Urmanov Marat Danilovich, graduate student of the Department of Automation, Informatics and Computer Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, 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)

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

Хисамутдинов Равиль Миргалимович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Российская федерация.

e-mail: RMHisamutdinov@kpfu.ru

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

Khisamutdinov Ravil Mirgalimovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Design and Technological Support of Machine-Building Production at Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 05.02.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021; принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 05.02.2021; approved after reviewing 28.09.2021; accepted for publication 30.09.2021.