

Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов

Ракунов Юрий Павлович, канд. техн. наук, доцент
Абрамов Валерий Васильевич, д-р техн. наук, профессор
Ракунов Александр Юрьевич, инженер

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Бибко Олег Петрович, магистрант;
Московский автодорожный институт, Россия

В статье рассмотрены методические (научно-технические) подходы к проблеме определения подач и скоростей резания, обеспечивающих минимальную интенсивность размерного износа резцов при токарной обработке рабочих поверхностей деталей машин и приборов твердосплавным унифицированным инструментом на станках с ЧПУ. Разобрана методика назначению оптимальных подач и скоростей резания по разработанным номограммам, основанным на законе постоянства оптимальной температуры резания, обеспечивающим максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания, как для конструкционных, так и жаропрочных, коррозионностойких, закаленных, титановых и других труднообрабатываемых материалов. Номограммы избавляют рабочего и нормировщика, технолога и конструктора при выборе оптимального режима резания от власти случайного или неверного выбора, дающего обычно непредсказуемые результаты.

Ключевые слова: параметрические уравнения, номограмма, унифицированный режущий инструмент, оптимальная температура и скорость резания, режимы резания, показатели качества, интенсивность относительного поверхностного износа.

Существующие нормативы по режимам резания (PP) и многочисленные номограммы, разработанные на основе обычных стойкостных зависимостей $T-V$, лишены связей с размерной стойкостью инструмента и не решают вопроса выбора подач и скоростей резания, обеспечивающих минимальную интенсивность размерного износа резцов [1].

Интенсивность радиального износа унифицированного режущего инструмента (УРИ), отнесённого к площади обработанной поверхности, характеризуется величиной поверхностного относительного износа [2-5].

Под поверхностным относительным износом $h_{от}$ понимается износ резца в радиальном направлении (в зоне так называемого нормального износа), отнесённый к 1 дм² площади обработанной поверхности заданного качества. Такой износ определяется по формуле:

$$h_{от} = \frac{h_r - h_n}{(l - l_n)S} \quad \text{и } 10, \text{ мкм/дм}^2,$$

где: h_r – конечная или текущая величина радиального износа в мкм,

h_n – начальный радиальный износ в мкм,

l – конечная или текущая длина пути резания в м;

l_n – длина начального участка пути резания в м;

S – подача в мм/об.

На основании многочисленных исследований установлено, что подача, оптимальная скорость резания V_0 и оптимальный поверхностный относительный износ $h_{ото}$ связаны между собой уравнениями:

$$V_0 = \frac{C_1}{S^{\chi_1}} ; h_{ото} = \frac{C_2}{S^{\chi_2}} ,$$

где: C_1 и C_2 – постоянные величины для данной пары материалов, χ_1 и χ_2 – показатели степеней.

Оптимальной называется скорость резания, при которой наблюдается наименьшая интенсивность размерного износа резца. Поверхностный относительный износ, наблюдающийся при оптимальной скорости резания, называется оптимальным поверхностным относительным износом [1].

Все предпринимаемые попытки оптимизировать условия резания в групповом автоматизированном производстве теоретически и практически обречены на провал, если они не основаны на положениях теории Макарова А. Д. и принципах многоуровневой базовой технологии, т. к. пытаются различными методами «оптимизировать» заведомо провальный вариант [6-9].

Для облегчения задачи быстрого определения наиболее выгодных сочетаний подач S и скоростей резания V , обеспечивающих наименьшую интенсивность размерного износа УРИ или наименьшую себестоимость обработки, а также для определения соответствующих величин поверхностного относительного износа $h_{ото}$ и $h_{отэ}$ разработаны номограммы (рис. 1 и 2). Чтобы связать выбор режимов резания с шероховатостью обработки на оптимальных сочетаниях подач и скоростей резания, проводят опыты по определению высоты неровностей R_z обработанной поверхности.

Номограмма позволяет по заданной R_z или R_a обработки и принятой величине радиуса сопряжения задних поверхностей резца определить максимально допустимую величину подачи S_k .

Работа на подачах $S > S_k$ не обеспечит требуемого качества обработки, а на подачах $S < S_k$ не рациональна, так как вызывает снижение производительности труда, повышение себестоимости обработки и по-

верхностного относительного износа (т.е. снижение точности обработки), а также увеличение расхода инструмента.

Для выбора скоростей резания по найденной или принятой подаче на номограмме нанесены линии V_0 и V_s . Линия V_0 соответствует сочетаниям подач и скоростей резания, при которых обеспечивается минимальная величина поверхностного относительного износа, определяемая линией $h_{опн}$.

Линия V_s соответствует сочетаниям подач и скоростей резания, при которых обеспечивается максимальная производительность труда и минимальная себестоимость обработки. Поверхностный относительный износ при этом получается более интенсивным и определяется линией $h_{опэ}$.

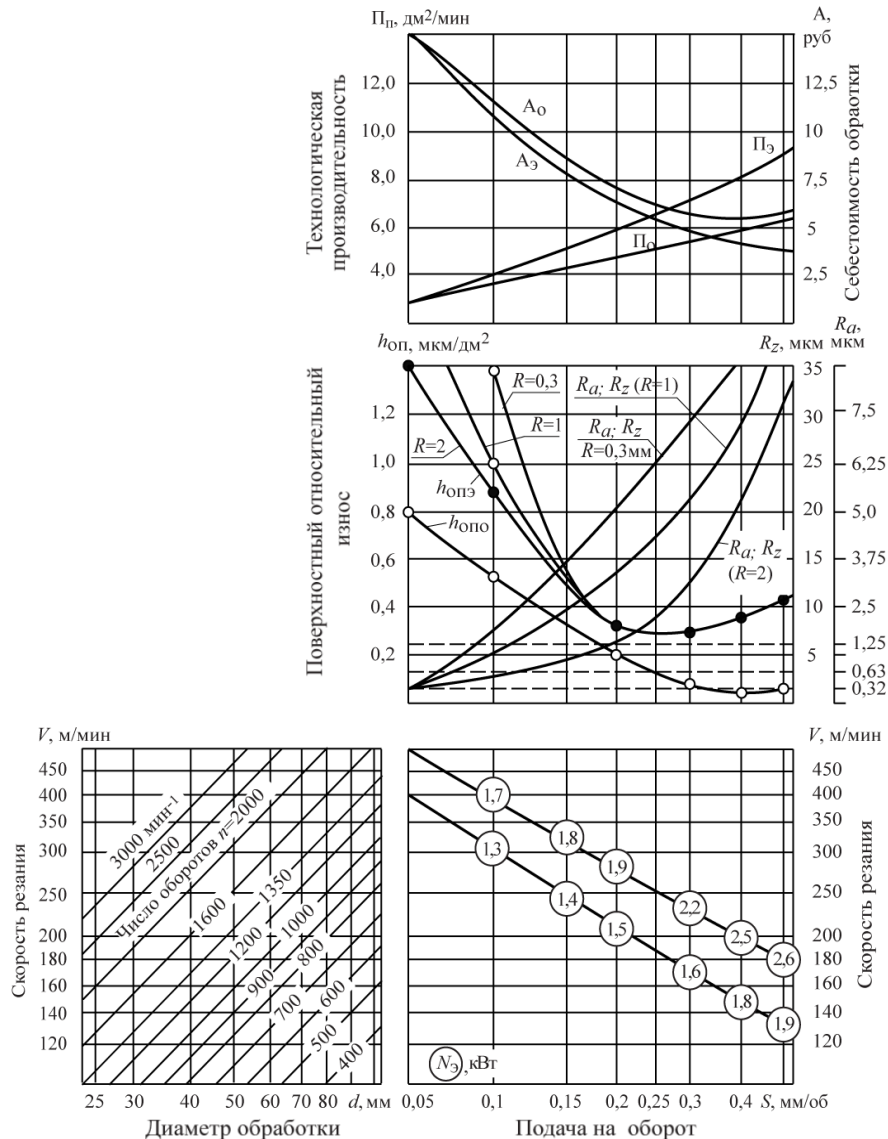


Рис. 1. Номограмма определения подач и скоростей резания при точении стали 40X13. Резец унифицированной конструкции с режущим элементом (РЭ) из Т15К6: $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\phi = \phi_1 = 45^\circ$; $R = 0,3 - 2,0$ мм; $t = 0,5 - 1,5$ мм.

Повышение скорости резания от V_0 до V_s приводит к повышению технологической производительности от $П_0$ до $П_s$ и снижению себестоимости обработки от A_0 до A_s .

Поверхностный относительный износ при этом повышается от $h_{опн}$ до $h_{опэ}$, следовательно, размерная стойкость инструмента и точность обработки снижаются.

Работа на скоростях резания $V < V_0$ приводит к снижению производительности обработки и повышению её себестоимости. Точность обработки и размерная стойкость инструмента при этом также снижаются, а расход инструмента, отнесённый к одной детали, повышается.

Работа на скоростях резания $V > V_s$ приводит к снижению производительности общественного труда, размерной стойкости инструмента и точности обработки. Расход инструмента и себестоимость обработки повышаются. Именно такие скорости резания рекомендуют ведущие иностранные фирмы, продающие РФ непереключаемые пластины [7-10]. Таким образом «оптимизируется» заведомо проигрышный вариант технологии [10,11].

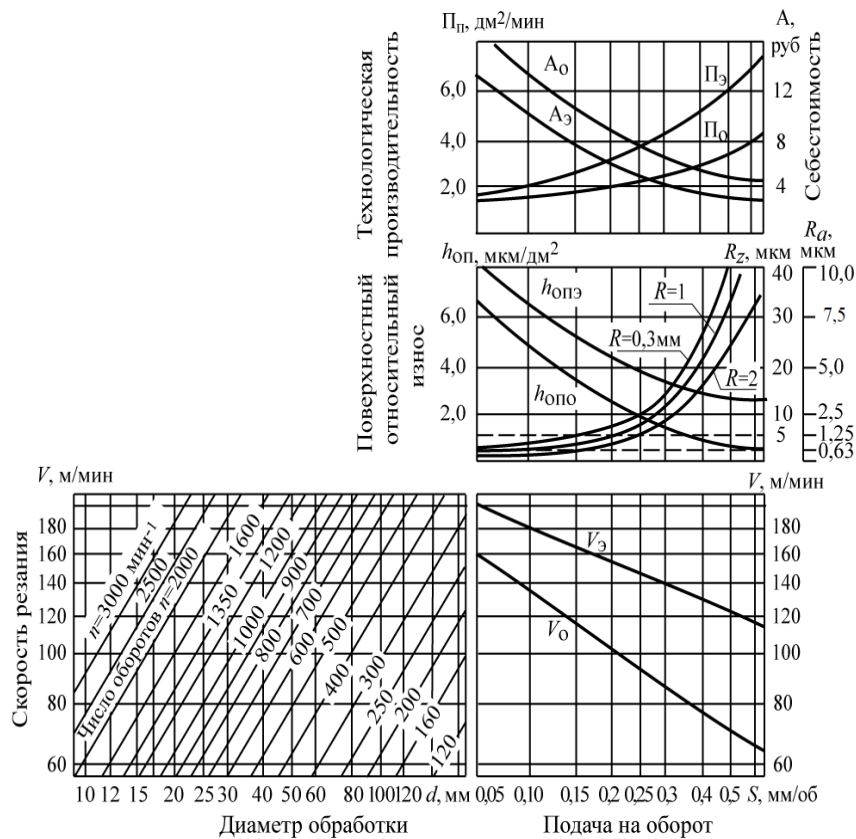


Рис. 2. Номограмма определения подач и скоростей резания при точении стали 30ХГСА. Резец унифицированной конструкции с РЭ из Т15К6: $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\phi = 60^\circ$; $\phi_1 = 30^\circ$; $R = 0,3 - 2,0$ мм; $t = 0,5 - 1,5$ мм.

Целесообразный диапазон изменения скоростей резания заключён между линиями V_0 и V_s . Выбор скоростей резания по линии V_0 должен производиться при повышенных требованиях к точности обработки при обработке крупных деталей в точном машиностроении, а также при эксплуатации инструмента на много-резцовых станках при групповом методе обработки деталей и в условиях автоматизированного производства. В остальных случаях скорости резания должны выбираться по линии V_s .

По полученной скорости резания и диаметру обрабатываемой детали находится число оборотов шпинделя станка (см. рис. 1-4).

Наличие сетки с числами оборотов n шпинделя станка и линий V_0 и V_s , на узловых точках которых представлена величина эффективной мощности резания (для $t = 1$ мм), облегчает задачу наиболее полного использования мощности станка и позволяет оператору принимать правильные решения при округлении числа n в сторону меньшего или большего числа.

При обработке углеродистых и легированных сталей наивысшая точность обработки и минимальная её себестоимость наблюдаются при работе на различных скоростях резания (линии V_0 и V_s на рис. 1 и 2).

Характерной и важной для практики особенностью обрабатываемости жаропрочных сплавов и закалённых сталей (рис. 3 и 4) является полное совмещение линии V_0 с линией V_s , и линии $h_{оп0}$ — с линией $h_{опз}$.

При обработке указанных труднообрабатываемых материалов режимы резания, являющиеся оптимальными по размерной стойкости инструмента, являются оптимальными также и по себестоимости обработки и производительности общественного труда [1,5,12,13].

Исследования показали, что изменение глубины резания в пределах от 0,25 до 3 мм при обработке конструкционных углеродистых и легированных сталей (Сталь 50, 20Х13, 40Х13, 30ХГСА) почти не отражается на величине поверхностного относительного износа. Поэтому приведённые на рис. 1 и 2 номограммы могут быть использованы для выбора режимов резания (S и V) с различными глубинами резания, обычно применяемыми при чистовой и получистовой обработке. Разработка таких номограмм для различных обрабатываемых материалов может производиться лишь для узкого диапазона изменения глубины резания (например, $t = 0,5 - 1,5$ мм).

Эти номограммы и разработанные с их использованием таблицы-матрицы выбора инструментальных наладок и режимов резания для группового производства позволяют увязывать выбор режимов резания с шероховатостью поверхности, точностью, производительностью и себестоимостью обработки; производить расчёты точности обработки на металлорежущих станках; снизить потери времени работы оборудования в автоматизированном групповом производстве, вызываемые износом унифицированного инструмента; обоснованно назначать кинематические характеристики проектируемых станков и автоматических линий [1,5,12].

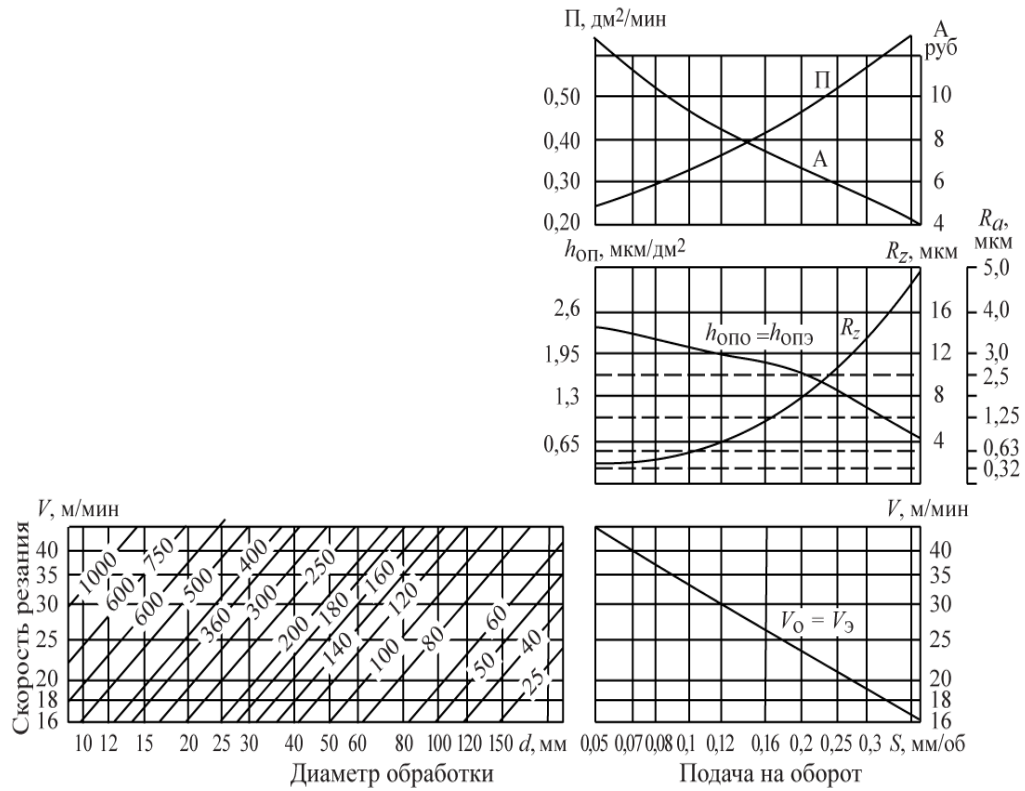


Рис. 3. Номограмма определения S и V при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР. Резец унифицированной конструкции с РЭ из ВК60М: $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\phi = 45^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$; $R = 0,3 - 2,0$ мм; $t = 0,5 - 1,5$ мм.

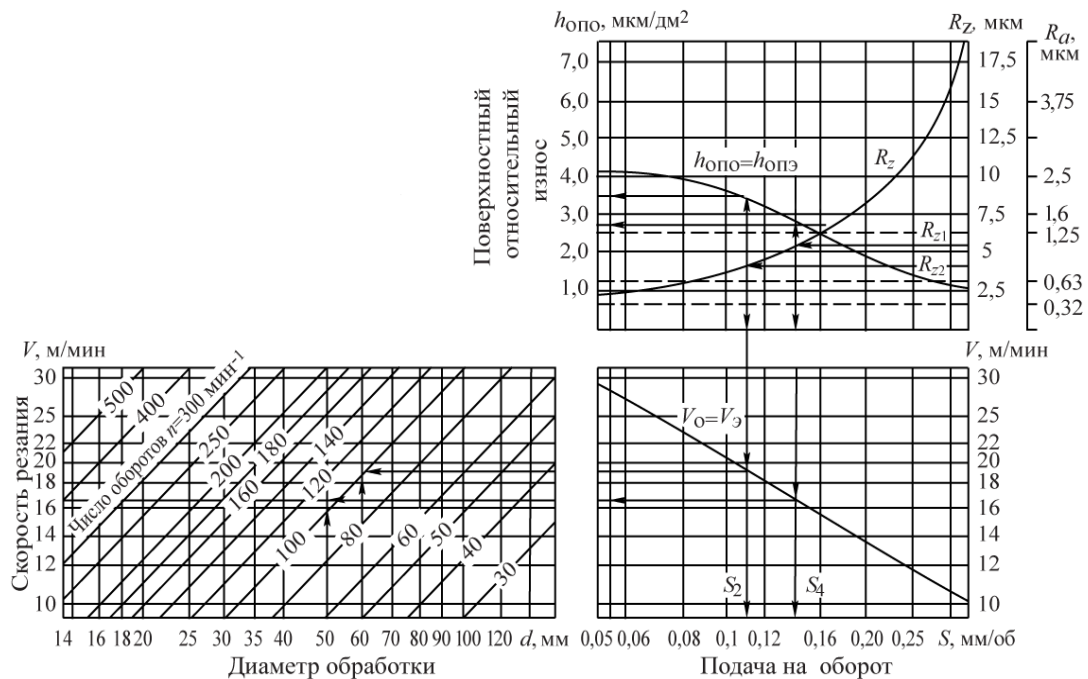


Рис. 4. Номограмма определения S и V при точении закаленной стали ЭХ12М HRC 58-59. Резец унифицированной конструкции с РЭ из Т15К6: $\gamma_{пр} = -18^\circ$; $\gamma_{пол} = 0^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\phi = \phi_1 = 15^\circ$; $R = 0,3$ мм; $t = 0,2 - 0,3$ мм.

Априори назначаемые периоды стойкости РИ под предлогом того, так удобно технологам или нормировщикам, без определения оптимальных: скорости резания V_o и интенсивности относительного поверхностного износа $h_{опо}$ (или удельной поверхности определенного качества, приходящейся на 1 мкм размерного износа) для типоразмера (модели) РИ, является попыткой завуалировать степень незнания (недоисследованности) области применения конкретной модели РИ и типоразмера (модели) обрабатываемой поверхности и материала обработки (в конкретном его состоянии: отожженном, нормализованном, улучшенном, закаленном или состаренном) [6,7,10,11].

Экономический или бухгалтерский (начетнический) подход к оптимизации (или так называемой рационализации) условий резания не может заменить истинно научный подход, который учитывает физические (физико-химические) основы контактного взаимодействия типоразмера режущего клина (радиус округления режущей кромки ρ , задний угол α , передний угол γ , с шероховатостью передней и задней поверхности) РИ и материала заготовки в его конкретном механо-физическом состоянии, т.е. назначает и определяет режимы оптимального резания (РОР) на основе закона существования оптимальной температуры резания θ_0 , которая соответствует оптимальной скорости резания V_0 , обеспечивающей минимальную относительную поверхностную интенсивность износа h_{opt} данной модели РИ при обработке модели ОМ (пары моделей материалов) [4,5,14,15].

РОР предопределяют необходимость оптимизации радиуса округления режущего клина, который обеспечивает минимизацию сечения среза, особенно, при тонкой (прецизионной), финишной и высокоскоростной обработке труднообрабатываемых и закаленных материалов [16].

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные теоретические и практические выводы:

1. При обработке заготовок из различных материалов зависимости интенсивности износа инструмента от скорости V и температуры θ резания носит экстремальный характер с точками минимума при оптимальных значениях указанных параметров.

2. Повышение скорости V и температуры θ резания до их оптимальных значений снижает прочность адгезионной связи на срез, повышает отношение твердостей H_1/H_2 поверхностей контакта инструмента и детали.

3. Снижение интенсивности адгезионного взаимодействия (величина τ_a), сил и коэффициентов трения на поверхности УРИ и снижение объема пластических деформаций срезаемого слоя и обработанной поверхности, наблюдаемые при повышении V и θ до их оптимальных значений, обуславливают снижение интенсивности износа УРИ и шероховатости обработанной поверхности.

4. Повышение V и θ против их оптимальных значений приводит к снижению прочности адгезионных связей на срез, но резко усиливает диффузионные, окислительные и электроэмиссионные процессы на контактных поверхностях инструмента, что повышает интенсивность износа УРИ.

5. Для некоторых углеродистых и легированных сталей и жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе зависимость характеристик пластичности (δ , ψ) от θ носит сложный характер с точкой минимума при некотором значении температуры θ_{np} , называемой **температурой провала пластичности**. Снижение пластических свойств материалов при этой температуре связано с переходом от внутризеренному скольжению к межзеренному скольжению при температуре провала пластичности.

6. Значения оптимальных температур θ_0 , соответствующих наименьшей интенсивности износа h_{opt} УРИ, удовлетворительно совпадают с θ_{np} . Это совпадение обусловлено тем, что на каждое из упомянутых явлений (изменения h_{opt} и пластичности материала заготовки) влияет один и тот же фактор — *повышение диффузионной подвижности атомов*.

7. Отношение контактных твердостей H_1/H_2 , диффузия и адгезия, окислительные процессы, пластическое течение контактных слоев УРИ и другие, являются функцией температуры контактных поверхностей. Следовательно, наблюдаемая для данной пары материалов инвариантность θ_0 по отношению к выбору элементов сечения срезаемого слоя и других условий процесса резания является закономерным явлением.

8. При повышении подачи h_{opt} изменяется аналогично коэффициенту трения и по задней поверхности. Изучение закономерностей изменения и помогает правильно понять и объяснить характер функций $h_{opt} = f(S)$ при работе на различных V и обоснованно интенсифицировать процесс резания. Работа на повышенных S при сохранении постоянства θ_0 является важным резервом повышения производительности обработки и размерной стойкости РИ.

Номограммы и таблицы-матрицы многоуровневой базовой технологии (МБТ) позволяют по заданной высоте неровностей обработанной поверхности и принятой величине радиуса R сопряжения задних поверхностей реза определить РОР. Номограммы избавляют рабочего и нормировщика, технолога и конструктора при выборе РОР от власти случайного выбора, дающего обычно непредсказуемые результаты [6-10]. Подобные номограммы используются при проектировании технологии на автоматах продольного точения, токарно-револьверных станках и автоматических линиях, где скорости рабочих движений устанавливаются неизменными. Также они необходимы для успешной разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Номограммы и таблицы-матрицы МБТ наглядно показывают, что при соблюдении постоянства оптимальной температуры резания повышение подачи (в диапазоне, характерном для полустогового, чистового и тонкого точения) всегда повышает не только производительность обработки, но и размерную стойкость УРИ, а, следовательно, точность и качество обрабатываемых поверхностей ответственных деталей высокотехнологичных изделий [5,13-16].

Литература:

1. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. — 278 с.
2. Резец: Патент РФ № 2170160 / Калмыков В.И., Ракунов Ю.П., Хрульков В.А., Петровская Т.М., Золотова Н.А., Борисенко Н.Н. — Бюл. № 19, 2001.
3. Многократно перетачиваемый резец: Патент РФ № 2226453 / Ракунов Ю.П., Хрульков В.А., Золотова Н.А., Тихонов Н.А. — Бюл. № 10, 2004. .

4. Ракунов Ю.П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012. № 3, С. 23–31. .
5. Ракунов Ю.П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин. // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 2, 2013. – С. 36-48.
6. Звонцов И.Ф., Иванов К.М., Серебrenицкий П.П. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 588 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) .
7. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2017).
8. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
9. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
10. Патрик де Вос (Patrick de Vos). Десять простых шагов для максимального увеличения эффективности и производительности // Машиностроитель. – № 3, 2017. – С. 40-47.
11. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами // С.В. Грубый. - М.: Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана. 2014. 149 с.
12. Ракунов Ю.П. Подсистема синтезирования многоуровневой базовой технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С.36-46.
13. Ракунов Ю.П., Абрамов В. В., Золотова Н.А. Прогрессивные конструкции и технологические процессы изготовления унифицированных твёрдосплавных резцов к станкам с ЧПУ // Станочный парк – 2011, № 5. – С.71-75.
14. Ракунов Ю.П., Абрамов В. В. Аналитический метод определения сил резания при тонкой механической обработке. // Перспективные научные исследования. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Бял ГРАД-БГ (г. София, Болгария) 17-25.02.2014. . .
15. Ракунов Ю.П., Абрамов В. В., Ракунов А.Ю. Теоретические и эмпирические предпосылки определения режимов оптимального резания металлов и сплавов унифицированными резцами. Материалы XXVI международной научно-технич. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века» г. Севастополь, 09.2019.
16. Ракунов Ю.П., Абрамов В. В., Ракунов А.Ю. Влияние геометрических параметров унифицированного инструмента на оптимальную скорость резания и относительный поверхностный износ. Там же.