

УДК 622.33.39

Ю. П. Ракунов, канд. техн. наук, доцент, В. В. Абрамов, д-р техн. наук, профессор
НИУ МГСУ; г. Москва; Россия
Тел. +7 (916) 810 71 26; +7 (910) 436 51 32; E-mail: rakunov1991@mail.ru,
valabramov@rambler.ru

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ УНИФИЦИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Цель работы – выяснение современных направлений и путей разработки методов автоматизированного определения режимов резания металлов, а также адекватных математических моделей, пригодных для решения широкого круга задач при расчете или назначении режимов резания для унифицированных инструментов. Описана физическая оптимизация закономерностей процесса резания и математические модели, связывающие входные и выходные параметры процесса через основные переменные, характеризующие этот процесс (температура, силы, вибрации). Проведен выбор критериев оптимизации выполнения перехода определенным типоразмером унифицированного режущего инструмента при однократной обработке. Показан график оптимизации режимов резания при линейной оценочной функции на токарном станке. Указаны отличия адаптивной системы управления станком с ЧПУ от обычной системы. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии базируется на теории оптимизации процесса резания А. Д. Макарова и экспериментальных исследованиях авторов при использовании унифицированных резцов.

Ключевые слова: автоматическое определение, скорости резки, унифицированные инструменты, адекватные математические модели, физическая оптимизация, критерии оптимизации, адаптивная система управления, базовая технология

J. P. Rakunov, V. V. Abramov

MODERN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF METHODS AUTOMATED DESIGNATION OF CUTTING MODES METALS UNIFIED TOOLS

The purpose of the work is to elucidate the current trends and ways of developing methods for the automated determination of metal cutting rates, as well as adequate mathematical models suitable for solving a wide range of problems when calculating or assigning cutting rates for unified tools. Physical optimization of the regularities of the cutting process and mathematical models connecting the input and output parameters of the process through the main variables characterizing this process (temperature, forces, vibrations) are described. The choice of criteria for optimizing the execution of the transition by a certain standard dimension of the unified cutting tool in single-pass processing has been carried out. A graph of optimization of cutting modes is shown for a linear evaluation function on a lathe. The differences between the adaptive control system of a CNC machine from a conventional system are indicated. The primary subsystem of a multilevel base technology uses the theory of optimization of the cutting process A.D. Makarov and experimental studies of authors using unified incisors.

Keywords: automated determination, cutting rates, unified tools, adequate mathematical models, physical optimization, criteria for optimizing, adaptive control system, base technology

Обработка на прецизионных станках с ЧПУ автоматов продольного точения (токарно-фрезерных обрабатывающих центрах, расточка фрезерных ОЦ, многоцелевых станках и др., вплоть до автоматических линий) деталей из высокопрочных труднообрабатываемых материалов условиях дестабилизирующего влияния изменяющихся повышенных силовых и температурных контактных нагрузок характеризуется интенсификацией как детерминированных, так и стохастических процессов внутриконтрактных разрушений режущей части унифицированного инструмента (микро- и макросколов, выкрашиваний и осыпания режущих кромок). Это обуславливает снижение размерной

стойкости и качества обработки, повышение технологических потерь по браку и простоям оборудования, понижение производительности и технико-экономической эффективности обработки.

Учитывая недостатки описания с использованием существующих теоретических и экспериментальных методов специфических контактных явлений в зоне резания, построение математической модели процесса материалообработки с целью его оптимизации эффективно реализуется при использовании различных современных методов (в частности, лазерной и голографической интерферометрии) для исследования напряжённо-деформированного и теплового состояния режущей части инструмента в процессе резания, что позволяет определить параметры прочности и прочностной надёжности унифицированного режущего инструмента (УРИ), прогнозировать его работоспособность и на этой основе оптимизировать режимы обработки деталей из труднообрабатываемых материалов на высокоскоростных и высокопроизводительных станках с ЧПУ.

В многочисленных исследованиях [1,3?9], посвящённых вопросам управления процессом механообработки, важное место занимают разработка методов назначения режимов резания (РР) определенными типоразмерами инструмента [5,7,10-12].

Всё многообразие методов классифицируется по приведённой на рис. 1 структурной схеме. Основными направлениями в разработке методов назначения РР металлов унифицированным инструментом являются:

- автоматизация расчёта РР; – оптимизация РР;
- создание информационных систем.

Автоматизация расчёта РР с помощью универсальных ПЭВМ производится в основном в рамках АСУ предприятий, а в качестве информационного обеспечения используются нормативные отраслевые материалы [2,3].

При автоматизации расчёта РР на специализированных ЭВМ используются аналоговые и цифровые вычислительные устройства (ЦВУ), в которые заложены алгоритмы и программы расчёта, а также нормативные материалы по РР [5, 7].

Аналоговые ЦВУ просты и удобны в эксплуатации, компактные и надёжные, могут быть использованы непосредственно в цеховых условиях предприятий.

Применение методов автоматизации расчёта РР для УРИ позволяет сократить время их назначения, а, следовательно, повысить производительность труда технологов и нормировщиков.

В СССР активно велись работы в области оптимизации РР [1, 8, 12]. В настоящее время эти работы продолжаются и в России [7, 11, 13]. Методы оптимизации можно распределить на три основные группы:

- расчётные; – экспериментальные;
- эволюционные.

В основе расчётных методов оптимизации лежит постановка задачи оптимизации РР как общей задачи математического программирования. Эта задача формулируется следующим образом: по заданным параметрам заготовки, инструмента, приспособления, станка выбрать из множества допустимых режимов такие параметры РР, которые обеспечат экстремальное значение принятому критерию оптимальности. В качестве критерия оптимальности чаще всего берут штучную технологическую себестоимость перехода или его производительность. Множество допустимых режимов определяется ограничениями, накладываемыми на элементы РР кинематическими и динамическими возможностями станка, режущими свойствами РИ, свойствами системы ЗИПС

(заготовка – инструмент – приспособление – станок), требуемым качеством обработки, определяемым интенсивностью изнашивания режущего клина инструмента.

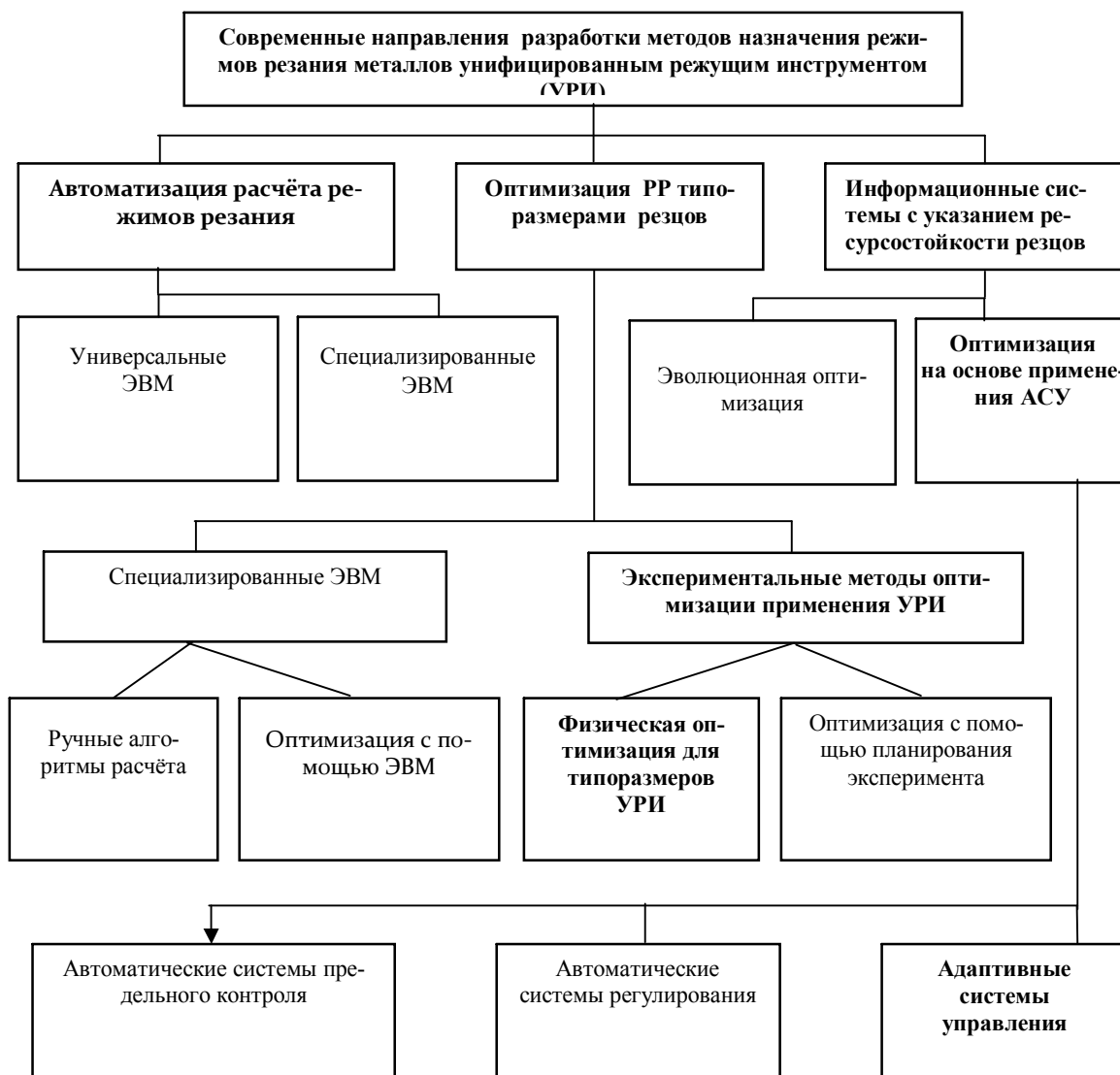


Рисунок 1. Структурная схема методов назначения режимов резания для УРИ

Ограничения на РР могут быть статические и динамические [7, 11].

Совокупность критерия(ев) оптимизации и ограничений на РР для любого инструмента образуют математическую модель процесса резания (ММПР).

Было разработано несколько таких моделей, например, как наиболее полные и доведённые до практического использования модели, алгоритмы решения и рабочие программы, разработанные в Институте технической кибернетики АН Беларуси [3, 8].

Существующие ММПР довольно полно описывают процесс, однако адекватность этих моделей в большинстве случаев невысока, и при решении частных задач необходимо производить корректировку модели. Это вызвано тем, что аналитические зависимости, которые описывают ограничения на РР, недостаточно точно отражают закономерности процесса резания определенными типоразмерами УРИ, особенно точными [3, 11, 12].

Таким образом, важнейшей задачей является уточнение, систематизация и классификация зависимостей, отражающих основные закономерности процесса резания с целью создания адекватных математических моделей, пригодных для решения широкого круга задач при расчёте или назначении РР для УРИ [5-7].

Во многих случаях, встречающихся в практике металлообработки, отсутствие необходимо информации о процессе не позволяет построить адекватные математические модели (новые материалы, различные типоразмеры инструментов, станков, специальные условия обработки и т.д.). Это приводит к тому, что использование расчётных методов оптимизации становится весьма затруднительным, а часто просто невозможным. В такой ситуации целесообразно применять экспериментальные методы оптимизации, включающие две основные группы:

- методы физической оптимизации;
- методы, использующие экстремальное планирование эксперимента.

Сущность метода физической оптимизации заключается в том, что на основе изучения физических закономерностей процесса резания разрабатываются модели, связывающие выходные параметры процесса резания (стойкость, точность, производительность и др.) и входные (свойства УРИ, состояние обрабатываемого материала и др.) через основные переменные, характеризующие процесс резания (температура, силы и вибрации). Оптимизация и регулирование процесса резания в дальнейшем ведутся по этим переменным.

Оптимизация процесса резания на станках с ЧПУ

Оптимизация РР расчётным путём представляет собой сложную задачу, которая определяется невысокой точностью экспериментальных зависимостей, непостоянством размеров обрабатываемых поверхностей (при обработке конусных или сферических поверхностей, фрезерование заготовки переменной высоты), недостаточной достоверностью информации о жёсткости упругой системы ЗИПС, случайными изменениями припуска, твёрдости и др. характеристик обрабатываемого материала, случайными отклонениями режущей способности унифицированного инструмента, недопустимостью обработки в виброопасной зоне, сложностью корректировки РР в процессе работы станка с ЧПУ [2,5,10,11].

Оптимизация процесса резания может производиться на стадии разработки управляющих программ (УП) расчётным путём и в процессе резания унифицированным инструментом на станках с адаптивными системами управления (АДСУ).

Ниже излагаются методы оптимизации РР на стадии подготовки УП [1,4,7-9,14].

В качестве критериев оптимальности РР обычно принимают наименьшую технологическую себестоимость выполнения перехода типоразмером УРИ (при одноинструментальной обработке) и критерий наибольшей производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку. Режимы резания, обеспечивающие наименьшую себестоимость обработки, и РР, соответствующие наибольшей производительности, отличаются величиной скорости резания и стойкости РИ. Скорость резания по критерию наибольшей производительности обычно больше, а стойкость УРИ меньше, что обеспечивает большую производительность, но и большие затраты на РИ (рис. 2). В зависимости от конкретных производственных условий принимают тот или иной критерий или выбирают РР, лежащие в области между наименьшей себестоимостью и наибольшей производительностью однопроходной обработки [1,8,12].

Анализ зависимостей $T = f(v)$, $L = f(v)$, $h_{\text{он}} = f(v)$, $A = f(v)$, $\Pi = f(v)$ показывает следующее.

1. Работа на скорости резания v_m является нерациональной, так как здесь достигаются низкая производительность обработки Π и размерная стойкость инструмента L , а себестоимость обработки A и расход инструмента $h_{оп}$ являются высокими.

2. При работе на оптимальной скорости резания наблюдается наивысшая размерная стойкость инструмента, а расход инструмента и погрешности обработки, связанные с износом инструмента, минимальны.

3. Работа на скорости v_3 вместо скорости v_0 приводит к некоторому снижению себестоимости обработки и размерной стойкости инструмента, а расход инструмента возрастает.

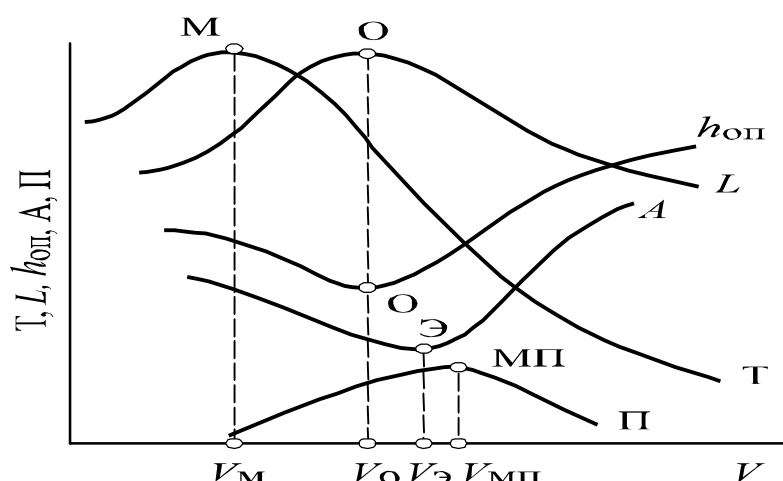


Рисунок 2. Схема влияния скорости резания на период стойкости, путь резания, интенсивность износа инструмента, себестоимость и технологическую производительность обработки.

4. Дальнейшее повышение скорости резания $v_{мп}$ приводит к некоторому повышению производительности труда на данном рабочем месте за счёт резкого повышения расхода инструмента (и снижения размерной стойкости инструмента) и повышения себестоимости изготовления деталей. Проведённые для различных обрабатываемых материалов расчёты v_3 показывают, что, как правило, величина отношения $v_3 / v_0 = 1,20-1,25$, т.е. скорости v_3 и v_0 находятся в пределах одной скоростной ступени станка, а для труднообрабатываемых материалов скорости v_3 и v_0 практически совпадают. Это является дополнительным стимулом для расширения исследований оптимизации процессов резания и ведения обработки в оптимальных режимах [4,8,12].

Расчёт режимов резания с помощью ЭВМ. ЭВМ позволяют использовать точные методы расчёта режимов резания, охватывающие сложную взаимосвязь технологических требований и ограничений. Ограничения понимаются как совокупность факторов, определяющих предельные возможности системы ЗИПС.

В качестве факторов, ограничивающих режимы резания, принимают такие, как мощность привода главного движения, наибольший крутящий момент, прочность инструмента, жёсткость резца, допускаемые силы механизма подач, предельная шероховатость обработанной поверхности, предельные скорости резания, достигаемые

на станке, предельные подачи станка, возможности инструмента по его режущим свойствам. Все ограничения должны иметь математическое описание [3,6].

В качестве критерия оптимальности принимается наименьшая себестоимость или наибольшая производительность обработки; критерий оптимальности описывается как функция параметров РР уравнением, которое называется оценочной функцией.

По функции ограничения и оценочной функции после линеаризации (если за основу принимается принцип линейного программирования) составляют математическую модель оптимального РР и для наглядности строят геометрическую интерпретацию математической модели в двойной логарифмической сетке с выделением области оптимальных РР (v и подачи S).

Геометрическая интерпретация математической модели оптимального резания на токарном станке изображена на рис. 3 [4,8,14]. В двойных логарифмических координатах $X_1O X_2$ линии 1–8 соответственно изображают уравнения ограничивающих зависимостей.

Подлежащая оптимизации оценочная функция $f = x_1 + x_2$ изображена прямой 9 под углом 45° к координатной оси. Многоугольник $ABCDE$ ограничен линиями минимальной частоты вращения (7), минимальной подачи (5), допустимой высоты шероховатостей (5), мощности (2), режущей способности резца (1). Координаты вершин многоугольника являются корнями совместного решения уравнений системы, а точки, лежащие внутри многоугольника, удовлетворяют всем ограничениям. В точке A линейная форма оценочной функции будет иметь минимальное значение. Координаты точки C (x_{2opt} , x_{1opt}) соответствуют оптимальному решению. В связи с тем, что при линеаризации зависимостей были использованы $x_1 = \ln n$ и $x_2 = \ln (100S)$, то по полученным координатам x_{1opt} и x_{2opt} можно определить истинные оптимальные значения параметров режима резания для определенного типоразмера УРИ.

Адаптивное управление. Существенным резервом повышения эффективности станков с ЧПУ является применение автоматического регулирования. Адаптивная система ЧПУ отличается от обычной системы ЧПУ автоматическим регулированием процесса обработки по фактическим значениям его параметров с целью наилучшего

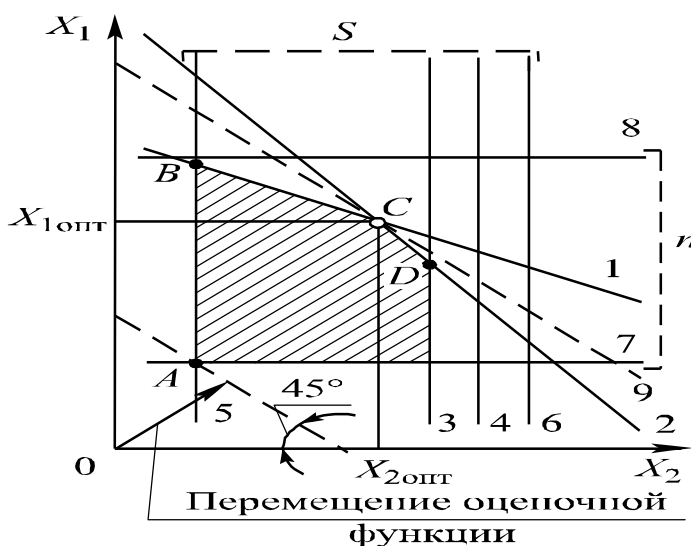


Рисунок 3. График оптимизации РР на токарном станке.

использования возможностей станка и инструмента. Адаптивное управление обеспечивает наилучшее использование возможностей станка при обработке заготовки с изменяющимися параметрами. При этом значительно упрощаются управляющие программы [3, 8, 15].

Основные работы по созданию систем адаптивного управления станками выполнены в Московском СТАНКИНе, и по адаптивному управлению станками с ЧПУ – в ЭНИМСе. Были предложены и разработаны два принципиально различных метода решения задачи повышения точности и производительности обработки путём управления упругими перемещениями системы ЗИПС [4, 8].

Первый метод – измерение возникающих отклонений и автоматическое внесение необходимой поправки, равной по величине отклонению, но с обратным знаком. Второй метод заключается в стабилизации силы резания, например, за счёт изменения величины подачи. Опытно-промышленные испытания токарных, фрезерных и шлифовальных станков, оснащённых САУ СТАНКИНа, показали [1, 8], что производительность обработки деталей возрастает на 40–100%, инструмент служит в 1,5 раза дольше, а погрешности обработки уменьшаются в 4–5 раз.

В соответствии с реализуемыми целями различают два основных вида адаптивных систем: предельного регулирования (АСС – Adaptive control constraint) и оптимизации (АСО – Adaptive control optimal). Адаптивные системы предельного регулирования могут использоваться для повышения эффективности как черновой, так и чистовой обработки. С целью повышения точности и эффективности предельное регулирование осуществляется по текущей информации о значениях одного или нескольких контролируемых параметров в зоне взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки.

В адаптивных системах предельного регулирования при черновой обработке используется информация о силовых параметрах: мощности, силе резания, крутящем моменте и вибрациях. При чистовой обработке кроме стабилизации силовых параметров необходимо учитывать размерный износ инструмента. Для оптимизации процесса резания необходима текущая информация о скорости износа инструмента. Такая информация пока может быть получена косвенным путём по температуре в зоне резания, соотношению составляющих силы резания, пройденному инструментом пути резания и др. Во время обработки в зоне резания происходят сложные механические, физико-химические и электрические процессы [7,13].

Необходимо установить, имеется ли экстремальная зависимость между стойкостью и износом режущего инструмента, с одной стороны, которая характеризует критерий оптимизации, и температурой в зоне резания и силой резания, с другой стороны. Для ответа на поставленный вопрос кратко рассмотрим результаты некоторых из теоретических и экспериментальных исследований учёных в области теории и практики науки о резании металлов.

Зависимость путь (T_v) – температура резания, как отмечает в работе [9] д-р техн. наук проф. Т.Н. Лоладзе, показывает, что максимум пройденного пути для различных толщин среза наблюдается примерно при одинаковых температурах резания, соответствующих минимальной интенсивности адгезионного износа. По экспериментальным зависимостям Т.Н. Лоладзе можно установить, что при резании стали 40Х резцом из стали Р18 максимальный путь резания соответствует температуре 620–670 К (348–397°C), а при резании твердосплавным резцом из твёрдого сплава Т15К6 – температуре 970–1000 К (697–727°C). При обработке жаропрочного сплава

ХН70МВТЮБ резцом из сплава ВК8 эта температура находится в пределах 970–1020 К (697–747°C).

Надёжной основой для разработки систем автоматической оптимизации режимов резания могут являться результаты экспериментальных исследований д-ра техн. наук проф. А.Д. Макарова [1,12]. Сущность их заключается в следующем. При точении жаропрочного сплава ХН77ТЮ резцами ВК8 и ВК15М, закалённой стали ЭХ12М резцами Т15К6 и нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н9Т резцами Т30К4 было установлено, что каждому сочетанию материалов обрабатываемой детали и инструмента при работе на любой возможной подаче с оптимальными скоростями резания, при которых наблюдается наименьшая интенсивность поверхностного относительного износа инструмента, соответствует постоянная (оптимальная) температура в зоне резания (или постоянная величина термоэлектродвижущей силы, возникающей в термопаре инструмент – заготовка). Такое же явление наблюдалось и при фрезеровании хромоникелевой стали 12Х18Н9Т торцевой фрезой из сплава Т15К6.

На рис. 4 [12] показаны зависимости поверхностного относительного износа инструмента $h_{оп}$ от температуры в зоне резания при различных подачах в случае обработки деталей из стали 40ХМНА резцом из Т14К8 и $t = 1$ мм.

По результатам исследований д-р техн. наук проф. А.Д. Макаров отмечает, что положение о постоянстве оптимальной температуры носит характер всеобщности и может быть положено в основу ускоренного метода определения оптимальных сочетаний подач и скоростей резания, соответствующих максимальной размерной стойкости инструмента. На основании температуры резания или термо-ЭДС, зафиксированной при оптимальной скорости резания, можно надёжно осуществлять автоматическое ведение процессов обработки на режимах, соответствующих максимуму размерной стойкости инструмента и точности обработки [1,12]. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии базируется на теории оптимизации процессов резания А.Д. Макарова и экспериментальных исследованиях авторов при использовании УРИ [5,7,11].

По данным отечественного и зарубежного опыта адаптивное управление станками обеспечивает повышение производительности на 30–240%, снижение расходов по программированию на 20–30%, повышение стойкости инструмента на 25–35%, уменьшение брака на 96–100% [4,8,15].

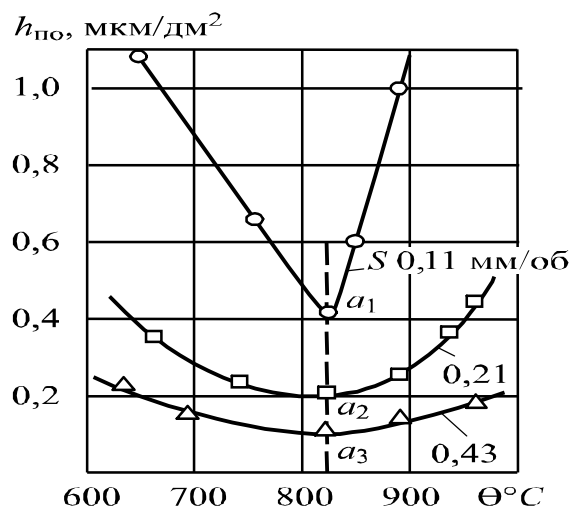


Рисунок 4. Зависимость $h_{оп} = f(\theta^{\circ}C)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
2. Ракунов, Ю. П. Прогрессивные конструкции и технологические процессы изготовления унифицированных твёрдосплавных резцов к станкам с ЧПУ / Ю. П. Ракунов, В. В. Абрамов, Н. А. Золотова/ Станочный парк. – 2011. – № 5. – С. 71-75.
3. Акулович, Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроения: учебное пособие / Л. М. Акулович, В. М. Шелег. – Минск: Новое знание; М: ИНФРА-М, 2012. – 488 с.
4. Кондаков, А. И. «САПР технологических процессов: учебник для студентов высших учебных заведений» / А. И. Кондаков – М.: «Академия»; 2007. – 272с.
5. Ракунов, Ю.П. Повышение ресурсостойкости и экономичности использования типажа унифицированных резцов с многократно перетачиваемыми режущими элементами / Ю. П. Ракунов, Н. А. Золотова, В. В. Абрамов // Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004.
6. Норенков, И. П. «Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии» / И. П. Норенков – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002.
7. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии /Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2012. – №3. – С. 23-31.
8. Молчанов, Г. И. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ / Г. И. Молчанов – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
9. Лоладзе, Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе – М.: Машгиз, 1958. – 355 с.
10. Патент 2226453 РФ Многократно перетачиваемый резец: / Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
11. Ракунов, Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2012. – №10 – С. 36-46.
12. Макаров, А. Д. Дальнейшее развитие оптимального резания металлов / А. Д. Макаров – Уфа: УАИ им. Орджоникидзе, 1982. – 56 с.
13. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания металлов / В. К. Старков – М.: Машиностроение, 2009.– 40 с.
14. Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С.В. Грубый – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014.
15. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009

Поступила в редколлегию 01.06.2017 г.