

УДК 621.9.06.014

В. И. ТУРОМША, В. Т. САФИУЛЛИН

МЕТОДОЛОГИЯ НАЗНАЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 20.03.2009)

Введение. Достижение максимальной производительности обработки материалов резанием является важнейшей задачей машиностроения. Ее решение может быть достигнуто за счет выбора соответствующего станка, режущего инструмента и режима резания для конкретного технологического процесса. Для станка основными параметрами являются мощность N привода главного движения и частота вращения шпинделя n , для инструмента – период стойкости T , режим резания включает в себя глубину резания t , подачу S_0 , скорость резания v и количество рабочих ходов инструмента i . Для обеспечения максимальной производительности обработки параметры режима резания должны соответствовать максимуму функции $\Pi = tS_0v$ [1, 2].

Несмотря на внешнюю простоту задачи, она может иметь множество вариантов решения. Поэтому до настоящего времени существует много методик назначения параметров режима резания и его оптимизации. Среди них можно выделить табличные [3, 4] и аналитические [2, 5] методы. Последние интересны тем, что позволяют использовать математические методы анализа и поиска оптимального решения. Табличные методы отличаются простотой применения.

Теоретические основы применяемых в настоящее время методик назначения параметров режима резания сформулированы в 30 – 50-х годах прошлого столетия. В последующие годы произошел значительный рост технического уровня металлорежущих станков, и в частности, увеличение мощности и частоты вращения шпинделя. Инструментальное производство развивалось в направлении роста допускаемой инструментом скорости резания и создания высокопроизводительных режущих инструментов. Поэтому в соответствии с повышением уровня станкоинструментального производства необходимо совершенствование методологии назначения параметров режима резания.

Аналитические методы назначения параметров режима резания. Одним из основоположников науки о резании материалов является Тейлор [6]. В настоящее время в основном используются результаты его исследований по стойкости режущего инструмента. Он определил наивыгоднейший период стойкости резца, который можно было бы принять за норму. Свои зависимости и выводы Тейлор получил исходя из результатов опытов. При слишком малой стойкости резец необходимо часто затачивать, что приведет к большому числу перерывов в работе. При большой стойкости резца будут иметь место потери производительности из-за низкой скорости резания. Он считал, что на практике период стойкости резца должен составлять 90 мин. Обращает на себя внимание тот факт, что для опытов Тейлор брал такую скорость резания, при которой период стойкости составлял 20 мин. Автор объяснял это необходимостью ускорения исследований, на которые ему понадобилось 26 лет. Однако во многих современных справочниках именно период стойкости 14 – 20 мин рекомендуется при назначении параметров режима резания [7].

Анализ полученных Тейлором формул показывает, что он не учитывал параметры станка при выборе параметров режима резания. На это обратили внимание немецкие ученые. Проанализировав результаты исследований Тейлора, М. Кроненберг в 1931 г. установил зависимость площади F сечения срезаемого слоя от мощности N привода главного движения станка в виде [2]

$$F = \left[\frac{N}{C_N} \right]^{\epsilon_N}, \quad (1)$$

где C_N и ε_N соответственно равны $C_N = \frac{C_v C_p}{75 \cdot 60}$, $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_v \varepsilon_p}{\varepsilon_v \varepsilon_p - \varepsilon_v - \varepsilon_p}$ и определяются из полученных им зависимостей для вычисления скорости резания v и удельной силы резания p (т. е. силы резания P , отнесенной к площади F):

$$v = \frac{C_v}{\varepsilon_v \sqrt{F}} \quad \text{и} \quad p = \frac{C_p}{\varepsilon_p \sqrt{F}}.$$

Здесь C_v и C_p – соответственно скорость резания и удельная сила резания при площади сечения срезаемого слоя $F = 1 \text{ мм}^2$; ε_v и ε_p – показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала.

В соответствии с изложенной методикой М. Кроненберг принимает за наивыгоднейший режим резания такой, при котором достигаются полная загрузка станка по мощности и полное использование инструмента. Сечение стружки, рассчитанное по формуле (1), называется экономическим, т. е. является наивыгоднейшим при данной мощности станка. Под использованием инструмента понимается работа на скорости, соответствующей экономическому сечению стружки.

Выразив объем стружки Fv , снимаемой за единицу времени (производительность), в виде функции мощности резания, М. Кроненберг для достижения максимальной производительности предлагал увеличивать скорость резания, в том числе и за счет уменьшения площади сечения срезаемого слоя, поэтому его метод назван «скоростным». Он исходил из существующего парка станков, т. е. заданной мощности, а также показал, что повышение производительности возможно при увеличении мощности привода главного движения.

Полученные немецкими учеными зависимости открывали в то время важный этап в развитии науки о резании металлов и ее практическом использовании. В частности, они обеспечивали повышение производительности за счет использования аналитических методов теории резания. Зависимости включали в себя параметры режима резания и станка, а также функцию для определения максимума производительности. Кроме того, разработанная методика позволяла анализировать результаты исследований, в том числе полученные и другими учеными.

В СССР эти работы не получили развития. Одним из основных оппонентов М. Кроненберга был С. Ф. Глебов. Признавая в целом достижения немецкой школы, он называет изложенный выше метод «методом Кроненберга», но указывает на наличие в нем существенных недостатков. Соответственно второй метод назван «методом С. Ф. Глебова».

С. Ф. Глебов называл свой метод назначения режима резания «методом наибольшей производительности» [1]. За наивыгоднейший режим принимается такой, при котором снимается наибольший объем стружки в единицу времени.

Однако, сравнивая оба метода, можно заметить, что М. Кроненберг в своей работе также использовал в качестве критерия оценки режима резания объем снимаемой стружки. Поэтому главное, что отличает метод С. Ф. Глебова – это сформулированные им два закона резания.

В соответствии с *первым законом резания* для достижения наибольшей производительности рекомендуется производить обработку с максимальной площадью сечения срезаемого слоя, в том числе за счет снижения скорости резания.

В соответствии со *вторым законом резания* при данной площади сечения срезаемого слоя следует по возможности увеличивать глубину резания за счет подачи.

Назначение режима резания ведется таким образом:

выбор максимальной глубины резания, обеспечивающей съем припуска за минимальное число проходов (желательно за один проход);

назначение подачи, исходя из величины максимально допустимой площади срезаемого слоя, определяемой по номограммам, разработанным автором;

определение скорости резания по формуле:

$$v = \frac{C_h}{S_o^u t^q R H^c (\sin \varphi)^{(u-q)},} \quad (2)$$

где u , q , c – показатели степени; C_h – коэффициент; H – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю; R – коэффициент, учитывающий технологическое влияние угла в плане φ .

Найденный таким образом режим резания назван «абсолютным режимом», исходя из предположения, что он является наиболее производительным для данной обрабатываемой детали. «Абсолютный режим» позволяет установить требования, которые следует предъявить к станку. Чем полнее удастся осуществить на станке такой режим, тем будет выше производительность обработки.

Следует обратить внимание на то, что «абсолютный режим» назначается на основе возможностей режущего инструмента применительно к конкретной обрабатываемой детали и не учитывает возможностей станка. Для его осуществления станок должен отвечать следующим требованиям:

частота вращения шпинделя должна совпадать с расчетной;

привод станка должен обеспечить совпадение подачи инструмента с расчетной;

расчетная осевая сила должна быть меньше или равна силе, допускаемой прочностью слабого звена привода подачи станка;

крутящий момент и мощность на шпинделе станка должны быть больше или равны моменту и мощности, рассчитанным по «абсолютному режиму».

Если станок не отвечает данным требованиям, необходимо скорректировать режим резания, что неизбежно приведет к потере производительности. Корректировка возможна путем снижения площади сечения срезаемого слоя, скорости резания либо одновременным изменением площади и скорости в соответствии с методом М. Кроненберга. Таким образом, С. Ф. Глебов признает метод М. Кроненберга при условии заданных параметров оборудования, которые к тому же ниже параметров, рассчитанных по «абсолютному режиму».

С. Ф. Глебов подвергает критике метод М. Кроненберга в основном именно за то, что он предполагает станок заданным, т. е. исходит от станка. В соответствии же с «методом наибольшей производительности» станок должен подбираться под параметры абсолютного режима, т. е. метод исходит от инструмента.

В данном случае критику С. Ф. Глебова нельзя признать обоснованной, поскольку на производстве разрабатывают технологию для имеющегося оборудования. Его замена производится по мере физического и морального износа. Даже появление новых инструментальных материалов с более высокими эксплуатационными свойствами вряд ли заставит предприятие заменить все оборудование, поскольку для этого потребуются огромные капиталовложения, не сопоставимые по величине со стоимостью инструмента.

Вызывает сомнение и обоснованность законов резания, поскольку они сформулированы только на основании анализа количества теплоты, отводимой от режущего лезвия резца. В зависимостях, описывающих «метод наибольшей производительности», отсутствует температура резания и связанный с ней период стойкости инструмента, не учтены также силовые и другие характеристики процесса резания и технологические возможности станка. Впоследствии Г. И. Темчин считал [5], что глубина по второму закону резания необоснованно принимается максимально возможной.

В более поздних работах [8–10] показано, что обработка с малой глубиной резания и увеличенной подачей часто оказывается более производительной. Снижение скорости резания без соответствующей корректировки других параметров не позволяет получить оптимальный режим. В «методе наибольшей производительности» отсутствует алгоритм корректировки режима резания в соответствии с ограничениями по станку.

Г. И. Темчин также был сторонником аналитических методов решения задачи технологического проектирования [5]. Он считал, что при заданном станке необходимо рассматривать все параметры заготовки, детали, инструмента и процесса резания, а также учитывать все связи и зависимости между отдельными параметрами и все ограничения. Таким образом, нужно исходить не от станка и не от инструмента, а решать задачу комплексно. Необходимо определить наиболее выгодную комбинацию параметров в их взаимосвязи, т. е. на основе совместного учета всех уравнений, выражающих ограничения и технические зависимости.

Автор показал, что при наличии ограничений (например, по мощности станка) экономичными являются стойкости, которые не совпадают со значениями, полученными при отсутствии ограничений общепринятыми способами решения задачи [1]. В ряде случаев выгоднее вести об-

работку за несколько рабочих ходов инструмента вопреки второму закону резания, по которому глубина принимается максимально возможной.

Работа Г. И. Темчина несомненно являлась весомым вкладом в развитие теории резания и создала основу для последующих исследований в области оптимизации технологических процессов аналитическими методами. Однако она не получила широкого применения на практике, поскольку приоритетными были признаны более простые и понятные табличные методы назначения параметров режима резания.

Табличные методы назначения параметров режима резания. В 1935 году в СССР была создана комиссия для объединения всех исследований в области обработки металлов резанием. В работе комиссии участвовали не только ученые (И. М. Беспрозванный, В. А. Кривоухов, Е. П. Надеинская, А. В. Панкин и др.), но и инженеры, мастера и рабочие. Было проведено по единой методике свыше 120000 экспериментов по исследованию процесса резания, установлены силовые и стойкостные зависимости для всех видов инструмента и по всем основным обрабатываемым материалам, созданы инженерные методы расчета геометрии режущей части инструмента и режимов обработки деталей. В дальнейшем множество справочных пособий по назначению и расчету режимов резания были основаны на данных, полученных в результате работы этой комиссии. Следует отметить, что в это же время в Германии также была создана комиссия по обработке металлов резанием при союзе немецких инженеров (V. D. I.) [2].

Практически во всех справочниках для расчета режима резания используется табличные методы [3, 4], отличием которых является простота применения. Параметры задаются диапазонами значений, в пределах которых должен осуществляться их выбор. Как уже отмечалось, методика основана на законах резания, сформулированных С. Ф. Глебовым. В частности, глубина резания задается максимальной.

Табличные методы имеют ряд существенных недостатков:

отсутствие четких критериев по выбору параметров в пределах диапазона значений, что не позволяет оптимизировать режим резания;

использование жесткого алгоритма решения независимо от ограничений и исходных данных. При наличии ограничения по мощности станка рекомендуется снижать скорость резания, не изменяя глубину и подачу;

отсутствие алгоритма решения, позволяющего обеспечить полную загрузку станка и инструмента.

Например, для современного режущего инструмента с целью повышения производительности обработки его стойкость должна составлять 14–20 мин и менее [7, 9]. При назначении параметров режима резания по таблицам [3] при такой стойкости эффективная мощность резания обычно значительно превышает мощность станка из-за высоких значений расчетной скорости резания. При снижении в соответствии с рекомендациями скорости резания возрастает период стойкости инструмента и он оказывается недогруженным, что ведет к снижению производительности.

Достижение максимальной производительности обработки резанием при обеспечении полной загрузки станка по мощности и использовании режущего инструмента по стойкости. Анализ работ по резанию металлов показывает, что методология назначения режима резания развивалась по двум направлениям, рассмотренным выше:

скоростное резание, основанное на модели М. Кроненберга;

резание с максимальной площадью срезаемого слоя и с наибольшей глубиной резания, основанное на модели С. Ф. Глебова.

В СССР за основу была принята вторая модель. Во всяком случае, практически во всех справочниках, изданных впоследствии, режим резания назначается исходя из возможностей инструмента и характеристик обрабатываемой детали, а затем корректируется по станку. При этом рекомендуется выбирать наибольшую глубину и снижать скорость резания в случае, если эффективная мощность резания превышает мощность станка.

Несомненно, что работы С. Ф. Глебова оказали влияние на развитие станкостроения и инструментального производства в стране. Модель не ставила целью достижение высокой скорости резания. Поэтому скорость вращения шпинделя станков, производимых в СССР, была ниже, чем

у зарубежных фирм, а инструменты, выпускаемые зарубежными фирмами, имеют серьезное преимущество по уровню допускаемой скорости резания.

В концепцию модели С. Ф. Глебова не вписываются также и методы обработки деталей, осуществляемые с большими подачами. Инициатор силового резания токарь-новатор В. А. Колесов с целью повышения производительности обработки работал с подачами до 10–15 мм/об, причем подача могла превышать глубину резания, т. е. $S_0/t > 1$ [8]. Идеи силового резания в дальнейшем не получили развития и в настоящее время на практике не используются, поскольку не соответствуют описанным выше законам резания. В то же время зарубежными фирмами разработаны высокопроизводительные режущие инструменты, позволяющие вести обработку деталей с большими подачами [9] и представляющие собой усовершенствованную конструкцию резца В. А. Колесова. Например, фирма Sandvik Coromant [9] предлагает твердосплавные пластины для токарного инструмента, работающего с подачей до 1,5 мм/об, а также для фрез, работающих с подачей 4 мм/зуб, что намного превышает традиционные подачи. Особенно эффективным является фрезерование с большой подачей при обработке карманов в сплошном материале. Несмотря на снижение глубины резания до 1,2–2 мм, при торцевом фрезеровании достигается снятие большого объема стружки (1400 см³/мин). Для удаления всего припуска применяется фрезерование с врезанием по двум или трем осям, а также прерывистое врезание и фрезерование с предварительным засверливанием. Для данных высокопроизводительных методов обработки требуется соответствующее научно-методологическое обоснование.

В работах М. Кроненберга [2] показано, что для достижения максимальной производительности обработки резанием необходимо обеспечить одновременно полную загрузку станка и полное использование режущего инструмента. В дальнейшем эти идеи поддержал Г. И. Темчин [5].

Недостатком математической модели М. Кроненберга можно считать то, что, во-первых, взяв за основной параметр площадь сечения срезаемого слоя, автор не учитывал разную степень влияния подачи и глубины резания на силу резания (мощность) и период стойкости инструмента. В то время были опубликованы работы, в которых показана необходимость рассмотрения раздельно подачи и глубины резания. Последующие исследования в области физики процесса резания дали этому убедительное подтверждение.

Во-вторых, под нагрузкой станка и режущего инструмента понимается работа с определенной площадью срезаемого слоя. К сожалению, в отечественных справочных пособиях практически отсутствуют зависимости скорости и силы резания от площади среза. Более привычными и широко используемыми являются стойкостные зависимости вида $T = C_T t^{x_T} S_0^{y_T} v^{\mu_T}$ или $v = \frac{C_v}{T^{m_T} t^{x_v} S_0^{y_v}}$ и силовые зависимости вида $P_z = C_P t^{x_P} S_0^{y_P} v^{\mu_P}$ (где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; C_T, C_v, C_P – постоянные коэффициенты; $x_T, y_T, \mu_T, x_v, y_v, x_P, y_P, \mu_P$ – показатели степени; m – показатель относительной стойкости). К тому же М. Кроненберг в своих моделях практически не использовал параметр стойкости T , который характеризует загрузку инструмента.

В связи с этим представим математическую модель, описывающую возможности полной загрузки станка по мощности и использования режущего инструмента по стойкости, а также связывающую производительность обработки с параметрами процесса резания, в виде системы уравнений

$$\begin{cases} P_z = C_P t^{x_P} S_0^{y_P} v^{\mu_P}; \\ v = \frac{C_v}{T^{m_T} t^{x_v} S_0^{y_v}}; \\ N = \frac{P_z v}{61200}; \\ \Pi = t S_0 v \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3)$$

В отличие от изложенного выше метода М. Кроненберга в данной модели подача и глубина резания представлены как независимые переменные, а под использованием режущего инструмента понимается обеспечение заданного периода стойкости.

Особенностью модели является то, что при назначении стартовых значений параметров режима резания мощность и стойкость являются не ограничивающими факторами, как, например, в табличных методах, а функциональными зависимостями, решение которых позволяет достичь максимума производительности.

Решение системы (3) может быть получено путем варьирования с определенным шагом значениями S_0 и вычислением t и v при заданных величинах N и T . Для каждого шага определяется производительность обработки, а затем – сочетание параметров режима резания, при котором $\Pi \rightarrow \max$. Пример решения для токарной обработки деталей из конструкционной стали ($\sigma_B = 750$ МПа) твердосплавным резцом Т15К6 приведен в табл. 1. Исходные параметры системы (3) следующие [3]: $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $\mu_p = -0,15$; $C_p = 3000$; $m = 0,2$; $x_v = 0,35$; $y_v = 0,15$; $C_v = 340-420$ (при $S_0 < 0,3$ $C_v = 420$; при $S_0 > 0,7$ $C_v = 340$; при $0,3 \leq S_0 \leq 0,7$ $C_v = 350$).

Из анализа полученных результатов следует, что при условиях полной загрузки станка по мощности и использования режущего инструмента по стойкости:

увеличение глубины резания, например, при $N = 10$ кВт и $T = 20$ мин от 1,67 до 6,45 мм, т. е. в 3,9 раза, сопровождается увеличением скорости резания от 102 до 241 м/мин, т. е. в 2,36 раза, уменьшением подачи от 3,2 до 0,2 мм/об, т. е. в 16 раз и снижением производительности съема стружки с 546 до 241 см³/мин, т. е. в 1,76 раза;

увеличение подачи, напротив, хотя и сопровождается снижением глубины и скорости резания, но в итоге приводит к увеличению производительности обработки.

Т а б л и ц а 1. Стартовые значения параметров режима резания при точении деталей из конструкционной стали твердосплавным резцом Т15К6

S_0 , мм/об	$N = 10$ кВт						$N = 20$ кВт					
	$T = 20$ мин			$T = 60$ мин			$T = 20$ мин			$T = 60$ мин		
	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин
0,1	10,2	258	264	12,7	201	254	22,6	229	518	28,0	178	499
0,2	6,45	241	311	7,99	187	299	14,3	214	610	17,7	166	587
0,4	4,25	213	363	5,27	166	349	9,41	189	712	11,7	147	686
0,8	2,99	175	419	3,70	136	403	6,61	156	823	8,19	121	792
1,6	2,23	134	478	2,76	104	461	4,94	119	940	6,12	92	905
3,2	1,67	102	546	2,06	80	526	3,70	91	1073	4,60	71	1034
4,0	1,52	94	570	1,88	73	549	3,10	88	1090	4,20	65	1079
5,0	1,36	86	587	1,66	67	559	2,88	77	1111	3,52	60	1059

Отсюда следует, что при назначении режима резания выгоднее увеличивать подачу, а не глубину резания для достижения наибольшей производительности, и подтверждается вывод Г. И. Темчина о некорректности второго закона резания, сформулированного С. Ф. Глебовым. Полученный результат хорошо согласуется с данными исследований по силовому резанию, т. е. резанию с большими подачами [8, 9], а также показывает, что при назначении режима резания необходимо исходить не от инструмента и не от станка в отдельности, а решать задачу комплексно.

Для сравнения рассмотрим пример назначения режима резания с максимальными глубиной резания и подачей при токарной обработке стального цилиндрического вала диаметром $D = 150$ мм и длиной $L = 200$ мм резцом из твердого сплава Т15К6 на станке с мощностью двигателя 10 кВт. Припуск составляет $h = 10$ мм.

Обработка с максимальной глубиной резания. Глубина резания принимается равной припуску $t = 10$ мм. Остальные параметры режима резания по [3]: $S_0 = 0,5$ мм/об; $v = 47,5$ м/мин; $n = 100$ мин⁻¹; $i = 1$. Машинное время составит:

$$t_m = \frac{L}{nS_0} \frac{h}{t} = 4 \text{ мин.}$$

Обработка с максимальной подачей. Принимаем подачу $S_0 = 3$ мм/об. Остальные параметры режима резания: $t = 1,67$ мм; $v = 83,5$ м/мин; $n = 177$ мин⁻¹; $i = 6$. С учетом обратных ходов

инструмента со скоростью 5 м/мин t_m составит 2,37 мин. Эффект роста производительности по машинному времени 41%.

Сравним также результаты, получаемые с помощью метода «наибольшей производительности» и модели (3), на примере обработки стального вала (твердость стали 144 НВ) резцом из быстрорежущей стали Р8 с углом в плане $\varphi = 30^\circ$. Припуск на черновую обработку составляет 14 мм.

В соответствии с методикой [1] получим, что глубина резания $t = 7$ мм, подача $S_0 = 1,42$ мм/об, а скорость резания по формуле (2) $v = 22,3$ м/мин. При данных параметрах режима резания мощность $N = 6,3$ кВт, а производительность $\Pi = tS_0v = 221,3$ см³/мин.

При тех же исходных данных решим систему (3), приняв $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $\mu_p = 0$; $C_p = 2000$; $C_v = 85$; $m = 0,125$; $x_v = 0,35$. При $S_0 \leq 0,25$ $y_v = 0,33$, при $S_0 > 0,25$ $y_v = 0,66$ [4]. Результаты приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения параметров режима резания при точении стали (144 НВ) резцом из Р8

S_0 , мм/об	$N = 6,3$ кВт					
	$T = 20$ мин			$T = 60$ мин		
	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин
0,6	7,16	40	172	8,60	33	170
1,4	6,47	23	208	7,77	19	207
3,0	5,90	14	248	7,09	12	255
4,2	5,67	12	286	6,81	10	286
5,0	5,55	10	278	6,67	9	300

Близость полученных результатов по производительности и значениям параметров режима резания наблюдается при $S_0 = 1,40$ – $1,42$ мм/об. При больших значениях S_0 производительность обработки возрастает, несмотря на снижение глубины резания. Это указывает на возможность увеличения производительности по сравнению с «абсолютным режимом», предложенным С. Ф. Глебовым.

Можно также показать, что параметры режима резания, полученные путем решения модели (3), соответствуют максимально достижимым значениям производительности обработки при заданной величине подачи (скорости или глубины резания). Для этого при заданной S_0 (например, $S_0 = 1,6$ мм/об) представим изменение глубины резания в зависимости от скорости $t = f(v)$ в соответствии с функцией $N = f(t, S_0, v)$. Аналогичным образом покажем изменение периода стойкости $T = f(v)$ в соответствии с функцией $T = f(t, S_0, v)$. Для сравнения на рисунке зависимости $t = f(v)$ и $T = f(v)$ показаны для двух значений мощности: 20 и 10 кВт. Производительность обработки также представим в виде функции от скорости резания, т. е. $\Pi = f(v)$. Производительность является возрастающей функцией, а период стойкости – убывающей функцией. При ограничении T (в данном случае $T = 20$ мин) рост Π ограничивается величиной v , соответствующей граничному значению T ($v = 119$ и 134 м/мин при $N = 20$ и 10 кВт соответственно). Значения t и v при этом соответствуют решению системы (3) (табл. 1).

Сравнение значений производительности при различных N показывает, что максимум Π достигается при заданной максимальной мощности (в данном случае $N = 20$ кВт).

Таким образом, максимальные значения производительности обработки являются координатами линии пересечения поверхностей $T = f(t, S_0, v)$ и $N = f(t, S_0, v)$. Конкретное решение можно получить при задании одного из параметров режима резания (табл. 1), учитывая, что максимум производительности достигается при назначении максимальной подачи.

Анализ табл.1 показывает, что, во-первых, снижение заданного периода стойкости режущего инструмента приводит к весьма незначительному росту производительности обработки. Например, при снижении T с 60 до 20 мин производительность возрастает всего от 403 до 419 см³/мин (при $S_0 = 0,8$ мм/об). Это можно объяснить тем, что при ограничении по мощности с увеличением скорости резания приходится снижать глубину резания. Добиться же более существенного роста производительности можно только при условии повышения качества режущего инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания. В то же время работа с меньшей площадью среза и большей скоростью является более предпочтительной в плане снижения нагрузок, действующих на станок.

Во-вторых, полученные результаты подтверждают исходное положение о том, что с увеличением мощности привода главного движения станка возрастает производительность обработки. Достигается это за счет увеличения глубины резания, поскольку скорость резания ограничена качеством режущего инструмента в соответствии с моделью (3).

В-третьих, могут показаться завышенными значения глубины резания t при малых подачах. При высокой мощности N параметры сечения срезаемого слоя превышают допустимые пределы, вплоть до величин, которые невозможно реализовать на практике. Это связано с тем, что стартовые значения параметров режима резания являются расчетными и получены при условии полной загрузки станка по мощности и инструмента по стойкости. При малых же подачах и ограниченной скорости резания t имеет большую величину. В этой связи представляет интерес моделирование влияния качества режущего инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, на глубину и скорость резания. Приняв, что период стойкости зависит от глубины резания и подачи примерно одинаково для различных твердых сплавов, качество инструмента может быть смоделировано путем изменения параметра C_v в формуле (3) (табл. 3).

Сравнение табл. 1 и 3 показывает, что увеличение C_v от 340–420 до 560 приводит к существенному снижению глубины и возрастанию скорости резания (например, при $S_0 = 0,2$ мм/об v увеличилась от 241 до 334 м/мин, а t снизилась с 6,45 до 4,87 мм). Это сопровождается также ростом производительности обработки при постоянной мощности привода главного движения. Следовательно, повышение качества режущего инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, дает возможность производить обработку деталей при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя, что является благоприятным фактором с точки зрения снижения нагрузок на приводы станка, но требует увеличения скорости (частоты вращения) шпинделя. Следует отметить, что современное станкостроение развивается именно в этом направлении.

Т а б л и ц а 3. Стартовые значения параметров режима резания при $C_v = 560$

$S_{ш}, \text{мм/об}$	$N = 10 \text{ кВт}$					
	$T = 20 \text{ мин}$			$T = 60 \text{ мин}$		
	$t, \text{мм}$	$v, \text{м/мин}$	$\Pi, \text{см}^3/\text{мин}$	$t, \text{мм}$	$v, \text{м/мин}$	$\Pi, \text{см}^3/\text{мин}$
0,2	4,87	334,7	326,0	6,04	260,1	314,2
0,6	2,17	327,5	426,4	2,7	254,4	412,1
1,4	1,45	250,1	507,6	1,79	194,5	487,4
3,0	0,68	310,3	633,0	0,92	217,4	600,1
4,2	0,49	341,9	703,6	0,66	240,0	665,4
5,0	0,41	360,9	739,8	0,55	253,8	698,0

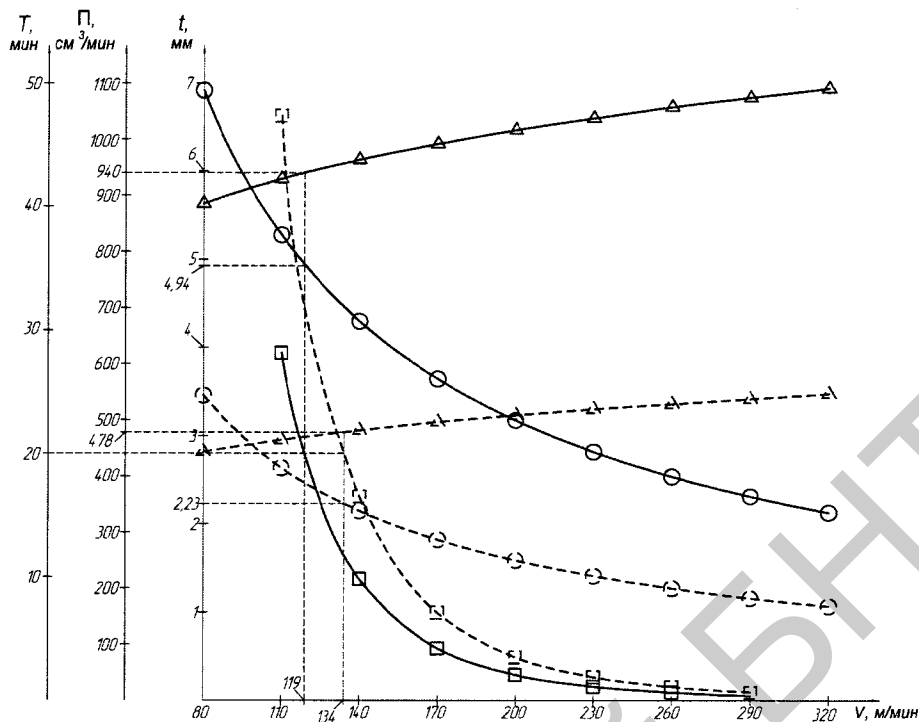
Выводы

1. Для достижения максимальной производительности обработки резанием необходимо обеспечить одновременно полную загрузку станка по мощности и полное использование режущего инструмента по стойкости. Решение математической модели, включающей уравнения эффективной мощности резания и стойкости (допускаемой скорости резания) режущего инструмента, позволяет определить соответствующие параметры режима резания. Найденные параметры соответствуют максимально достижимой производительности обработки при заданной величине подачи (скорости или глубины резания) и являются координатами линии пересечения поверхностей $T = f(t, S_0, v)$ и $N = f(t, S_0, v)$.

2. Отличием предложенного метода от известного метода М. Кроненберга является то, что подача и глубина резания представлены как независимые переменные, а под использованием режущего инструмента понимается обеспечение заданного периода стойкости.

3. При назначении параметров режима резания с учетом полного использования станка и режущего инструмента максимум производительности достигается при назначении максимальной подачи, а скорость и глубина резания определяются путем решения математической модели.

4. Снижение заданного периода стойкости режущего инструмента не приводит к заметному росту производительности обработки в связи с тем, что при ограничении по мощности резания



Изменение глубины резания t , производительности Π и периода стойкости T инструмента при изменении скорости резания ($S_0 = 1,6$ мм/об): сплошные линии – $N = 20$ кВт; штриховые линии – $N = 10$ кВт; $\circ - t = f(v)$; $\square - T = f(v)$; $\Delta - \Pi = f(v)$

с увеличением скорости резания приходится снижать глубину резания. В то же время работа с меньшей площадью среза и большей скоростью является более предпочтительной в плане снижения нагрузок, действующих на приводы станка.

5. Повышение качества режущего инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, дает возможность производить обработку деталей при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя, а также сопровождается ростом производительности обработки.

Литература

1. Г л е б о в С. Ф. Теория наиболее выгодного резания металлов. М., 1933.
2. К р о н е н б е р г М. Основы теории резания. Введение в теорию обработки металлов резанием и применение ее на практике. М., 1931.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М., 2003.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. В. М. Кованова. М., 1963.
5. Т е м ч и н Г. И. Многоинструментальные наладки. Теория и расчет. М., 1963.
6. Т а у л о р F. V. Dreharbeit und Werkzeugstähle. Berlin, 1917.
7. Г ж и р о в Р. И., С е р е б р е н и ц к и й П. П. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник. Л., 1990.
8. К о л е с о в В. А. Силовое резание металлов. Куйбышев, 1953.
9. Руководство по металлообработке. Точение – фрезерование – сверление – растачивание – оснастка: Технический справочник Sandvik Coromant. М., 2005.
10. Э р м е р С., К р о м о д и х а д ъ С. // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер. В. «Конструирование и технология машиностроения». 1981. № 4. С. 281–289.

V. I. TUROMSHA, V. T. SAFIULLIN

A METHODOLOGY FOR ASSIGNMENT OF OPTIMAL PARAMETERS OF CUTTING MODE

Summary

The analysis of methods to assign optimal parameters of cutting rates when machining workpieces in metal cutting machine-tools is made. It has been found that to get maximal cutting capabilities it is necessary to provide simultaneously the full capacity of the machine tool and the full application of the cutting tool by durability. This can be achieved by solving a mathematical model including the equations of the main motion drive power of a machine tool and the durability (acceptable cutting speed) of a cutting tool. The method suggested differs from the well-known method of M. Kronenberg in the fact that the feed and the depth of cut are independent variables and the application of a cutting tool means the provision of a given period of durability.