

section X_L , and the coefficient of mutual inductive coupling $k_M = M/L = 0,5 \div 0,6$. Then the voltage drop across the sections

$$\Delta \dot{U} = X_L(\dot{I}_1 - k_M \dot{I}_2) = X_L(\dot{I}_2 - k_M \dot{I}_1) = X_L \dot{I}_{1(2)}(1 - k_M)$$

decreases by about half, which leads to a decrease in voltage fluctuations on the buses of a quiet load.

Split-winding transformers are also used for load sharing. The relationship between the voltage drops on the low side ΔU_2 and ΔU_3 can be represented as [2]:

$$\Delta U_2 = \Delta U_3 \frac{4-k_p}{4+k_p} \quad (25)$$

where is $k_p = U_{K(2-3)}/U_K$ the splitting coefficient, on average equal to 3.5; $U_{K(2-3)}$ - short-circuit voltage between the split secondary windings of the transformer; - U_K voltage of the through short-circuit transformer.

References

1. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electricity quality standards in general-purpose power supply systems] – Mn.: Mezhdgosudarstvennyy Sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. 1997. – 30 p.
2. Ivanov V.S. i Sokolov V.I. Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektroenergii sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy

[Modes of consumption and quality of electricity in power supply systems of industrial enterprises]. – M.: Energoatomizdat. 1987. – 337 p.

3. Zhezhelenko I.V. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power quality indicators and their control at industrial enterprises]. – M.: Energoatomizdat. 1986. – 167 p.

4. Zhezhelenko I.V., Sayenko YU.L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power quality indicators and their control at industrial enterprises]. – M.: Energoatomizdat. 2000. – 253 p.

5. Vol'dek A.I. Elektricheskkiye mashiny. – L.: "Energiya" [Energy]. 1974. – 839 p.

6. Rekomendatsii po zazemleniyu i zashchite personal'nykh [Recommendations for grounding and protection of personal computers] EVM. – M.: VNIPI «Tyazhpromproyekt», 2001. – 5 p.

7. Zhokhov B.D. Osobennosti elektrosnabzheniya tekhnicheskikh sredstv vychislitel'nykh sistem // Promyshlennaya energetika [Features of power supply of technical means of computing systems // Industrial energy], 1996, №3. – p. 17-24.

ГРНТИ 55.19.03
УДК 621.9.01;02

Rakunov Y.P.
PhD. Tech. Sci.
Abramov V.V.
Dr. of Tech. Sci., professor
Rakunov A.Y.
Engineer;

National Research Moscow State University of Civil Engineering

THEORETICAL AND PRACTICAL MEHTODES FOR DETERMINING THE OPTIMAL CUTTING CONDITIONS FOR METALS AND ALLOYS USING UNIFIED CUTTERS

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, Россия.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ УНИФИЦИРОВАННЫМИ РЕЗЦАМИ

Summary. 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.

Аннотация. 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.

Key words: 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.

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.

Введение. Постановка проблемы.

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 наибольшее 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, в том числе для труднообрабатываемых материалов (ТОМ), таких как жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. 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.

1. Основное содержание и результаты работы

Оптимальное 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 АС₃ 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 $-768\text{ }^\circ\text{C}$, никеля $-365\text{ }^\circ\text{C}$, кобальта $-1150\text{ }^\circ\text{C}$) также сопровождается скачкообразным изменением ряда физических свойств. Экспериментальные исследования чистового (финишного) точения ($t = 0,25\text{ мм}$, $S_0 = 0,1\text{ мм/об}$) 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_z 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].

Табл. 1

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

Марка стали	Оптимальная температура / скорость резания θ_0/V_0 ; (V_{60}^{T15K6}); (V_{60}^{T30K4}) °C / м/мин	Температура точки АС ₃ θ_1 , °C	$\Delta_0 = \theta_0 - \theta_1$, °C	$\Delta = (\theta_0 - \theta_1) / \theta_0$, %
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
I2X2H4A	800 /240; (230); (325)	780	20	2,5
20XH	850 /320; (386); (547)	835	15	1,76
20XHM	820 /315; (376); (533)	810	10	1,22
30XГСА	820 /160; (192); (273)	830	-10	1,22
30XГСНА	800 /155; (180); (256)	815	-15	1,87
50X	780 /220; (228); (323)	770	10	1,28
50XHC	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

Трудно переоценить положительные свойства V_0 при изготовлении особо ответственных деталей приборов и машин и при эксплуатации УРИ, 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 технически 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).

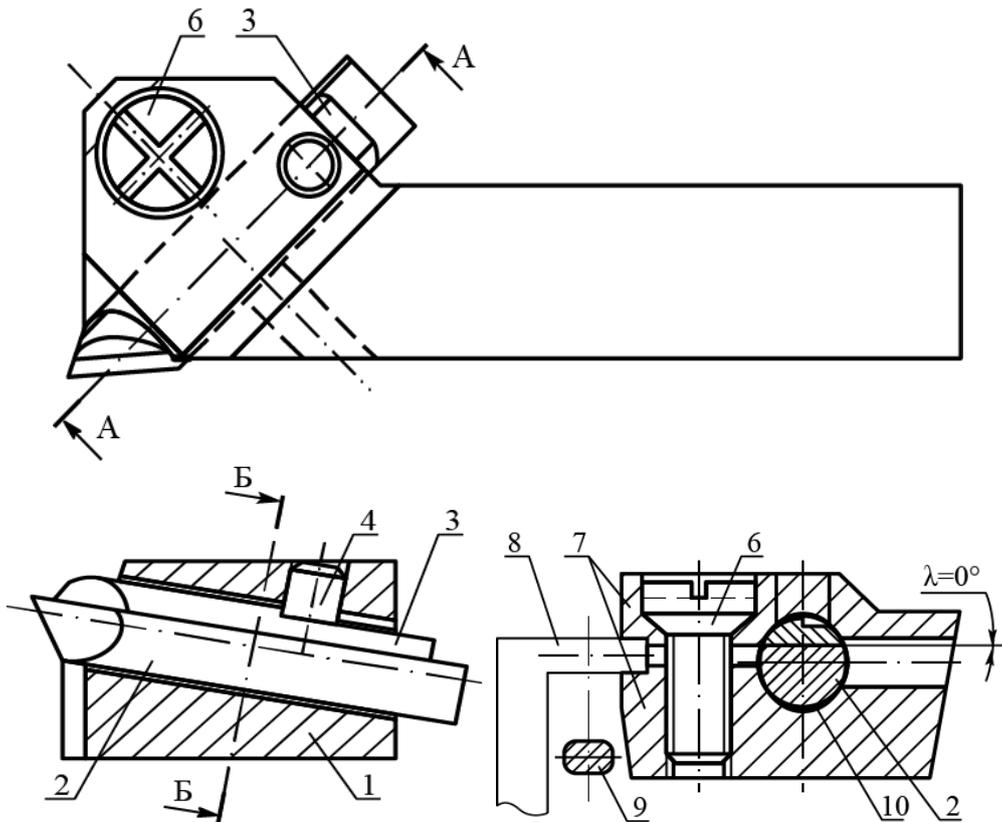


Рис.1. Унифицированный наружный контурный резец с многократно перетачиваемыми режущими элементами (РЭ)

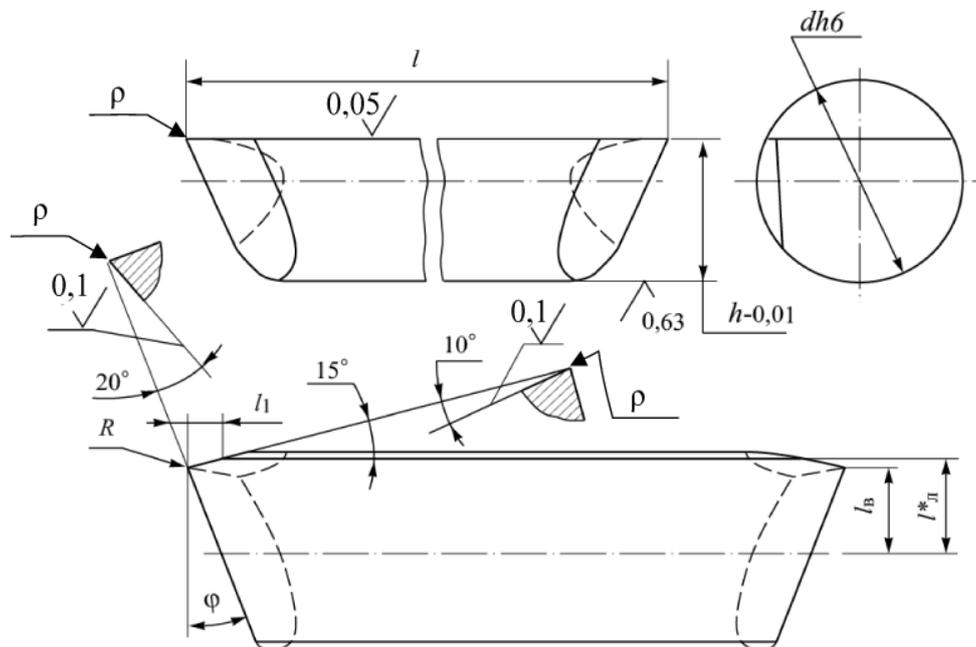


Рис.2. Режущий элемент УРИ лево-правый, контурный: $\rho_{np} = 5 \dots 10$ мкм
 $\rho_{\phi} = 3 \dots 5$ мкм.

К сожалению, в погоне за «производительностью» часто жертвуют стойкостью инструмента Т, назначая завышенную скорость резания V_T , соответствующую по давно

устаревшей и несправедливой формуле Тейлора, произвольно выбранному периоду стойкости T_{Σ} [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 влияния факторов обработки: при обработке детали 2 мин требуется на резание и 2 мин – на загрузку и разгрузку заготовки. На смену РИ уходит 1 мин; период стойкости инструмента $T=10$ мин – 5 заготовок, то есть время индексации инструмента (настройки на размер) составляет 0,2 мин на деталь. Для каждой детали требуется 4,2 мин времени обработки, следовательно, производительность немного превышает 14 заготовок в час. Стоимость РИ составляет 15 евро, а его стойкость, равная 5 заготовкам, означает, что для производства 14 заготовок требуется 2,8 РИ (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 мин), 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 мин. Время производства 1 заготовки остается 4,2 мин (1,8 мин резания, 2 мин перемещение заготовки и 0,4 мин индексации инструмента) или 14 заготовок в час. Стоимость станка и РИ неизменны, поэтому требуется использовать в час 5,6 РИ (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. Этот казус происходит по причине несоответствия условий обработки РОР, т.е. в виду отсутствия у ведущих производителей РИ со сменными неплетачиваемыми пластинами (СМП) технологических рекомендаций по РР для обеспечения точности обработки при необходимой стойкости РИ [8,10]. 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 СМП. Время на индексацию СМП,

может составлять 1 мин. Однако время, фактически измеряемое на рабочем месте, может быть на 2, 3 или 10 мин больше, что означает разницу от 1 до 10 мин 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 века 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_3 и скорости резания V_3 – 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 (ОМ-ИМ). Эта формула более точно определяет T_3 в диапазоне 10-120 мин [5,8]. . Важно отметить, что как снижение, так и повышение V 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 12X18H10T 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 скорости 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 трудоёмких стойкостных испытаний.

2. Ускоренные способы определения V_0 подразделяют на следующие группы: 1. Методы, основанные на сокращении продолжительности стойкостных испытаний, когда интенсивность износа УРИ определяют лишь по начальному участку периода нормального износа без доведения УРИ до полного износа [2,4]. К этой группе

относится и метод, основанный на том, что за одно затупление (допустимый износ) УРИ 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 прирезцової стороны, ширина пятна контакта стружки с передней поверхностью УРИ, 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 УРИ на каждой V обычно не превышает 20-30 секунд. 3. Третья группа ускоренных способов определения V_0 основана на научно установленных фактах совпадения θ_0 с критическими

температурами различного рода превращений в ОМ: точки AC_3 структурно-фазовых α - γ превращения, точка Кюри и др. Известно, что в 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 ОМ 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 ОМ (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 (а, 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 размерной стойкости, данные о высоте неровностей обработанной поверхности при оптимальных сочетаниях V и S , а также экономические расчёты (рис. 3,4).

Описанные способы послужили методической и технологической базой для разработки первичной подсистемы многоуровневой базовой технологии, типажа УРИ, таблиц-матриц РОР (путем проведения тщательных экспериментальных работ в течение 25 лет) и способствовали созданию подсистемы синтезирования переходов, позиций и установов токарной групповой технологии в условиях серийного и мелкосерийного многономенклатурного производства [3,7,11,12].

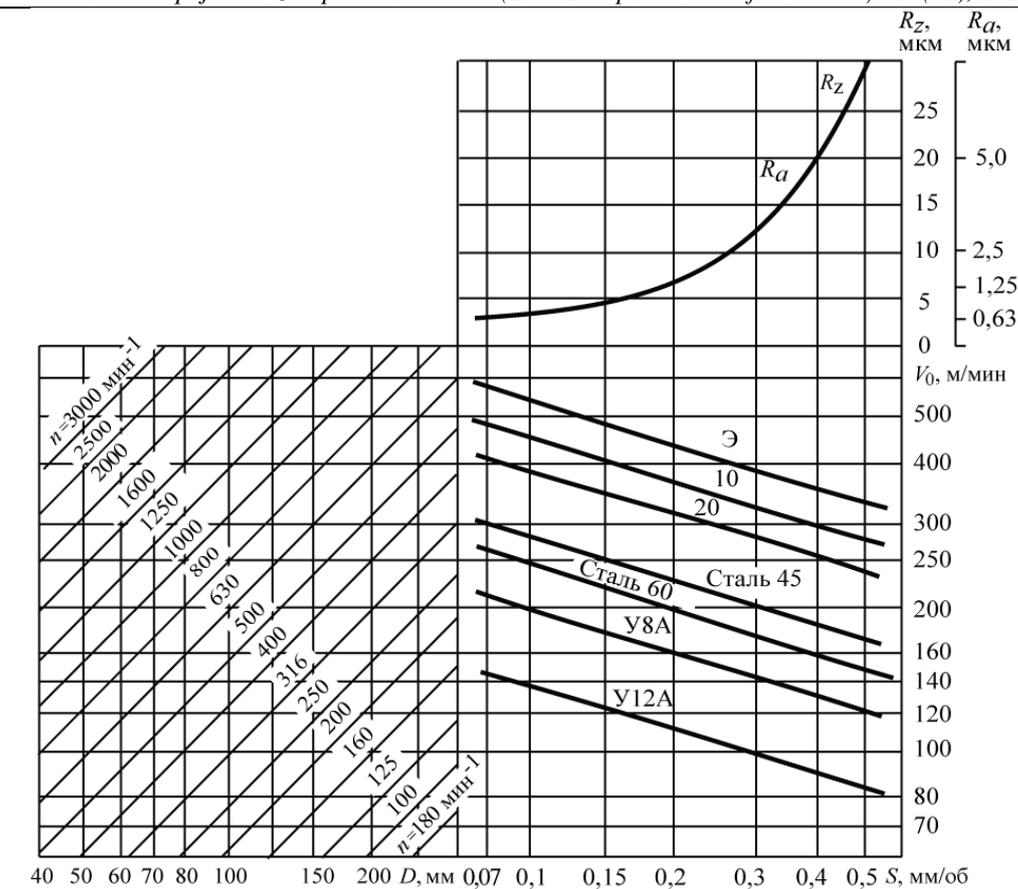


Рис. 3. Номограмма выбора режимов резания при точении углеродистых сталей резцом Т15К6 ($\gamma = 8^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 15^\circ$; $\varphi = 35^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $R = 0,5 \dots 1$ мм; $t = 0,5 \dots 1$ мм)

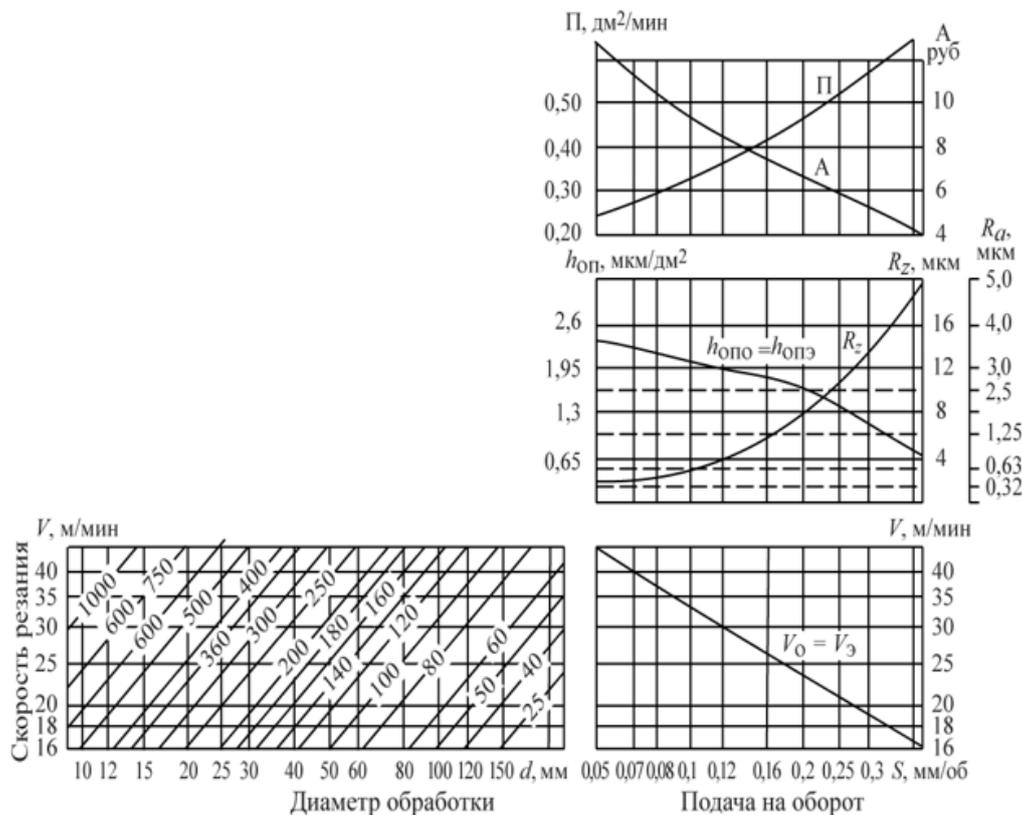


Рис. 4. Номограмма определения S и V при точении жаропрочного сплава XH77TЮР. Резец унифицированной конструкции с РЭ из ВК60М: $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $R = 0,3 - 2,0$ мм; $t = 0,5 - 1,5$ мм.

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 шероховатости 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 РР 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 и автоматов продольного точения. Номограммы наглядно показывают, что при соблюдении постоянства оптимальной температуры и скорости резания повышение подачи (в диапазонах для черного, получистового, чистового и тонкого точения) всегда повышает не только производительность обработки, но и размерную стойкость УРИ, а, следовательно, точность и качество обрабатываемых поверхностей ответственных деталей.

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 ОМ 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.

Список литературы

1. 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)
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
3. Ракунов Ю.П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин. // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 2, 2013. – С.36-48.
4. Макаров А.Д., Самигуллин Р.З. О связи оптимальных температур резания с температурами структурно-фазовых превращений в обрабатываемых материалах. Межвуз. науч. сб./ Уфа: УАИ, 1981, вып. 6. Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов.
5. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
6. Многократно перетачиваемый резец: Патент РФ № 2226453 / Ракунов Ю.П., Хрульков В.А., Золотова Н.А., Тихонов Н.А. – Бюл. № 10, 2004.
7. Ракунов Ю.П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // 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 // Машиностроитель. - №3, 2017. – С. 40-47.
10. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2019).
11. Ракунов Ю.П. Подсистема синтезирования многоуровневой базовой технологии // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С.36-46.
12. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ // Справочник. Инженерный журнал, приложение. №7, 2015. – С. 1-29.