

УДК 621.9.06

Ю. П. Ракунов, канд. техн. наук, доцент; **В. В. Абрамов**, д-р техн. наук, профессор;
А. Ю. Ракунов, инженер

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия

E-mail: Rakunov1991@mail.ru, E-mail: valabramov@rambler.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ УНИФИЦИРОВАННЫМИ РЕЗЦАМИ

В статье рассмотрены научно-технические подходы к проблеме определения скорости резания при механической обработке рабочих поверхностей деталей машин унифицированным инструментом на станках с ЧПУ. Произведено сопоставление оптимальных температур резания, полученных при точении сталей, с температурами их структурно-фазовых α - γ превращений. Разобраны методические ошибки исследователей по назначению стойкости инструмента и скорости резания, основанного на формулах Тейлора. Классифицированы ускоренные способы определения режимов оптимального резания. Показано, что закон постоянства оптимальной температуры резания обеспечивает максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания, как для конструкционных, так и труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: эффективность оптимального резания, оптимальная скорость резания, экономическая стойкость инструмента, методические ошибки, режимы резания, оптимальная температура резания, температура структурно-фазовых превращений, интенсивность износа, максимальная стойкость инструмента.

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A. Y. Rakunov

THEORETICAL AND EMPIRICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING THE OPTIMAL CUTTING CONDITIONS FOR METALS AND ALLOYS USING UNIFIED CUTTERS

The article considers the scientific and technical approaches to the problem of determining the cutting speed during the machining of the working surfaces of machine parts with a unified tool on CNC machines. A comparison was made of the optimum cutting temperatures obtained during steel turning with the temperatures of their structural-phase α - γ transformations. Methodological errors of researchers on the purpose of tool life and cutting speed, based on Taylor's formulas, are analyzed. Accelerated methods for determining the optimal cutting conditions are classified. It is shown that the law of constancy of the optimum cutting temperature provides the maximum tool life, the highest machining accuracy at the optimum cutting speed for both structural and hard-to-machine materials.

Keywords: optimal cutting efficiency, optimal cutting speed, economic tool life, methodological errors, cutting conditions, optimum cutting temperature, temperature of structural and phase transformations, wear rate, maximum tool life.

1. Введение

Важнейшей задачей науки о резании металлов является установление действительных закономерностей основных характеристик процесса в зависимости от изменения свойств обрабатываемого материала (ОМ), параметров режимов резания (РР), материала и геометрии режущего инструмента (РИ) и других внешних условий с целью оптимизации процесса по выбранным критериям оптимизации. Для оценки процесса резания наи-

большее значение имеют: размерный износ и стойкость унифицированного РИ (УРИ), производительность и себестоимость обработки и показатели качества деталей: их эксплуатационная надежность и долговечность [1-3]. Наибольшие резервы повышения эффективности и качества обработки, снижения расхода инструментальных материалов (ИМ) содержатся в правильном выборе скорости резания V , так как она определяет тепловую напряженность процесса резания, производительность и качество обработки. Определение оптимальной V представляет наибольшую трудность, т.к. зависимость интенсивности износа УРИ от V носят характер сложных кривых с одной или несколькими точками минимума. В ряде научных коллективов СССР и РФ были проведены исследования указанных вопросов, которые заложили основы теории резания металлов с направлением оптимизации процессов по физическим параметрам – интенсивности износа h_{on} РИ и параметрам качества поверхностного слоя [1-6]. Основой и стимулом для развития исследований послужила выдвинутая А.Д. Макаровым гипотеза о постоянстве температуры резания θ_0 , при которой наблюдаются минимальная интенсивность износа унифицированного РИ и его максимальная размерная стойкость [2, с. 67-73]. Эта гипотеза нашла экспериментальное подтверждение для продольного точения, затем оказалась справедливой и для многих видов обработки металлов лезвийными РИ: торцового точения, растачивания, торцового фрезерования, фрезерования концевыми фрезами, сверления, нарезания резьбы, зубофрезерования, протягивания, зенкерования и развертывания. Из указанного закона выведено свыше десятка следствий, значительно расширивших и углубивших его действие [2]. Инвариантность оптимальной температуры θ_0 к изменению большого числа внешних условий процесса резания [2-6] позволяет:

- значительно повысить размерную стойкость УРИ и снизить его расход, что особенно важно при обработке труднообрабатываемых материалов;
- производить адаптивное управление процессом резания по θ_0 (величине ТЭДС) и автоматически поддерживать процесс резания на оптимальном уровне.

2. Основное содержание и результаты работы.

Такое управление процессом резания при обработке крупногабаритных деталей сложной формы (дисков турбин и компрессоров газотурбинных двигателей) было внедрено на ряде предприятий с большим экономическим эффектом. Важным достоинством оптимальных по интенсивности износа УРИ скоростей резания является то, что указанные скорости являются оптимальными и по основным характеристикам качества поверхностного слоя [6]. Равенство или совпадение указанных скоростей резания (как и само существование оптимальных температур контактного взаимодействия при резании металлов) вытекает из установленной и уточняемой в течение ряда лет физической сущности оптимальной температуры θ_0 . Так в работе [7] была выдвинута гипотеза о равенстве θ_0 при обработке сталей температуре точки A_{C_3} структурно-фазового α - γ превращения, а в работе [2, с.73] отмечалось, что θ_0 титанового сплава примерно равна температуре его рекристаллизации. Естественно, что совпадение θ_0 с температурой структурно-фазовых или иных превращений в обрабатываемых материалах является закономерным. При температурах структурно-фазовых превращений в приповерхностных контактных слоях обрабатываемых материалов происходит резкое, скачкообразное изменение физических свойств (параметра кристаллической решетки, коэффициента линейного расширения, удельных теплоемкости и электросопротивления, термоэлектродвижущей силы, модуля упругости и др.), ослабление межатомных связей и потеря устойчивости решетки исходной фазы к смещениям атомов при нагреве. Исчезновение ферромагнетизма при температурах точек Кюри (для железа -768 C° , никеля -365 C° , кобальта- 1150 C°) также сопровождается скачкообразным изменением ряда физических свойств. Эксперимен-

тальные исследования чистового точения ($t = 0,25$ мм, $S_0 = 0,1$ мм/об) сталей твердосплавными УРИ из Т15К6 и Т30К4, показали (см. рис 1 и табл. 1), что θ_0 , измеренные методом естественной термопары, как температуры, обеспечивающие наименьшую h_{on} УРИ, практически совпадают с температурами точек АС₃ структурно-фазовых превращений в указанных сталях. Убедительное экспериментальное подтверждение гипотезы о равенстве θ_0 температурам структурно-фазовых α - γ превращений получено также при точении железо-никелевых сплавов [4]. Тот факт, что θ_0 связывается с температурами критических точек структурно-фазовых или иных превращений ОМ, является основанием для инвариантности θ_0 по отношению к различным видам обработки. В силу того, что износ УРИ по задней поверхности h_3 и образование поверхностного слоя детали являются результатом действия одних и тех же физических причин (работа сил трения в контакте УРИ-деталь), при наличии *экстремальной* зависимости интенсивности износа от V , зависимости шероховатости поверхности, глубины и степени наклепа, плотности дислокаций от V должны иметь экстремальный характер с точками минимума при *оптимальных скоростях резания* – V_0 . Детали, обработанные на V_0 , как показали исследования, имеют более высокую жаропрочность, длительную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость по сравнению с деталями, обработанными на более низких или более высоких скоростях резания. Рабочие поверхности, обработанные на V_0 , обладают максимальной контактной жесткостью [2,5]. Так же оптимальные по интенсивности износа РР являются оптимальными по форме и характеру схода стружки и объемной деформации сжатия стружки. Работа на режимах оптимального резания (РОР) приводит к достижению наиболее высокой точности чистовой и финишной обработки и повышает надежность ее обеспечения [3-7].

Сопоставление оптимальных температур резания, полученных при точении сталей, с температурами их структурно-фазовых α - γ превращений

Таблица 1.

Марка стали	Оптимальная температура / скорость резания θ_0 / V_0 ; $(V_{60}^{T15K6}); (V_{60}^{T30K4})$ °С / м/мин	Температура точки АС ₃ θ_1 , °С	$\Delta_0 = \theta_0 - \theta_1$, °С	$\Delta = (\theta_0 - \theta_1) / \theta_0$, %
Сталь Э	910 /540; (452); (640)	890	20	2,2
10	850 /460; (615); (872)	860	30	3,36
20	870 /390; (436); (618)	840	30	3,44
30	840 /340; (356); (504)	820	20	2,38
40	820 /300; (258); (366)	730	30	3,65
45	790 /280; (249); (353)	775	15	1,9
45	800 /285; (260); (369)	775	25	3,12
50	790 /270; (211); (299)	760	30	3,80
12Х2Н4А	800 /240; (230); (325)	780	20	2,5
20ХН	850 /320; (386); (547)	835	15	1,76
20ХНМ	820 /315; (376); (533)	810	10	1,22
30ХГСА	820 /160; (192); (273)	830	-10	1,22
30ХГСНА	800 /155; (180); (256)	815	-15	1,87
50Х	780 /220; (228); (323)	770	10	1,28
50ХНС	800 /235; (225); (320)	770	30	3,75

Прим.: $V_{60}^{T15K6}; V_{60}^{T30K4}$ – скорости резания, дающие стойкости $T = 60$ мин для Т15К6; Т30К4

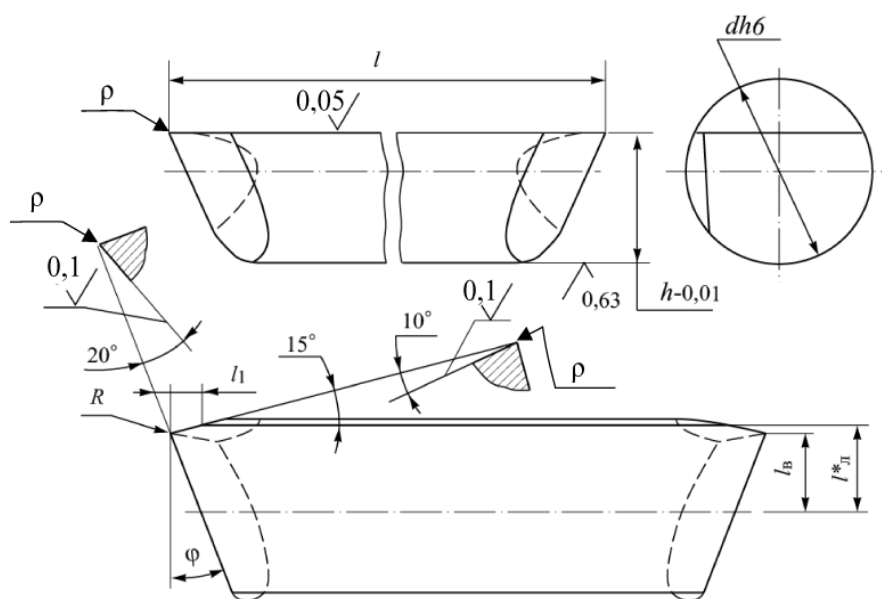


Рисунок 1. Режущий элемент УРИ лево-правый контурный, $\rho = 3 \dots 5$ мкм, $\rho = 5 \dots 10$ мкм.

Трудно переоценить положительные свойства V_0 при изготовлении особо ответственных деталей приборов и машин и при эксплуатации унифицированного, специализированного и специального РИ в условиях автоматизированного производства [6]. Оптимальные V_0 позволяют также производить объективную сравнительную оценку режущих свойств инструментальных материалов и обрабатываемости металлов резанием [7]. Знание V_0 является совершенно необходимым для технической грамотной и эффективной эксплуатации УРИ в многообразных условиях его применения. Таким образом, использование V_0 позволяет исключать все еще имеющиеся на практике случаи неправильной (или преднамеренной), технически неграмотной эксплуатации инструмента, когда в погоне за высокой стойкостью РИ на производстве в ряде случаев используют заниженные скорости резания V_T [2,7] (табл. 1). К сожалению, в погоне за производительностью часто жертвуют стойкостью инструмента, назначая завышенную скорость резания V_T , соответствующую по давно устаревшей и несправедливой формуле Тейлора, произвольно выбранному периоду стойкости T_3 [1,2,5,8]. При этом повышение производительности на 33...46% приводит к снижению стойкости в 4...6 раз [2,3], что недопустимо, как по причине низкого качества обработки, так и высокой инструментальности процесса, частоты смены и наладки РИ, что нарушает режим станков с ЧПУ «настройки и коррекции размеров» обрабатываемых поверхностей деталей и приводит к экономическим потерям [10,11].

С этой точки зрения весьма показательным является *пример*, приведенный в статье, которую написал Патрик де Вос (Patrick de Vos) – управляющий по корпоративному техническому обучению компании Seco Tools [9]. «Упрощенный пример непредвиденного взаимодействия факторов обработки: при обработке детали 2 минуты требуется на резание и 2 минуты – на загрузку и разгрузку заготовки. На смену РИ уходит 1 минута; период стойкости инструмента $T = 10$ минут – 5 заготовок, то есть время индексации инструмента (настройки на размер) составляет 0,2 минуты на деталь. Для каждой детали требуется 4,2 минуты времени обработки, следовательно, производительность немного пре-

вышает 14 заготовок в час. Стоимость РИ составляет 15 евро, а его стойкость, равная 5 заготовкам, означает, что для производства 14 заготовок требуется 2,8 инструмента (стоимость - 42 евро). Стоимость станка – 50 евро в час. Итого стоимость производства 14 заготовок за 1 час составляет 92 евро. Затем, пытаясь ускорить выработку и производительность, цех увеличивает V на 10%. Это сокращает время резания на 10% (до 1,8 минуты), но при этом снижает стойкость инструмента примерно вдвое. Это значит, что одна режущая кромка обработает только 2,5 заготовки до того, как потребуется индексация. Время индексации РИ по-прежнему составляет 1 минуту, загрузка/разгрузка заготовки – 2 минуты. Время производства 1 заготовки остается 4,2 минуты (1,8 минуты резания, 2 минуты перемещение заготовки и 0,4 минуты индексации инструмента) или 14 заготовок в час. Стоимость станка и РИ неизменны, поэтому требуется использовать в час 5,6 инструмента (стоимость - 84 евро). *Несмотря на попытку повысить производительность*, время обработки 14 заготовок остается прежним, а затраты повышаются с 92 до 134 евро. (в 1,45 раза)! В данном случае увеличение V не повышает производительность перехода. Изменение времени резания влияет на другие факторы в системе обработки: в данном примере – на стойкость и время индексации РИ. Поэтому, цех должен тщательно учитывать все последствия изменений процесса». Другая форма скрытых затрат включает выполнение вспомогательных переходов в процессе. Например, на многих предприятиях классическим примером скрытых затрат является время, затраченное на индексацию сменных пластин. Время, отводимое на индексацию пластины, может составлять 1 минуту. Однако время, фактически измеряемое в производственном помещении на рабочем месте, может быть на 2, 3 или 10 минут больше, что означает разницу от 60 до 600 секунд в зависимости от точности размеров детали (заготовки), особенно, при финишной контурной обработке нескольких точных поверхностей за один установ в одном переходе (одним РИ). Зарубежные исследователи еще в 1960...70-х годах 20-го столетия убедились в несправедливости формулы Тейлора, которая не дает точного выражения зависимости $T=f(V)$ при стойкостях РИ меньших 120 мин. Соответствующие ей формулы экономических стойкости $T_{\text{э}}$ и скорости резания $V_{\text{э}}$ – неверны. Их использование дает очень малые экономические стойкости. Поэтому была предложена зависимость $T-V$, которая выражается формулой $V(C+T) = L$, где C – постоянная для данной пары материалов (обрабатываемый-инструментальный). Эта формула более точно определяет $T_{\text{э}}$ в диапазоне 120 -10 мин [5,8].

Важно отметить, что как снижение, так и повышение скоростей резания по сравнению с оптимальными V_0 приводит к значительному повышению интенсивности износа и снижению размерной стойкости инструмента. Например, полуторакратное повышение скоростей резания по сравнению с V_0 при чистовом точении стали 12Х18Н10Т унифицированными резцами Т30К4 на подачах 0,1–0,15 мм/об приводит к более чем двадцатикратному снижению размерной стойкости, а уменьшение V в два раза по сравнению с оптимальными в ряде случаев вызывает снижение размерной стойкости в 6–36 раз. Использование параметрических уравнений максимальной размерной стойкости во многих случаях позволяет повысить размерную стойкость инструмента (в 1,15–3,34 раза) при одновременном повышении производительности обработки (в 1,17–2,57 раза) и снизить себестоимость изготовления деталей (в 1,19–2,56 раза) по сравнению с нормативными данными [1,2-4].

Для определения оптимальных V_0 обычно проводят стойкостные исследования на 6-8 скоростях резания и скорость резания, при которой обеспечивается максимальная размерная стойкость РИ или наименьшая интенсивность его износа, и принимают за оптимальную - V_0 . Этот метод определения V_0 является достаточно надежным, но обладает

очень высокой трудоемкостью и требует большого расхода исследуемых на обрабатываемость материалов. Использование же оптимальной температуры резания θ_0 , являющейся физической константой обрабатываемого материала, позволяет определять V_0 для любых видов обработки лишь на основе температурных исследований без постановки и организации трудоемких стойкостных испытаний.

3. Ускоренные способы определения V_0 подразделяют на следующие группы:

1. Методы, основанные на сокращении продолжительности стойкостных испытаний, когда интенсивность износа РИ определяют лишь по начальному участку периода нормального износа без доведения РИ до полного износа [2,4]. К этой группе относится и метод, основанный на том, что за одно затупление (допустимый износ) РИ производится определение интенсивности его износа не для одной, а для нескольких (3-5) скоростей резания [4].

2. Способы, основанные на замене трудоемких стойкостных испытаний для построения кривой относительного поверхностного износа УРИ $h_{on} = f(V)$, опытами по установлению закономерностей изменения от скорости резания каких-то других, легко и быстро определяемых характеристик процесса резания. Естественно, такая замена правомерна в том случае, если заменяющие характеристики процесса резания в той или иной степени реагируют на переход v через оптимальную. Вообще говоря, такими характеристиками могут быть: усадка стружки, микротвердость ее прирезцово-й стороны, ширина пятна контакта стружки с передней поверхностью РИ, глубина повторного резания, параметры качества обработанного поверхностного слоя – шероховатость, глубина и степень наклепа. Точность этих методов будет зависеть от резкости и стабильности реагирования той или иной характеристики на переход v через оптимальное значение, от наличия надежных средств измерения, необходимых для фиксации критических точек на кривых зависимости отмеченных выше заменяющих характеристик от V . Для всех методов, отмеченных во второй группе, проведение процесса резания на 6-8 скоростях резания также является обязательным. Сокращение продолжительности испытаний здесь также может быть весьма значительным, так как для определения заменяющих характеристик время работы РИ на каждой V обычно не превышает 20-30 секунд.

3. Третья группа ускоренных способов определения V_0 основана на научно установленных фактах совпадения оптимальных температур резания с критическими температурами различного рода превращений в обрабатываемых материалах: точки АС₃ структурно-фазовых α - γ превращения, точка Кюри и др. Известно, что превращениях наблюдается скачкообразное (превращение 1 рода) или резкое (превращение 2 рода) изменения основных физических свойств металлов и сплавов [4]. Следовательно, определив температуру критических точек по температурным зависимостям физических свойств обрабатываемых материалов и приняв ее за θ_0 , можно легко определить и V_0 по кривым $\theta = f(V)$. Если при температурах структурных и фазовых превращений на температурных зависимостях физико-механических свойств обрабатываемых материалов (показатели пластичности, прочности твердости и др.) также наблюдаются критические точки (в виде точек максимума или минимума, точек перегиба и др.), то в этом случае оптимальные температуры (a , следовательно, и скорости) резания могут определяться по критическим точкам на указанных зависимостях.

Для облегчения практического использования возможностей быстрого подбора оптимальных режимов в производственных условиях разработаны специальные номограммы [2,3], в основе которых лежат параметрические уравнения максимальной размер-

ной стойкости, данные о высоте неровностей обработанной поверхности при оптимальных сочетаниях V и S , а также экономические расчёты (рис. 2).

Описанные способы послужили методической и технологической базой для разработки первичной подсистемы многоуровневой базовой технологии и способствовали созданию подсистемы синтезирования переходов, позиций и установок токарной групповой технологии в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства [3, 7, 11].

Номограммы

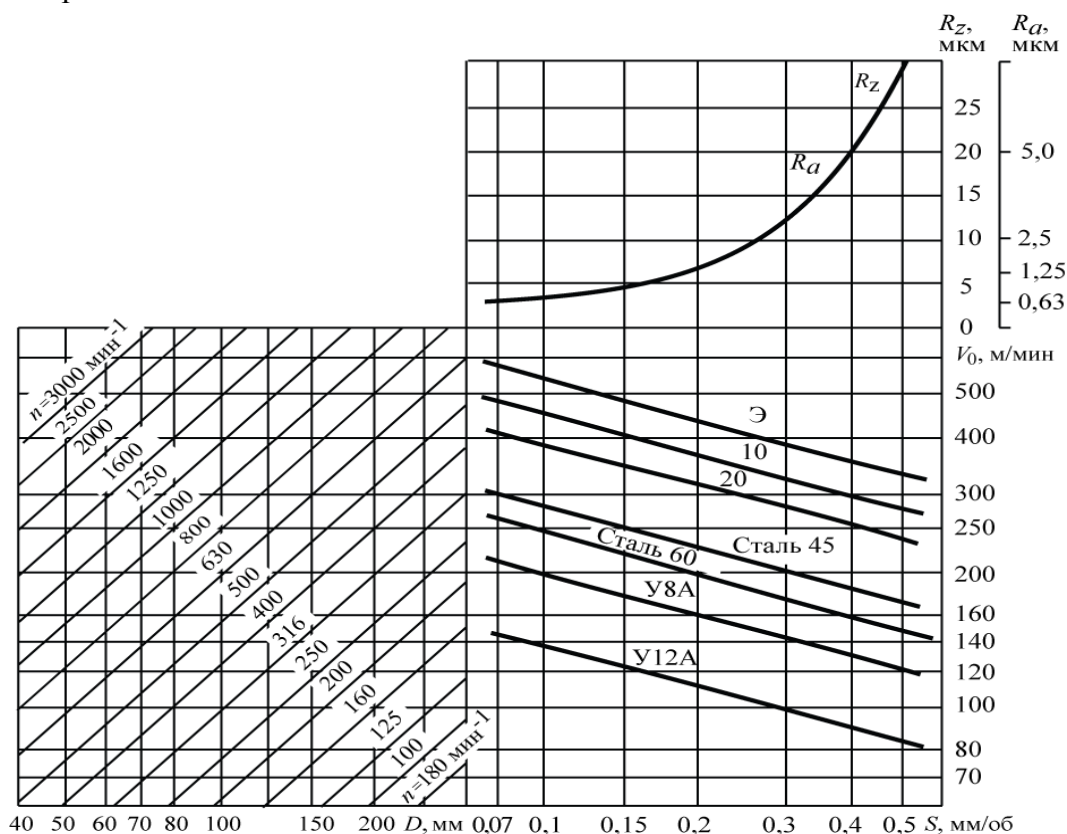


Рисунок 2. Номограмма выбора режимов резания при точении углеродистых сталей резцом Т15К6 ($\gamma = 8^\circ$, $a = \alpha_1 = 15^\circ$; $\phi = 35^\circ$; $\phi_1 = 15^\circ$; $R = 1 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$)

Номограммы позволяют по заданной высоте неровностей обработанной поверхности и принятой величине радиуса сопряжения задних поверхностей резца определить максимально допустимую величину подачи S_K . Работа на подачах $S > S_K$ не обеспечит требуемой чистоты обработки, а на подачах $S < S_K$ нерациональна, так как снижает производительность труда, повышает себестоимость обработки и поверхностный относительный износ (т. е. снижает точность обработки), а также увеличивает расход УРИ. Номограммы избавляют рабочего и нормировщика, технолога и конструктора при выборе оптимального режима резания от власти случайного выбора, дающего обычно непредсказуемые результаты [1-3]. Подобные номограммы необходимы при проектировании автоматических линий, где скорости рабочих движений устанавливаются неизменными. Также они необходимы для успешной разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Номограммы наглядно показывают, что при соблюдении постоянства оптимальной температуры резания повышение подачи (в диапазоне, характерном для получистового, чистового и тонкого точения) всегда повышает не только производительность обработ-

ки, но и размерную стойкость УРИ, а, следовательно, точность и качество обрабатываемых поверхностей ответственных деталей.

4. Заключение

В заключение необходимо отметить, что, основываясь на физических причинах появления оптимальных температурных зон при резании всех конструкционных сталей и жаропрочных сплавов, способах определения оптимальных скоростей резания разработаны методы направленного формирования свойств новых обрабатываемых материалов при обработке резанием. Внедрение указанных методов в производство высокотехнологичных изделий оказывается весьма эффективным. Детали, обработанные на V_0 , как показали многочисленные исследования, имеют более высокую жаропрочность, длительную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость по сравнению с деталями, обработанными на более низких или более высоких скоростях резания. Работа на режимах оптимального резания приводит к достижению наиболее высокой точности чистой и финишной обработки конструкционных и труднообрабатываемых материалов и повышает надежность ее обеспечения на автоматизированном оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Звонцов, И. Ф. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие / И. Ф. Звонцов. К. М. Иванов, П. П. Серебrenицкий // Учебники для вузов. Специальная литература. – 2-е изд., стер.– СПб.: Издательство «Лань», 2018.–588 с.
2. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
3. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 2 – С.36-48.
4. Макаров, А. Д. О связи оптимальных температур резания с температурами структурно-фазовых превращений в обрабатываемых материалах / А. Д. Макаров, Р. З. Самигуллин // Межвуз. науч. сб. Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. – Уфа: УАИ, 1981. – Вып. 6.
5. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
6. Пат. 2226453 Российская Федерация, Многократно перетачиваемый резец / Ракунов Ю.П., Хрульков В.А., Золотова Н.А., Тихонов Н.А.; 2004. – Бюл. № 10.
7. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – №3. – С. 23-31.
8. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
9. Патрик де Вос (Patrick de Vos). Десять простых шагов для максимального увеличения эффективности и производительности / Патрик де В. // Машиностроитель. – 2017. – №3. – С. 40-47.
10. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. Режим доступа:
<http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2018).
11. Ракунов, Ю. П. Подсистема синтезирования многоуровневой базовой технологии / Ю.П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 10. – С.36-46.

Поступила в редколлегию 20.05.2019 г.