

УДК 621.9.06.014

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ СТАНКА И ПОЛНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

канд. техн. наук, доц. В.И. ТУРОМША
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается решение математической модели, включающей уравнения мощности привода главного движения станка и стойкости (допускаемой скорости резания) режущего инструмента, позволяющее определить параметры режима резания, обеспечивающие полную загрузку станка по мощности и полное использование инструмента по стойкости. Для достижения наибольшей производительности обработки предпочтительнее увеличивать подачу, а не глубину резания, в том числе снимать припуск за несколько рабочих ходов. При резании с большими подачами образуется стружка с обратной формой среза, что способствует увеличению допустимой скорости резания и производительности обработки при одновременном снижении глубины резания. Увеличение скорости резания за счет применения инструмента с более высокими показателями стойкости позволяет увеличить съём материала в единицу времени и снизить площадь срезаемого слоя. Увеличение производительности обработки за счет увеличения мощности привода главного движения связано с ростом площади срезаемого слоя. Мощность ограничивается качеством режущего инструмента, которое определяется допускаемой им скоростью резания. Снижение заданного периода стойкости инструмента приводит к уменьшению площади срезаемого слоя и увеличению скорости резания, но практически не влияет на производительность обработки.

Введение. Производительность любой технологической машины зависит в первую очередь от мощности двигателя, приводящего в действие рабочий орган. В металлорежущем станке рабочий орган – шпиндель приводится во вращение двигателем привода главного движения. Последний выполняет работу резания, затрачиваемую на снятие материала с заготовки. Объем материала, снятого в единицу времени, т.е. производительность обработки, определяется работой резания, произведенной за единицу времени, т.е. мощностью двигателя привода главного движения. Поэтому обеспечение максимальной загрузки станка по мощности является одним из основных условий повышения производительности обработки деталей. Особенно это актуально для современного высокопроизводительного режущего инструмента, отличающегося высокими эксплуатационными свойствами. Полное использование потенциала режущего инструмента предполагает также обеспечение заданного периода стойкости. Поэтому для достижения максимальной производительности обработки резанием необходимо обеспечить одновременно полную загрузку станка и полное использование режущего инструмента по стойкости [1, 2].

Различные методики расчета (назначения) параметров режима резания по-разному решают эту задачу.

Расчет по параметрам процесса резания. Параметрами процесса резания, влияющими на производительность обработки, являются глубина резания t (мм), подача s (мм/об), скорость резания v (м/мин) и количество рабочих ходов инструмента i . В соответствии с известной зависимостью [3] машинное время, например, при токарной обработке определяется как

$$t_m = \frac{\pi DLh}{1000} \cdot \frac{1}{t \cdot s \cdot v}, \quad (1)$$

где D – диаметр обрабатываемой детали, мм; L – длина рабочего хода инструмента, мм; h – припуск на обработку, мм.

Учитывая наличие постоянных параметров в зависимости (1), производительность обработки может быть оценена объемом материала, снятого с заготовки в единицу времени: $P = C \cdot t \cdot s \cdot v$. В данной формуле функциональные связи между параметрами режима резания, например, в виде уравнения стойкости или мощности не учитываются. Поэтому каждый сомножитель представлен как независимая переменная и в одинаковой степени влияет на производительность. Задача обеспечения загрузки станка по мощности решается путем сравнения эффективной мощности резания с мощностью двигателя привода главного движения. При таком подходе возможны два нежелательных результата:

- эффективная мощность резания меньше мощности главного привода – неизбежна потеря производительности обработки из-за неполного использования возможностей станка;
- эффективная мощность резания превышает мощность двигателя главного привода – возможна перегрузка последнего. В этом случае обычно снижают скорость резания, что также приведет к потере производительности из-за неполного использования потенциала режущего инструмента.

В целом данный метод не дает решения, обеспечивающего полной загрузки станка (по мощности) и полного использования режущего инструмента (по стойкости). Обычно он используется при назначении параметров режима резания с помощью таблиц по справочникам.

Рассмотрим далее методы расчета, которые учитывают зависимость параметров режима резания друг от друга, т.е. включают следующие функциональные зависимости [4]:

$$T = C_T \cdot t^{x_T} \cdot s^{y_T} \cdot v^{\mu_T}; \quad (2)$$

$$P_z = C_P \cdot t^{x_P} \cdot s^{y_P} \cdot v^{\mu_P}; \quad (3)$$

$$N = \frac{P_z \cdot v}{61200}, \quad (4)$$

где T – период стойкости режущего инструмента; P_z – тангенциальная составляющая силы резания; N – эффективная мощность резания; C_T, C_P – постоянные коэффициенты; $x_T, y_T, \mu_T, x_P, y_P, \mu_P$ – показатели степени.

Часто уравнение (2) преобразуют в уравнение скорости резания, допускаемой инструментом:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot s^{y_v}}, \quad (5)$$

где $m = 1/\mu_T$ – показатель относительной стойкости.

Расчет по условию полного использования режущего инструмента по стойкости. Определим влияние элементов режима резания на производительность обработки с учетом функциональной связи между ними в виде одного уравнения (2), т.е. уравнения стойкости или уравнения скорости (5). Его применение при расчете обеспечивает полное использование режущего инструмента по стойкости. Для анализа примем $x_v = 0,35$, $y_v = 0,65$ [5]. Оценим влияние глубины резания и подачи на производительность.

При постоянной подаче увеличим глубину резания в 2 раза. Тогда из (5) найдем

$$v_{2t} = \frac{C_v}{T^m (2t)^{0,35} s^{0,65}} = \frac{1}{2^{0,35}} \cdot \frac{C_v}{T^m t^{0,35} s^{0,65}} = 0,78v,$$

т.е. скорость резания снизилась на 22 %. Производительность при этом составляет

$$P_{2t} = (2t) \cdot s \cdot (0,78v) = 1,56P,$$

т.е. возросла в 1,56 раза.

Для сравнения рассчитаем изменение производительности при увеличении подачи. При постоянной глубине резания увеличим подачу в 2 раза, тогда

$$v_{2s} = \frac{C_v}{T^m t^{0,35} (2s)^{0,65}} = \frac{1}{2^{0,65}} \cdot \frac{C_v}{T^m t^{0,35} s^{0,65}} = 0,63v,$$

т.е. скорость резания снизилась на 37 %. Производительность при этом составляет

$$P_{2s} = t \cdot (2s) \cdot (0,63v) = 1,26P,$$

т.е. возросла в 1,26 раза.

На основании сравнения полученных результатов авторы [3, 6] делают вывод о том, что для обеспечения максимальной производительности необходимо в первую очередь назначить максимально возможную глубину резания, а затем подачу. Далее, задавшись периодом стойкости инструмента, следует найти допускаемую скорость резания. Этот вывод хорошо согласуется с известным методом «наибольшей производительности», автором которого является С.Ф. Глебов [6]. Метод основан на двух законах резания, в соответствии с которыми для достижения наибольшей производительности рекомендуется производить обработку с максимальной площадью сечения срезаемого слоя, в том числе за счет снижения скорости резания, а глубину резания следует по возможности увеличивать за счет подачи. Следует обратить внимание на то, что режим резания в соответствии с методом «наибольшей производительности» назначается на основе возможностей режущего инструмента применительно к конкретной обрабатываемой детали и не учитывает возможностей станка, т.е. метод исходит от инструмента.

Вызывает сомнение обоснованность второго закона резания, поскольку он сформулирован только на основании анализа количества теплоты, отводимой от режущего лезвия резца. Не учтены силовые и другие характеристики процесса резания, а также технологические возможности металлорежущего станка. Г.И. Темчин считал [1], что глубина по второму закону резания необоснованно принимается максимальной возможной.

Несомненно, что работы С.Ф. Глебова оказали влияние на развитие теории резания в советский период. Практически во всех справочниках 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.

Анализ приведенного выше примера показывает, что для того, чтобы получить $\Pi_{2t} \geq \Pi_{2s}$, необходимо выполнение условия: $x_v \leq y_v$. В реальности же при обработке многих материалов возможно, что $x_v > y_v$ [4], т.е. приведенное выше доказательство не является полностью корректным.

Расчет по условию полной загрузки станка (по мощности) и режущего инструмента (по стойкости). Определим влияние элементов режима резания на производительность обработки с учетом всех трех функциональных зависимостей (2) – (4). Использование кроме уравнения стойкости (2) или (5) уравнения мощности (4) позволит учесть возможности металлорежущего станка и обеспечить его полную загрузку по мощности, а также оценить влияние мощности главного привода станка на производительность обработки.

Решение задачи может быть получено путем варьирования с определенным шагом значениями s и вычислением t и v по уравнениям (3) – (5) при заданных значениях N и T . Для каждого шага определяется производительность обработки Π . Пример решения для токарной обработки деталей из конструкционной стали твердосплавным резцом приведен в таблице 1.

Исходные параметры системы следующие [4]:

$$x_p = 1,0; y_p = 0,75; \mu_p = 0,85; C_p = 3000; m = 0,2.$$

$$\text{При } \frac{t}{s} \leq 1 \quad x_v = 0,15, \quad y_v = 0,35; \quad \text{при } \frac{t}{s} > 1 \quad x_v = 0,35, \quad y_v = 0,15.$$

$$C_v = 340 - 420 \quad (\text{при } s < 0,3 \quad C_v = 420; \text{ при } s > 0,7 \quad C_v = 340; \text{ при } 0,3 < s < 0,7 \quad C_v = 350).$$

Таблица 1

Влияние параметров режима резания на производительность обработки при условии полной загрузки станка и использования режущего инструмента

s, мм/об	N = 10 кВт						N = 20 кВт					
	T = 14 мин			T = 60 мин			T = 14 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	9,54	280	267	12,7	201	254	21,1	249	525	28,0	178	499
0,2	6,02	261	314	7,99	187	299	13,3	232	618	17,7	166	587
0,4	3,96	232	367	5,27	166	349	8,77	205	721	11,7	147	686
0,8	2,78	190	423	3,70	136	403	6,16	169	832	8,19	121	792
1,6	2,08	145	484	2,76	104	461	4,6	129	950	6,12	92	905
3,2	1,55	111	552	2,06	80	526	3,43	99	1084	4,60	71	1034
4,0	1,41	102	576	1,88	73	549	3,13	91	1134	4,20	65	1079
5,0	1,28	94	600	1,66	67	559	2,84	83	1180	3,52	60	1059

Из анализа таблицы 1 следует, что приведенные в ней результаты существенным образом отличаются от результатов, полученных выше с использованием только одного уравнения стойкости (2) или (5). Так, если в предыдущем случае с увеличением глубины резания несколько снижается скорость резания, но в целом увеличивается производительность, то при условии максимальной загрузки станка по мощности и полного использования режущего инструмента по стойкости получаем обратную картину:

- увеличение глубины резания (например, от 1,55 до 6,02 мм, т.е. в 3,9 раза) сопровождается увеличением скорости резания (от 111 до 261 м/мин, т.е. в 2,35 раза), уменьшением подачи (от 3,2 до 0,2 мм/об, т.е. в 16 раз) и снижением производительности (от 552 до 314 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.

Отсюда следует, что в реальности выгоднее увеличивать именно подачу, а не глубину резания для достижения наибольшей производительности. Этот вывод хорошо согласуется с результатами исследований по силовому резанию – резанию с большими подачами [7], а также показывает, что при назначении режима резания нужно исходить не от инструмента и не от станка в отдельности, а решать задачу

комплексно. Необходимо установить наиболее выгодную комбинацию параметров в их взаимосвязи, на основе совместного учета всех уравнений, выражающих технические зависимости.

Резание с большими подачами сопровождается образованием стружки с обратной формой среза. Условие образования обратного среза: $t/s < \sin \varphi$ (φ – главный угол в плане) [3]. В этом случае большое значение приобретает вспомогательная режущая кромка, на долю которой приходится значительная часть работы по формированию поверхности резания, а показатели степени x_v и y_v в формуле (5) меняются местами [4, 7]. Это способствует увеличению производительности обработки, причем за счет роста скорости резания при одновременном снижении площади сечения срезаемого слоя. В таблице 2 приведены результаты расчета с учетом образования стружки с обратной формой среза (в таблице 1 – без учета). При $N = 10$ кВт и $T = 14$ мин обратный срез образуется при $s = 3,2$ мм/об, а при $N = 20$ кВт – при $s = 4,0$ мм/об. Обращает на себя внимание существенное «обратное» повышение скорости резания, возрастающее по мере увеличения подачи, и весьма значительное снижение глубины резания. Так, при $s = 5,0$ мм/об за счет образования обратного среза скорость резания возрастает почти в 2 раза, а глубина резания снижается в 1,8 раза. Это является положительным фактором с точки зрения снижения нагрузок на приводы станка.

Таблица 2

Влияние параметров режима резания на производительность обработки с учетом образования стружки с обратной формой среза

s , мм/об	$N = 10$ кВт; $T = 14$ мин			$N = 20$ кВт; $T = 14$ мин		
	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин
0,8	2,78	190	423	6,16	169	832
1,6	2,08	145	484	4,6	129	950
3,2	1,15	159	582	3,43	99	1084
4,0	0,92	169	622	2,83	102	1155
5,0	0,73	182	663	2,26	109	1234

Анализ результатов расчета. Из анализа результатов расчета, приведенных в таблице 1, следует, что максимум производительности достигается при обработке с максимальной площадью сечения срезаемого слоя $F = s \times t$ (мм²). Так, при увеличении F от 0,954 до 6,4 мм² производительность возрастает от 267 до 600 см³/мин (при $N = 10$ кВт и $T = 14$ мин).

Данный результат хорошо согласуется с первым законом резания С.Ф. Глебова, но не соответствует второму закону, поскольку в произведении $F = s \times t$ максимальное значение имеет s , а не t . И в этой связи является интересной зависимость t от s при разной мощности привода главного движения N . Так, при $s = 0,1$ мм/об и $N = 10$ кВт получим, что $t = 9,54$ мм, а при $N = 20$ кВт $t = 21,11$ мм. Если не учитывать, что подача $s = 0,1$ мм/об в большей степени соответствует полустойкой и чистой обработке, для которой производительность резания не является главным критерием, то получается, что расчет дает очень большую глубину резания, не соответствующую реальным значениям. Объяснение этому может быть следующим. В объеме материала, снятого с заготовки в единицу времени, которым оценивается производительность обработки $P = C_v \cdot t \cdot s \cdot v$, скорость резания зависит от качества режущего инструмента, т.е. ограничена его стойкостью. Поэтому для обеспечения полной загрузки станка приходится увеличивать глубину резания. В результате для станков с большой мощностью главного привода расчетная глубина резания при малых подачах может достигать очень высоких значений, которые даже невозможно реализовать на практике.

С точки зрения снижения сил резания и нагрузки на приводы станка предпочтительным является увеличение объема удаляемого материала за счет увеличения скорости резания при меньшей площади среза. Не следует также рассчитывать на увеличение производительности обработки за счет увеличения площади сечения срезаемого слоя, поскольку это приводит к увеличению сил резания. В этой связи рассмотрим влияние качества режущего инструмента (стойкости) на соотношение параметров режима резания и производительности обработки при условии максимальной загрузки станка по мощности и полного использования режущего инструмента по стойкости. Приняв, что скорость резания, допускаемая инструментом, зависит от глубины резания и подачи примерно одинаково для различных твердых сплавов, качество инструмента может быть смоделировано путем изменения параметра C_v в формуле (5). Результаты расчета при $C_v = 280$ и $C_v = 560$ иллюстрирует рисунок 1 (остальные исходные данные соответствуют данным таблицы 1).

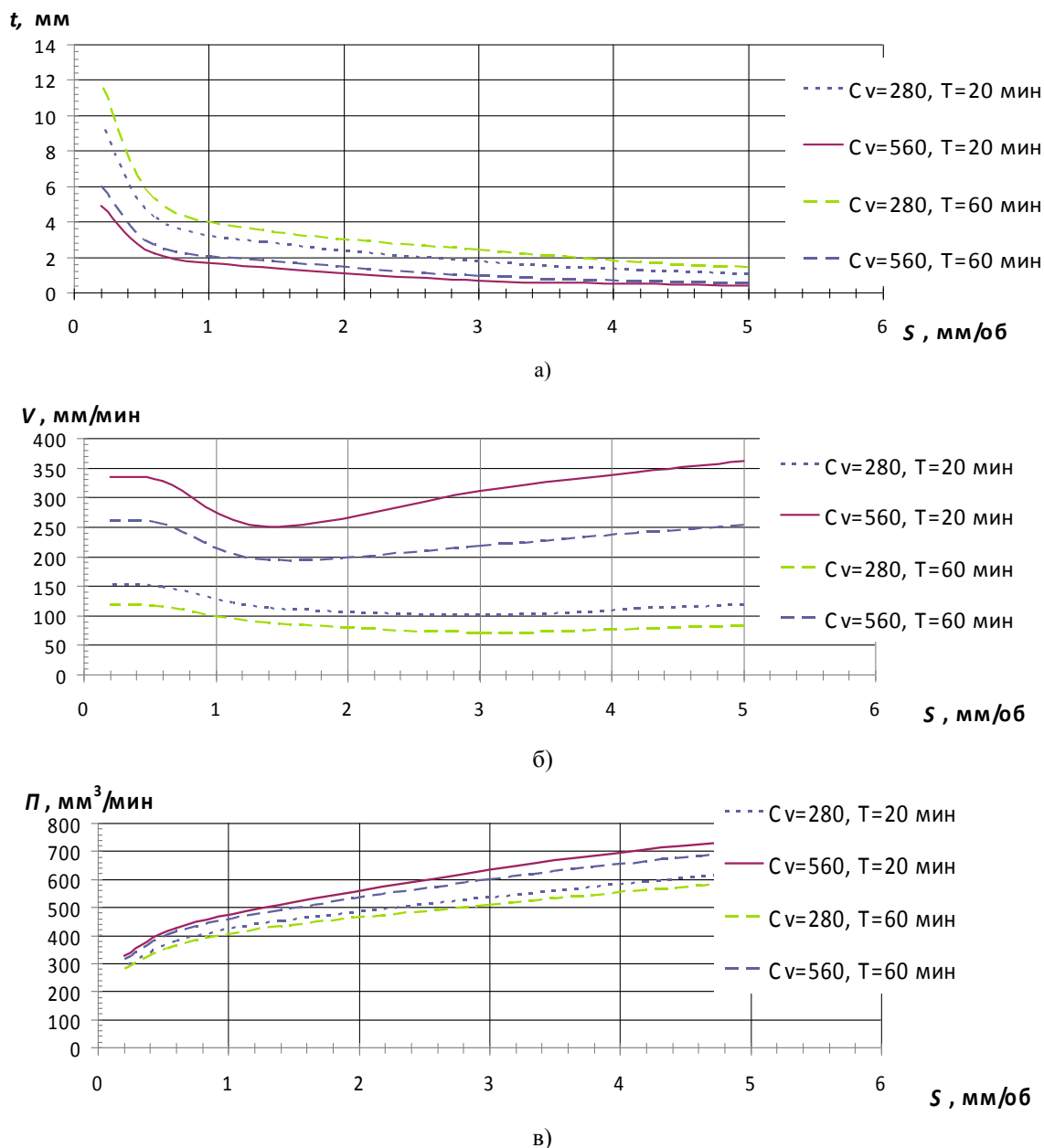


Рис. 1. Зависимость глубины резания t (а), скорости резания v (б) и производительности обработки P (в) от подачи s при изменении C_v и T

Так, увеличение скорости резания, допускаемой инструментом, в 2 раза (соответствует увеличению C_v от 280 до 560) приводит к весьма существенному (в 2...2,6 раза) снижению глубины резания (рис. 1, а). Скорость резания при этом возрастает (в 2,2...3 раза, рис. 1, б). Это дает возможность производить обработку деталей при меньшей площади сечения срезаемого слоя. С учетом роста производительности обработки (в 1,12...1,2 раза, рис. 1, в) преимущества применения качественного инструмента очевидны. Наличие на зависимости $v - s$ (рис. 1, б) точки перегиба объясняется «обратным» ростом скорости резания в связи с образованием стружки с обратной формой среза.

Результаты данных расчетов совпадают с результатами «скоростного» метода обработки, автором которого был М. Кроненберг [2].

Для достижения максимальной производительности он предлагал увеличивать скорость резания, в том числе и за счет уменьшения площади сечения срезаемого слоя. Метод М. Кроненберга был подвергнут критике со стороны профессора С.Ф. Глебова [6]. В работах последнего, наоборот, предлагается увеличивать площадь среза. В результате скорость вращения шпинделя станков, производимых в СССР, была ниже, чем у зарубежных фирм. Кроме того, справочники по нормированию соответствуют уровню развития инструмента 30-х – 70-х годов прошлого столетия и не дают возможности повысить скорость

резания при назначении режима резания. Заложенный в них табличный метод не позволяет оценить степень влияния качества режущего инструмента на производительность обработки.

Отметим, что М. Кроненберг не разделял площадь сечения срезаемого слоя на составляющие, что не позволило ему исследовать влияние параметров станка и режущего инструмента на глубину резания и подачу, а также влияние последних на производительность обработки. Он также не учитывал разную степень влияния подачи и глубины резания на силу резания (мощность) и период стойкости инструмента. Но уже в то время были опубликованы работы, в которых показана необходимость исходить раздельно из подачи и глубины резания. Дальнейшие исследования в области физики процесса резания дали этому убедительное подтверждение.

Из результатов расчетов, представленных в таблице 1 и на рисунке 1, следует, что еще одним методом уменьшения глубины резания и площади сечения срезаемого слоя, а также увеличения скорости резания является снижение заданного периода стойкости T режущего инструмента, например, с 60 до 20 мин. При этом степень уменьшения t и увеличения v ниже, чем при увеличении C_v . Поэтому направление, связанное с повышением качества режущего инструмента, является более перспективным, тем более что это сопровождается ростом производительности обработки. Производительность при снижении T практически не возрастает.

На рисунке 2 показано изменение расчетных значений глубины t и скорости резания v в зависимости от T . Увеличение v при снижении T приходится компенсировать уменьшением t , поскольку расчет выполнен при постоянной мощности резания. В результате объем снимаемого материала в единицу времени практически не изменяется.

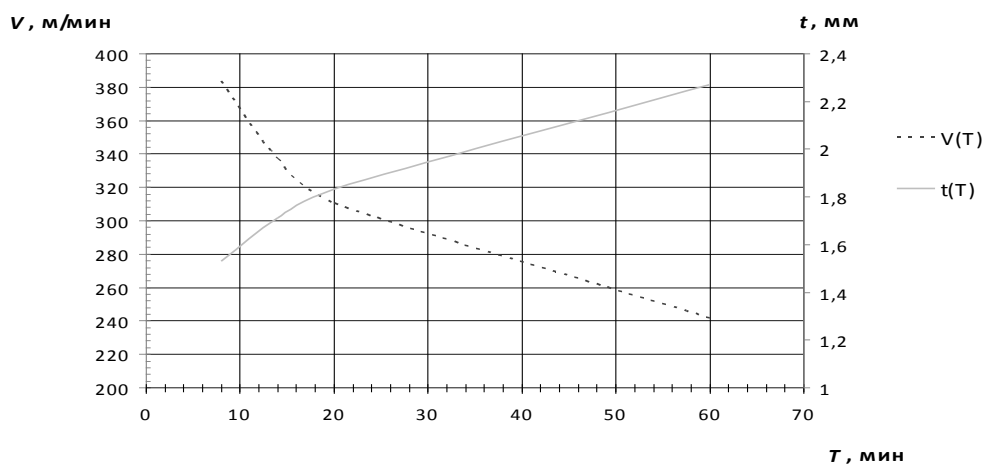


Рис. 2. Влияние заданного периода стойкости T инструмента на скорость v и глубину резания t ($s = 0,8$ мм/об; $C_v = 560$)

В ряде работ рекомендуется снижать заданный период стойкости инструмента с целью повышения производительности обработки [8]. В настоящей работе расчеты выполнены при условии полной загрузки станка по мощности и сравниваются варианты с равной эффективной мощностью резания. Если же сравнивать варианты для разных по мощности станков или при различной эффективной мощности резания, то можно получить увеличение производительности. Но достигается это не увеличением скорости резания при снижении заданного периода стойкости T , а увеличением мощности привода главного движения станка (см. табл. 1).

Полученные результаты подтверждают исходное положение о том, что с увеличением мощности привода главного движения станка возрастает производительность обработки (см. табл. 1). В то же время расчеты с использованием зависимостей (2) – (5) показывают, что мощность ограничивается качеством режущего инструмента, которое определяется допускаемой скоростью резания v в соответствии с уравнением (5). При завышенной мощности N параметры сечения срезаемого слоя превышают допустимые пределы вплоть до величин, которые невозможно реализовать на практике. Применение инструмента с более высокими эксплуатационными свойствами, которые характеризуются параметром C_v , позволяет уменьшить параметры сечения срезаемого слоя до приемлемой (номинальной) величины и одновременно увеличить скорость резания. Если в результате увеличения C_v параметры сечения уменьшаются ниже номинальных значений, появляется дополнительная возможность увеличения производительности обработки за счет применения станка с большей мощностью привода главного движения.

Взаимосвязь параметров станка и режущего инструмента может быть выражена зависимостью, получаемой из уравнений (2) – (5):

$$N = C_v^{\mu_p+1} \cdot \frac{C_p \cdot t_{ном}^{\gamma_p - \gamma_v(\mu_p+1)} \cdot s_{ном}^{\gamma_p - \gamma_v(\mu_p+1)}}{61200 \cdot T^{m(\mu_p+1)}},$$

где $t_{ном}$ и $s_{ном}$ – номинальные значения, соответствующие предельным значениям параметров сечения срезаемого слоя.

Из данной зависимости следует, что увеличение C_v в k раз позволяет увеличить мощность главного привода в k^{μ_p+1} раз. Производительность обработки при этом возрастает не только за счет увеличения N , но и за счет роста v (см. рис. 1).

Выводы. При обеспечении полной загрузки металлорежущего станка по мощности и инструмента по стойкости максимум производительности обработки деталей достигается при увеличении подачи. Скорость и глубина резания при этом снижаются и определяются путем решения математической модели, включающей уравнения эффективной мощности резания и стойкости режущего инструмента. Увеличение допускаемой инструментом скорости резания в 2 раза приводит к снижению глубины резания и площади сечения срезаемого слоя в 2...2,6 раза, росту скорости резания в 2,2...3 раза и увеличению производительности обработки в 1,12...1,2 раза. Увеличение производительности обработки за счет роста мощности привода главного движения станка имеет ограничение, связанное с качеством режущего инструмента, а именно с допускаемой им скоростью резания. Приведенная математическая зависимость, позволяет определить предельное значение мощности для выбранного режущего инструмента. Снижение заданного периода стойкости инструмента приводит к уменьшению площади срезаемого слоя и увеличению скорости резания, но практически не влияет на объем снимаемого материала в единицу времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Темчин, Г.И. Многоинструментальные наладки. Теория и расчет / Г.И. Темчин. – М.: Машгиз, 1963. – 543 с.
2. Кроненберг, М. Основы теории резания. Введение в теорию обработки металлов резанием и применение ее на практике / М. Кроненберг. – М.: ГТИ, 1931. – 182 с.
3. Рьжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А. Рьжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 1. – 912 с.; Т. 2. – 944 с.
5. Панкин, А.В. Обработка металлов резанием / А.В. Панкин. – М.: Машгиз, 1961. – 820 с.
6. Глебов, С.Ф. Теория наиболее выгодного резания металлов / С.Ф. Глебов. – М.: Госмашметиздат, 1933. – 448 с.
7. Промптов, А.И. Скоростное и силовое точение металлов / А.И. Промптов, Л.А. Хворостухин. – Иркутск: Иркутское книжное изд-во, 1957. – 57 с.
8. Гжиров, Р.И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справ. / Р.И. Гжиров, П.П. Серебряницкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 592 с.

Поступила 16.03.2009