

УДК 621.9.06.014

СКОРОСТНОЕ СИЛОВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

канд. техн. наук, доц. В.И. ТУРОМША

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложенная концепция фрезерования реализует одновременно преимущества силового и скоростного методов обработки резанием с целью достижения наибольшей производительности снятия материала. Исходя из условий максимальной загрузки станка по мощности и полного использования режущего инструмента по стойкости наибольшая производительность достигается при назначении максимально возможной подачи. Повышение производительности за счет увеличения скорости резания достигается применением режущего инструмента более высокого качества. Снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента. Повышение мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке, позволяет увеличить производительность фрезерования.

Введение. Актуальной задачей в области лезвийной обработки деталей является повышение производительности за счет сокращения машинного времени при удалении больших объемов металла [1]:

- при выборке полостей, карманов и уступов в деталях пресс-форм и штампов;
- при изготовлении деталей сложной формы в условиях единичного и мелкосерийного производства из заготовок простой формы, получаемых прокаткой;
- при обработке заготовок с большим припуском, получаемых свободной ковкой (заготовки вагонных осей) и др. методами.

Для этих целей различными фирмами (в основном зарубежными) предлагаются высокопроизводительные режущие инструменты, а также справочно-методические материалы по назначению параметров режима резания [1]. Изложенные в них методики отличаются от методик, приведенных в отечественной справочной литературе, а именно:

- рекомендуются высокие значения подач, а глубина резания не обязательно принимается максимальной. Она выбирается в соответствии с величиной подачи и может быть меньше припуска, который снимается не за один рабочий ход инструмента, а за несколько;
- снижается период стойкости режущего инструмента (для одного лезвия рекомендуется 15 мин и менее) за счет соответствующего повышения скорости резания.

Для высокопроизводительной обработки деталей металлорежущий станок по силовой и скоростной характеристикам должен соответствовать возможностям режущего инструмента, а сам инструмент – обладать высокими эксплуатационными свойствами, т.е. обеспечивать требуемую допускаемую скорость резания при заданном периоде стойкости [2].

К сожалению, теоретические основы построения высокопроизводительных технологических процессов обработки деталей в справочно-информационных изданиях фирм-производителей режущего инструмента не приводятся. Это создает сложности при использовании дорогостоящего инструмента на отечественном оборудовании, которое по своим техническим параметрам не всегда соответствует требуемому уровню. Поэтому технологи зачастую назначают режим резания не по каталогам производителей инструмента, а по известным справочникам [3]. В результате потенциал инструмента по производительности обработки используется недостаточно. Отсутствие научно обоснованных требований к уровню технических параметров станков и инструментов также не способствует и развитию отечественной станкоинструментальной промышленности в целом.

В связи с этим рассмотрим концепцию высокопроизводительного процесса обработки деталей на примере фрезерования, названного *скоростным силовым фрезерованием*. Особенность концепции в том, что она объединяет достоинства силового метода обработки, т.е. фрезерования с увеличенной подачей, и скоростного, т.е. с увеличенной скоростью резания.

Математическое обоснование концепции скоростного силового фрезерования. Один из ключевых моментов в предложенной концепции – выбор первого (начального) шага при назначении режима резания. Традиционно в отечественной справочной литературе рекомендуется вначале выбрать максимальную глубину резания. Данное положение сформулировано еще в 30-е годы прошлого столетия профессором С.Ф. Глебовым и др. [4; 5], остается неизменным до настоящего времени, хотя неоднократно подвергалось сомнению [6], и составляет основу *второго закона резания*, в соответствии с которым при заданной площади сечения срезаемого слоя следует по возможности увеличивать глубину резания t (мм) за счет подачи S_0 (мм/об) (при фрезеровании – S_z (мм/зуб)). Обоснование данного закона выполнено на основе анализа количества теплоты, отводимой от режущего лезвия инструмента, и оценки влияния тем-

пературы резания на период стойкости инструмента. Поэтому для математического доказательства закона используется уравнение стойкости (T) или скорости резания (v , м/мин), допускаемой инструментом [5; 7], которое при точении имеет вид:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} S_o^{y_v}}, \quad (1)$$

где C_v – постоянный коэффициент; x_v, y_v – показатели степени; m – показатель относительной стойкости.

Производительность (Π) обработки деталей на металлорежущих станках можно оценить объемом снимаемого материала в единицу времени. При точении $\Pi = t \cdot s \cdot v$ (t – глубина резания, мм; s – перемещение режущей кромки резца, мм, в движении подачи за 1 оборот заготовки, численно равно подаче на оборот S_o , мм/об; v – скорость резания, м/мин) [7]. Тогда при $x_v = 0,35$ и $y_v = 0,65$ [5] из формулы (1) получим, что увеличение глубины резания в 2 раза дает снижение скорости резания на 22 % и рост производительности в 1,56 раза. При постоянной глубине резания увеличение подачи в 2 раза приводит к снижению скорости резания на 37 % и росту производительности в 1,26 раза, что меньше, чем в первом случае. Отсюда делается вывод о преимуществе работы с максимальной глубиной резания [5; 7].

Однако анализ данного примера показывает, что для того, чтобы получить увеличение производительности, необходимо выполнение условия $x_v \leq y_v$. В реальности же при обработке многих материалов имеет место соотношение $x_v > y_v$ [6], т.е. приведенное выше доказательство не является полностью корректным. Но главное, что в данном решении отсутствуют силовые и другие характеристики процесса резания, а также технологические возможности станка [6]. В частности, для снятия определенного объема стружки требуется соответствующая мощность главного привода станка, а формула (1) этого не учитывает.

Производительность любой технологической машины зависит в первую очередь от мощности двигателя, приводящего в действие рабочий орган. В металлорежущем станке двигатель привода главного движения выполняет работу, 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 работу с заданным периодом стойкости.

Следовательно, для достижения максимальной производительности обработки резанием необходимо обеспечить одновременно полную загрузку станка и полное использование режущего инструмента по стойкости [2; 8]. Поэтому логичным является использование совместно с зависимостью (1) уравнения эффективной мощности резания и представление математической модели в виде системы уравнений, включив в нее в качестве целевой функции производительность обработки Π .

Применительно к операции фрезерования получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \frac{C_v D^q}{T^m t^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}}; \\ P_z = \frac{C_p t^{x_p} S_z^{y_p} B^{u_p} z}{D^{q_p} n^{w_p}}; \\ N = \frac{P_z v}{61200}; \\ n = \frac{1000v}{\pi D}; \\ \Pi = \frac{B}{\pi D} \cdot \frac{t S_z z v}{1000} \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (2)$$

где N – эффективная мощность резания; P_z – тангенциальная составляющая силы резания; T – период стойкости фрезы; B – ширина фрезерования; D и z – диаметр и число зубьев фрезы; S_z – подача на зуб; C_v, C_p – постоянные коэффициенты; $x_v, y_v, u_v, p_v, q_v, x_p, y_p, u_p, q_p, w_p$ – показатели степени; m – показатель относительной стойкости; Π – объем снимаемого металла в единицу времени (см³/мин).

При заданных ограничениях N и T решение модели (2) может быть получено путем варьирования с определенным шагом значениями S_z и вычислением t и v . Для каждого шага определяется производительность обработки Π , а затем сочетание параметров режима резания, при котором $\Pi \rightarrow \max$.

Анализ результатов решения модели (2). Пример решения в соответствии с моделью (2) для торцевого фрезерования деталей из конструкционной стали ($\sigma_s = 750$ МПа) приведен в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров режима резания и производительность снятия материала в соответствии с моделью (2) при торцевом фрезеровании деталей из конструкционной стали фрезой из твердого сплава Т15К6

S_p мм/зуб	$N = 10$ кВт						$N = 20$ кВт					
	$T = 180$ мин			$T = 90$ мин			$T = 180$ мин			$T = 90$ мин		
	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин
0,1	1,81	291	134	1,60	338	139	3,83	270	263	3,40	314	271
0,2	1,31	228	151	1,16	265	156	2,77	211	298	2,46	246	307
0,4	0,94	178	172	0,84	207	177	2,01	165	338	1,78	192	348
0,6	0,78	155	184	0,69	180	190	1,66	143	363	1,47	167	374
0,8	0,68	140	194	0,61	162	200	1,45	129	383	1,29	151	394
1,0	0,62	129	202	0,55	150	208	1,31	120	398	1,16	139	410
1,2	0,57	121	209	0,5	141	215	1,20	112	411	1,06	130	424
1,4	0,53	115	215	0,47	133	221	1,12	106	423	0,99	124	436
1,6	0,49	109	220	0,44	127	227	1,05	101	433	0,93	118	446
1,8	0,47	105	225	0,41	122	231	0,99	97	442	0,88	113	456
2,0	0,45	101	229	0,39	117	236	0,95	94	451	0,84	109	465
2,5	0,40	93	238	0,36	109	246	0,85	87	469	0,76	101	484
3,0	0,37	88	246	0,33	102	254	0,78	81	485	0,70	94	500

Материал режущей части фрезы – твердый сплав Т15К6; диаметр фрезы $D = 125$ мм; число зубьев $z = 10$; ширина фрезерования $B = D/1,25 = 100$ мм. Исходные параметры системы (3) [3]: $C_p = 8250$; $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $u_p = 1,1$; $q_p = 1,3$; $w_p = 0,2$; $C_v = 332$; $x_v = 0,1$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,2$; $u_v = 0,2$; $p_v = 0$; $m = 0,2$.

Из анализа полученных результатов следует, что при условии максимальной загрузки станка по мощности и полного использования фрезы по стойкости:

- увеличение глубины резания, например, при $N = 10$ кВт и $T = 180$ мин от 0,37 до 1,81 мм, т.е. в 4,9 раза, сопровождается увеличением скорости резания от 88 до 291 м/мин, т.е. в 3,3 раза, уменьшением подачи от 3,0 до 0,1 мм/зуб, т.е. в 30 раз, и снижением производительности от 246 до 134 см³/мин, т.е. в 1,84 раза;

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

Таким образом, максимум производительности при фрезеровании (как и при точении [9]) достигается при назначении наибольшей подачи, но не глубины резания. Это подтверждает вывод ряда исследователей (Г.И. Темчина [6] и др.), занимавшихся моделированием процессов резания, о том, что законы, сформулированные С.Ф. Глебовым, недостаточно обоснованы.

Полученный вывод хорошо также согласуется с результатами исследований по силовому резанию, т.е. резанию с большими подачами.

Силовое резание. Инициатором силового резания был токарь-новатор В.А. Колесов [10]. С целью повышения производительности обработки он работал с подачами до 10...15 мм/об при точении. Идеи силового резания в дальнейшем получили развитие в ряде исследований [11], в том числе и при фрезеровании, но широкого распространения в практике не получили, поскольку не вписывались в рамки концепции, сформулированной С.Ф. Глебовым. В настоящее время для обработки деталей с большими подачами применяются в основном режущие инструменты, производимые зарубежными фирмами [1] и фактически представляющие собой усовершенствованную конструкцию реза В.А. Колесова.

Таким образом, увеличение подачи является общим в концепциях силового и скоростного силового резания. Отличие же их в том, что последняя устанавливает взаимосвязь скорости, глубины резания и подачи через систему уравнений модели (2). Глубина резания при этом может быть меньше припуска, т.е. снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента. Во-вторых, данная концепция решает задачу повышения производительности (объема снимаемого в единицу времени материала) также и за счет увеличения скорости резания (см. ниже), т.е. в ней объединены основные достоинства как силового, так и скоростного резания.

Табличные же методы назначения параметров режима резания, изложенные в справочниках [3; 5 и др.], реализуют в основном концепцию глубинного резания, поскольку рекомендуют назначение максимальной глубины резания.

Скоростное резание. Одним из основоположников метода скоростного резания был немецкий ученый М. Кроненберг [12]. Для достижения максимальной производительности он предлагал увеличивать скорость резания, в том числе и за счет уменьшения площади сечения срезаемого слоя, поэтому метод назван «скоростным». Взяв за основной параметр площадь сечения срезаемого слоя, автор не учитывал разную степень влияния подачи и глубины резания на силу резания (мощность) и допускаемую скорость резания. Под нагрузкой станка и режущего инструмента М. Кроненберг понимал работу с определенной площадью срезаемого слоя. В отечественных справочных пособиях практически отсутствуют зависимости скорости и силы резания от площади среза. Более привычными и широко используемыми являются стойкостные и силовые зависимости, приведенные в модели (2).

Отличительной особенностью изложенной ниже концепции скоростного силового резания является то, что для достижения наибольшей производительности обработки необходимо обеспечить полную загрузку станка по мощности и использование режущего инструмента по стойкости, подача и глубина резания в модели (2) представлены как независимые переменные, а под использованием режущего инструмента понимается обеспечение заданного периода стойкости T .

Увеличение скорости резания может быть достигнуто двумя основными методами [7]:

- за счет увеличения скорости, допускаемой инструментом при заданном периоде стойкости T , т.е. путем повышения его качества (улучшения инструментального материала и его структуры, применения износостойких покрытий, совершенствования конструкции и геометрии инструмента и т.д.);

- за счет снижения периода стойкости T режущего инструмента.

Моделирование влияния допускаемой инструментом скорости резания на производительность обработки и соотношение параметров режима резания выполнялось путем изменения параметра C_v , поскольку именно C_v в модели (2) характеризует качество инструмента [7; 9; 12]. Рост C_v соответствует увеличению допускаемой инструментом скорости резания при том же значении заданного периода стойкости T .

Один из методов повышения эксплуатационных свойств режущих инструментов – применение износостойких покрытий (однослойных и многослойных). Коэффициент k [13] повышения допускаемой скорости резания зависит от марки покрытия и, по сути, является поправочным коэффициентом для C_v в формуле допускаемой скорости резания (значения коэффициента k приведены в таблице 2), т.е.

$$v = \frac{k C_v D^q}{T^{m_1} t^x S_z^{y_1} B^{h_1} z^{p_1}} \quad (3)$$

Таблица 2

Коэффициент k повышения скорости резания для твердых сплавов при применении покрытий

Вид покрытия	Коэффициент k
Без покрытия	1,00
TiN	1,15
Ni – P + TiN	1,20
TiC	1,25
TiN + Al ₂ O ₃ + Ti(C, N)	1,30
Ni – P + TiC	1,45
Комбинированные покрытия	1,55
Ni – P + Ti(C, N)	1,60
Ni – P + комбинированные покрытия	1,75

Результаты расчета при $N = 10$ кВт, $S_z = 0,8$ мм/зуб и $T = 90$ мин представлены в виде графиков на рисунке 1. Увеличение C_v от 300 до 450 позволяет увеличить скорость резания в 1,6 раза, при одновременном снижении глубины резания (и площади сечения срезаемого слоя) в 1,4 раза. Благодаря тому, что возрастание скорости резания происходит в большей степени, чем снижение глубины, объем снимаемого в единицу времени материала увеличивается.

В результате в дополнение к концепции силового резания повышение производительности обеспечивается также и за счет роста скорости резания в соответствии с концепцией скоростного резания. С точки зрения снижения сил резания и нагрузок на приводы станка увеличение объема удаляемого материала при меньшей площади среза является предпочтительным.

Наиболее эффективный метод повышения скорости резания, допускаемой инструментом, – это использование современных твердых сплавов. Например, при фрезеровании деталей из конструкционной легированной стали (код стали 01.1 по Sandvik Coromant, группа обрабатываемости по ISO – P), являющейся аналогом стали 45, применяются фрезы с ромбической пластиной твердого сплава GC4020

(«Sandvik Coromant») с трехслойным CVD покрытием $\text{TiCN} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$ [1] (рис. 2). Данный твердый сплав обладает более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению со сплавом T15K6.

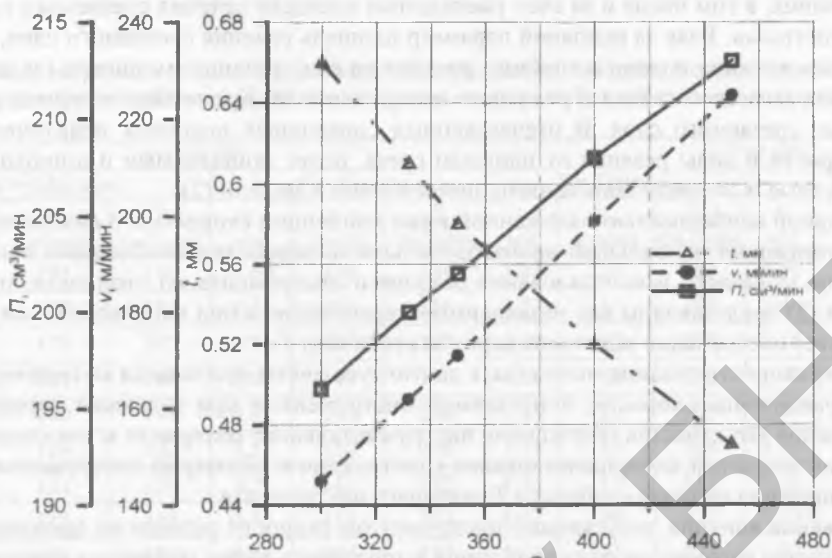


Рис. 1. Зависимость v , P и t от коэффициента C_v при полной загрузке станка по мощности ($N = 10$ кВт) и фрезы по стойкости ($T = 90$ мин) для твердого сплава T15K6 при $S_z = 0,8$ мм/зуб



Рис. 2. Пластина R245-12 T3 M-PL из сплава GC4020 (а) с износостойким CVD покрытием $\text{TiCN} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$ (б) [1]

Параметры модели (2) для сплава GC4020 следующие: $C_v = 510$; $x_v = 0,1$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,2$; $u_v = 0,2$; $p_v = 0$; $m = 0,2$; $C_P = 8250$; $x_P = 1,0$; $y_P = 0,75$; $u_P = 1,1$; $q_P = 1,3$; $w_P = 0,2$.

Решение модели (2) для твердых сплавов T15K6 и GC4020 приведено в таблице 3 при $D = 125$ мм; $z = 10$; $B = 100$ мм; $N = 20$ кВт; $T = 60$ мин.

Таблица 3

Значения параметров режима резания и производительность снятия материала в соответствии с моделью (2) при торцевом фрезеровании деталей из конструкционной стали фрезами из твердых сплавов T15K6 и GC4020

S_z , мм/зуб	Марка твердого сплава					
	T15K6			GC4020		
	t , мм	v , м/мин	P , см³/мин	t , мм	v , м/мин	P , см³/мин
0,05	4,38	438	244	3,02	698	268
0,10	3,17	343	276	2,18	546	303
0,20	2,29	268	313	1,58	428	344
0,30	1,90	232	337	1,31	371	369
0,40	1,66	210	354	1,14	335	389
0,50	1,49	194	369	1,03	309	405
0,60	1,37	182	381	0,94	290	418
0,80	1,20	164	401	0,83	262	441
1,00	1,08	152	418	0,74	242	458

Полученные результаты также подтверждают положение о том, что в соответствии с концепцией скоростного силового фрезерования, возрастание скорости резания и производительности обработки при одновременном снижении глубины резания (площади срезаемого слоя) достигается за счет увеличения допускаемой инструментом скорости в соответствии с увеличением параметра C_v в модели (2).

Поскольку расчет производительности фрезерования в рассмотренных примерах (рис. 1, табл. 1) выполнен при постоянной мощности, то повышение Π с ростом C_v на первый взгляд кажется незначительным. Ниже будет показано, что основной резерв увеличения производительности связан с возможностью увеличения предельной мощности главного привода станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке. Такая возможность появляется благодаря уменьшению глубины t при увеличении скорости резания v (см. табл. 1 и табл. 3).

Влияние мощности привода главного движения станка на производительность фрезерования. Приведенные в таблице 1 результаты показывают, что увеличение мощности двигателя привода главного движения станка приводит к увеличению объема снимаемой стружки в единицу времени. Но обращает на себя внимание тот факт, что для конкретного инструментального материала (материала фрезы) рост производительности Π при увеличении N происходит главным образом за счет увеличения глубины резания t , поскольку скорость резания ограничена режущим инструментом в соответствии с уравнением $v = f(T)$ модели (2). В результате возможности увеличения мощности главного привода станка ограничены параметрами качества режущего инструмента. При завышенной мощности расчетная величина t может превысить рекомендуемые для практического применения пределы [2; 14], т.е. возрасти до величин, которые невозможно реализовать на практике.

В то же время из приведенных выше результатов моделирования следует, что с повышением эмпирического коэффициента C_v в формуле скорости (2) происходит снижение t . Это в свою очередь открывает возможности для повышения мощности привода станка. Используя модель (2), выразим связь мощности N с параметром C_v , решив для этого систему уравнений относительно N :

$$N = \frac{C_p C_v^{1-w_p} \cdot t_{ном}^{sp+q_p(w_p-1)} \cdot S_{зном}^{y_p+y_p(w_p-1)} \cdot D^{u_p+w_p(1+u_p-q_p)-q_p+q_p-u_p} \cdot z^{1+p_p(w_p-1)} \cdot T^{m_p(w_p-1)} \cdot \pi^{m_p} \cdot 1,25^{u_p(1-w_p)-u_p}}{1020 \cdot 60 \cdot 1000^{w_p}}, \quad (4)$$

где $t_{ном}$ и $S_{зном}$ – номинальные (расчетные) значения глубины резания и подачи на зуб, соответствующие предельным значениям параметров сечения срезаемого слоя при черновом фрезеровании.

Формула (4) позволяет определить предельное значение мощности главного привода фрезерного станка для выбранного инструмента (для заданной величины C_v). Рекомендуемые [14] величины t и S_z для черновой обработки приведены в таблице 4 в виде некоторого диапазона значений.

Таблица 4

Подачи при черновом фрезеровании твердосплавными торцовыми фрезами

Марка твердого сплава	Обрабатываемый материал		Главный угол в плане ϕ , °			
			60	45	30	15
	наименование	механические свойства	Глубина резания t , мм			
			1...12	1...8	1...5	1...3
			Подача на один зуб фрезы S_z , мм/зуб			
Т5К6	Сталь	$\sigma_s \leq 600$ МПа	0,24...0,35	0,28...0,42	0,40...0,60	0,70...1,10
		$\sigma_s = 610 - 800$ МПа	0,16...0,24	0,19...0,28	0,28...0,40	0,54...0,80
		$\sigma_s = 810 - 1000$ МПа	0,12...0,18	0,15...0,22	0,21...0,32	0,38...0,58
		$\sigma_s = 1010 - 1200$ МПа	0,09...0,14	0,12...0,18	0,17...0,25	0,32...0,48
Т15К6		$\sigma_s \leq 600$ МПа	0,15...0,23	0,18...0,27	0,25...0,38	0,48...0,72
		$\sigma_s = 610 - 800$ МПа	0,12...0,18	0,15...0,22	0,18...0,26	0,32...0,48
		$\sigma_s = 810 - 1000$ МПа	0,10...0,13	0,12...0,16	0,15...0,22	0,25...0,38
		$\sigma_s = 1010 - 1200$ МПа	0,07...0,10	0,08...0,12	0,12...0,17	0,22...0,38
BK8	Чугун	$HB \leq 180$	0,46...0,70	0,52...0,80	0,70...1,2	1,20-2,20
		$HB = 181 - 200$	0,42...0,65	0,50...0,75	0,65...1,10	1,20...2,00
		$HB = 201 - 220$	0,36...0,60	0,45...0,70	0,60...1,00	1,00...1,80
		$HB = 225 - 240$	0,30...0,48	0,38...0,60	0,55...0,85	0,90...1,50
BK6		$HB \leq 180$	0,30...0,46	0,36...0,58	0,52...0,80	0,90...1,50
		$HB = 181 - 200$	0,28...0,42	0,34...0,53	0,45...0,75	0,80...1,30
		$HB = 201 - 220$	0,24...0,38	0,30...0,48	0,40...0,70	0,30...1,10
		$HB = 225 - 240$	0,20...0,32	0,27...0,42	0,35...0,55	0,55...0,90

На рисунке 3 приведены значения параметров режима резания и производительности снятия материала для фрез, оснащенных пластинами твердого сплава T15K6 и GC4020 с покрытием TiCN – Al₂O₃ – TiN. При $N = 20$ кВт в диапазоне подач $S_z = 0,1 \dots 1,0$ мм/зуб расчетная глубина резания снизилась для GC4020 по сравнению с T15K6 от 3,17...1,08 до 2,18...0,74 мм (рис. 3, а). Поэтому для твердого сплава GC4020 мощность привода главного движения может быть увеличена до 29,0 кВт. Глубина резания в этом случае возрастает до значений 3,27...1,11 мм, что соответствует параметрам сечения срезаемого слоя для T15K6.

Вследствие увеличения C_v до величины $C_v = 510$ для сплава GC4020 скорость резания возрастает от 343...152 до 525...233 м/мин (рис. 3, б). В результате производительность обработки увеличивается от 276...418 до 436...659 см³/мин, т.е. в 1,6 раза (рис. 3, в).

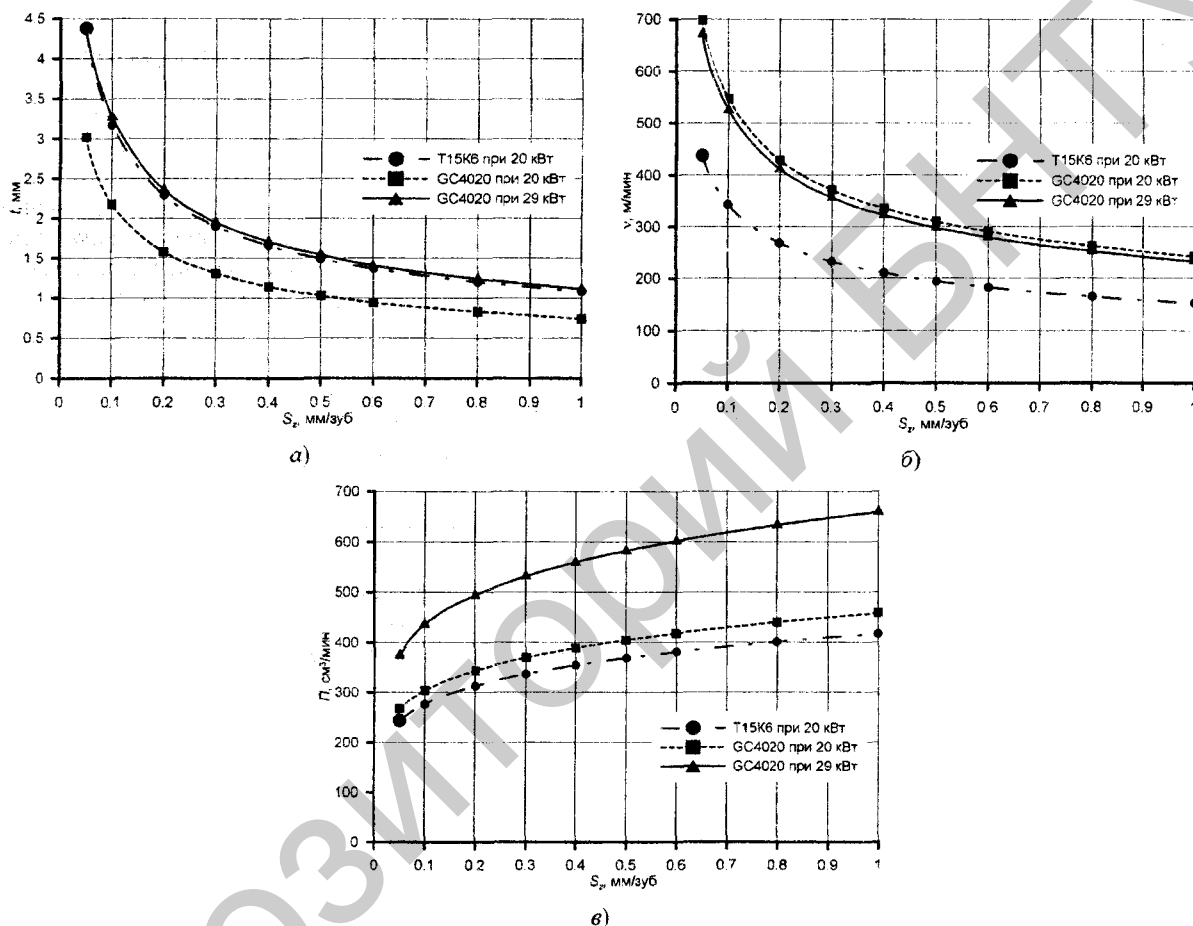


Рис. 3. Расчетные значения t (а), v (б), и P (в) для твердых сплавов T15K6 и GC4020 при мощности резания 20 и 29 кВт

Таким образом, в соответствии с концепцией скоростного силового резания увеличение допускаемой инструментом скорости резания (увеличение C_v) при использовании более качественного инструмента, сопровождающееся снижением глубины резания, позволяет увеличить производительность обработки за счет повышения мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке.

Влияние стойкости T на производительность. Увеличение скорости резания может быть достигнуто также путем снижения заданного периода стойкости T режущего инструмента. Анализ результатов расчета, приведенных в таблице 1, показывает, что рост скорости при снижении T приходится компенсировать уменьшением t для обеспечения полной загрузки станка по мощности. В результате объем снимаемого материала в единицу времени практически не изменяется. В то же время сьем материала при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя является предпочтительным с точки зрения снижения сил резания и нагрузок на приводы металлорежущего станка. В этом заключается положительный результат от снижения T с позиции концепции скоростного силового резания. Кроме того, снижение глубины резания при уменьшении T также является резервом повышения мощности главного привода станка и производительности обработки в соответствии с изложенной выше концепцией.

Практическая реализация концепции скоростного силового фрезерования. Выбор величины подачи при скоростном силовом резании определяется конструкцией и геометрическими параметрами режущего инструмента, а также требованиями к качеству обработанной поверхности.

В последнее время в технической литературе появляются примеры технологий, в большой степени соответствующие концепции скоростного силового резания. Например, фирма Sandvik Coromant [1] предлагает твердосплавные пластины 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 (рис. 4).

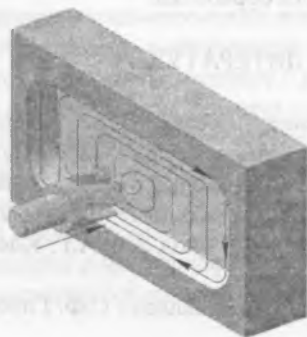


Рис. 4. Высокопроизводительное фрезерование с большой подачей кармана в сплошном материале с врезанием по трем осям [1]

Несмотря на снижение глубины резания до 1,2...2 мм при торцевом фрезеровании достигается снятие очень 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.

Выводы. Основные положения концепции скоростного силового фрезерования могут быть сформулированы следующим образом:

1) *скоростное силовое фрезерование* – это метод обработки деталей, при котором одновременно используются преимущества *силового и скоростного методов* с целью достижения наибольшей производительности, характеризуемой объемом удаляемого материала в единицу времени;

2) в соответствии с предлагаемой концепцией связь между параметрами режима резания определяется математической моделью, включающей уравнения: эффективной мощности резания:

$$N = \frac{C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z v}{61200 \cdot D^{q_p} \cdot n^{w_p}}$$

и допускаемой режущим инструментом скорости резания:

$$v = \frac{k \cdot C_v \cdot D^{q_v}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}}$$

а также уравнение целевой функции в виде производительности обработки:

$$\Pi = \frac{B}{\pi D} \cdot \frac{t \cdot S_z \cdot z v}{1000};$$

3) наибольшая производительность фрезерования достигается при максимальной загрузке станка по мощности и полном использовании фрезы по стойкости, а также при назначении *максимально возможной подачи*;

4) данная концепция решает и задачу повышения производительности (объема снимаемого в единицу времени материала) *за счет увеличения скорости резания*. Это достигается применением режущего инструмента более высокого качества, характеризуемого в предложенной математической модели параметром C_v . Повышение C_v , кроме того, дает возможность производить обработку деталей при меньшей глубине резания и площади сечения срезаемого слоя, что является благоприятным фактором с точки зрения снижения нагрузок на приводы станка. Глубина резания при этом может быть меньше припуска, т.е. снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента;

5) увеличение скорости резания при снижении заданного периода стойкости T режущего инструмента приходится компенсировать уменьшением глубины резания t для обеспечения полной загрузки

станка по мощности. В результате объем снимаемого материала в единицу времени практически не изменяется. В то же время съем материала при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя является предпочтительным;

б) в соответствии с концепцией скоростного силового резания увеличение параметра C_v , сопровождающееся снижением глубины резания, позволяет увеличить производительность обработки за счет повышения мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке.

Снижение глубины резания при уменьшении T также является резервом повышения мощности главного привода станка и производительности обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по металлообработке. Точение – фрезерование – сверление – растачивание – оснастка: техн. справочник Sandvik Coromant. – М.: ОАО «Сандвик – МКТС», 2005. – 553 с.
2. Туромша, В.И. Взаимосвязь параметров металлорежущего станка и инструмента / В.И. Туромша // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 23 – 32.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
4. Глебов, С.Ф. Теория наивыгоднейшего резания металлов / С.Ф. Глебов. – М.: Госмашметиздат, 1933. – 448 с.
5. Панкин, А.В. Обработка металлов резанием / А.В. Панкин. – М.: Машгиз, 1961. – 820 с.
6. Темчин, Г.И. Многоинструментные наладки. Теория и расчет / Г.И. Темчин. – М.: Машгиз, 1963. – 543 с.
7. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с.
8. Туромша, В.И. Обеспечение максимальной загрузки станка и полного использования режущего инструмента / В.И. Туромша // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 160 – 166.
9. Туромша, В.И. Концепция скоростного силового резания / В.И. Туромша // Вестник Белорусско-российского ун-та. Сер. Машиностроение. – 2010. – № 2(27). – С. 101 – 112.
10. Колесов, В.А. Силовое резание металлов / В.А. Колесов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1953. – 78 с.
11. Промптов, А.И. Скоростное и силовое точение металлов / А.И. Промптов, Л.А. Хворостухин. – Иркутск: Иркутское книжное издательство, 1957. – 57 с.
12. Кроненберг, М. Основы теории резания. Введение в теорию обработки металлов резанием и применение ее на практике / М. Кроненберг. – М.: ГТИ, 1931. – 182 с.
13. Инструментальные материалы: учеб. пособие / Г.А. Воробьева [и др.]. – СПб.: Политехника, 2005. – 268 с.
14. Справочник металлиста: в 5 т. / редкол.: Н. Ачеркан (гл. ред.) [и др.]. – М.: Машгиз, 1957 – 1959. – Т. 4; Е. Анненкова [и др.]; под ред. А.Н. Малова. – 1959. – 779 с.

Поступила 13.10.2011

HIGH SPEED POWER MILLING

V. TUROMSHA

The proposed concept of milling realizes the advantages of both high speed and power cutting to get the largest stock removal capacity. Proceeding from the conditions of the maximum capacity of the machine tool and the full application of the cutting tool by durability, the maximum capacity is achieved when setting the maximum possible feed. The increase in the capacity by raising the cutting speed is achieved by using the cutting tool of a higher quality. Stock removal is carried out in several cutting passes of a tool. Increasing the main motion drive power of a machine tool to the level when the cross-section parameters of the layer being removed grow to the recommended values in roughing permits the milling capacity to be increased.