

ПРИВОД ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Марголит Р.Б., Липатов С.И. (РИ(ф)МГОУ, ООО РСЗ, г. Рязань, Россия)

Main drive design issues for CNC gear milling machines are being treated in the paper. Drive requirements: adjustable speed, high torques in the working speed range, high production cutting with gear milling hobs made of advanced cutting materials.

Освоение производства зубофрезерных станков с ЧПУ является весьма актуальной задачей. Зубофрезерование длительное время оставалось одним из немногих видов механообработки, которое не претерпевало существенных изменений в сторону повышения производительности. Сдерживающими факторами являлись отсутствие существенного прогресса в улучшении режущих способностей червячных фрез и сохранение традиционных решений конструкции зубофрезерных станков [1].

В последние годы обстановка существенно изменилась. Появились высокоскоростные червячные фрезы из новых материалов: порошковых быстрорежущих стальей со сверхтвердыми покрытиями и твердых сплавов. Скорости резания при работе по стали быстрорежущими фрезами могут достигать 150 м/мин взамен традиционных 25 – 50 м/мин [2], а высокая режущая способность твердых сплавов позволяет поставить на повестку дня замену закаленных венцов зубофрезерованием.

Цели и задачи данной работы заключаются в создании одного из важнейших узлов – привода главного движения в зуборезных станках с ЧПУ. Именно такие станки благодаря высокой точности, бесступенчатым регулируемым приводам главного движения и подач смогут удовлетворить требованиям работы в новых условиях. Одновременно, освоение их производства поставило перед изготовителями станков ряд задач, ответ на которые опыт эксплуатации ранее выпускемых станков дать не мог.

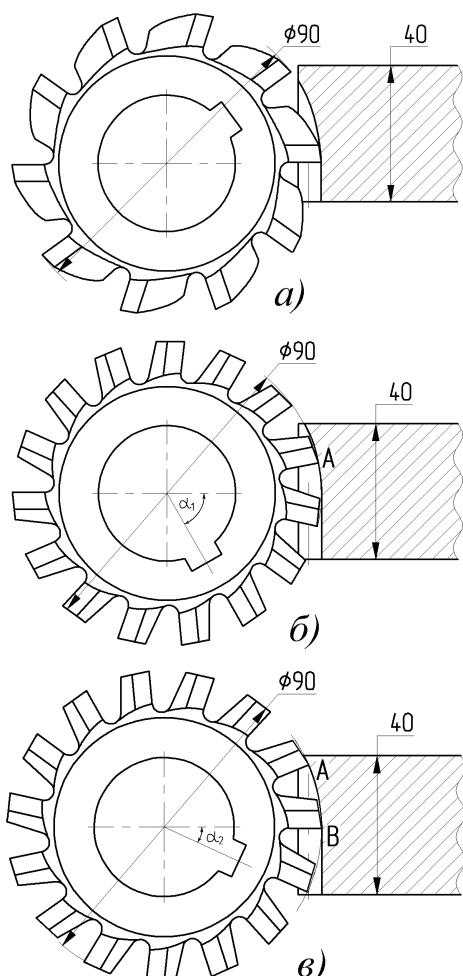


Рис. 1. Контакт фрезы с заготовкой в проекции 1

Анализ характеристик традиционных зубофрезерных станков показывает, что станки подразделяют на четыре группы I – IV в зависимости от размеров обрабатываемых деталей и мощности приводов главного движения, в которых используют асинхронные двигатели, мощность которых не превышает соответственно для первых трех групп 3, 4, 9 и превышает 10 кВт для станков группы IV [3],[4]. Верхний предел частот вращения шпинделей находится в пределах 200-600 об/мин, большие значения частот вращения используют обычно при обработке цветных металлов и легких сплавов. В конструкции главного привода используют массивный маховик на шпинделе для сглаживания неравномерности усилий резания.

Необходимо получить ответ, какими силовыми и скоростными характеристиками должны обладать приводы главного движения зубофрезерных станков с ЧПУ и какими техническими средствами такие приводы можно реализовать. Маховик из конструкции привода желательно исключить, обеспечив плавность работы иными путями.

С целью решения поставленных задач авторами проанализирован процесс зубофрезерования, определены источники и характер цикличности нагрузки, а затем на основе анализа предложены кинематика и конструкция главного привода зубофрезерного станка.

Поскольку попутное зубофрезерование, в отличие от встречного, более благоприятно с точки зрения нагрузки на главный привод и режущий инструмент, все исследования, включая практическую проверку, выполнялись для условий попутного фрезерования.

Нагрузка на главный привод пропорциональна суммарной длине всех режущих кромок фрезы, находящихся в контакте с заготовкой. В процессе обработки эта длина непрерывно изменяется, что приводит к циклическому изменению величины нагрузки. Характер изменения длины работающих режущих кромок фрезы можно наглядно наблюдать, рассматривая место контакта фрезы с заготовкой в двух взаимно перпендикулярных проекциях, которые обозначим цифрами 1 и 2.

Проекция 1. Если смотреть на обработку с торца червячной фрезы (рис.1), то можно увидеть, как каждый ряд зубьев фрезы входит в работу и выходит из нее. В зависимости от числа рядов зубьев возможны ситуации *a)*, *b)* и *v)*:

- *a)* если число рядов сравнительно невелико, то последующий ряд зубьев входит в обработку в то время, когда предыдущий ряд уже вышел из работы и нагрузка упала до значений холостого хода главного привода;

- *b)* и *v)* если увеличивать число рядов, то большее число рядов зубьев А и В будет работать одновременно, а перерывы в работе будут отсутствовать. «Пики нагрузки» накладываются друг на друга во времени.

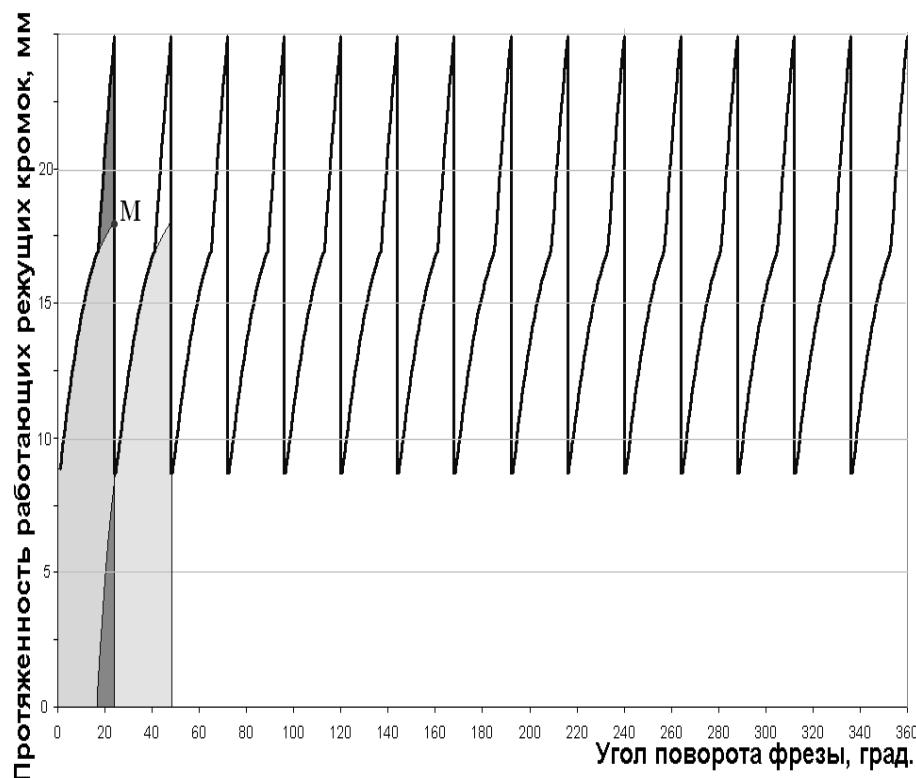


Рис. 2. Изменение суммарной длины работающих режущих кромок за один оборот фрезы от действия фактора 1

Назовем возникновение описанной неравномерности длины одновременно работающих режущих кромок действием фактора 1, отражающим вход в работу-выход из работы зубьев фрезы.

В этой проекции, начиная с момента касания заготовки зубьями фрезы, суммарная длина работающей режущей кромки стремительно возрастает по логарифмическому закону (рис.2).

После достижения максимального значения она

резко уменьшается в момент выхода ряда зубьев из обработки. Форма каждого «пика нагрузки» определяется двумя его сторонами – нелинейной левой и отвесной правой. Контакт фрезы с заготовкой в проекции 2 (вид с торца заготовки) показан на рисунке 3.

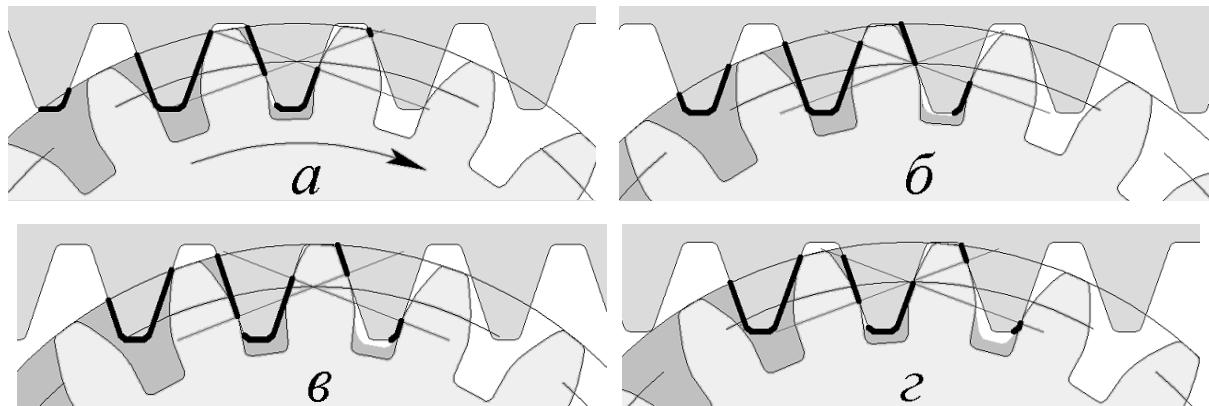


Рис. 3. Контакт фрезы (сверху) с заготовкой (снизу) в проекции 2 в четырех угловых положениях: *a, б, в, г*

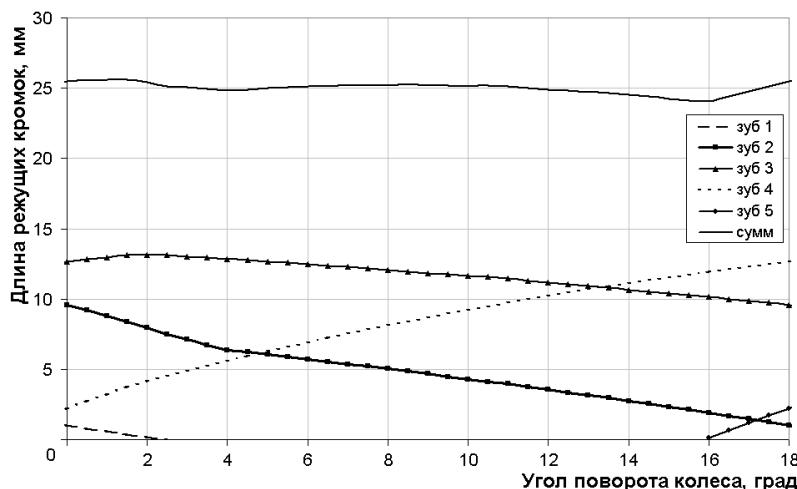


Рис. 4. Изменение длины режущих кромок от действия фактора 2

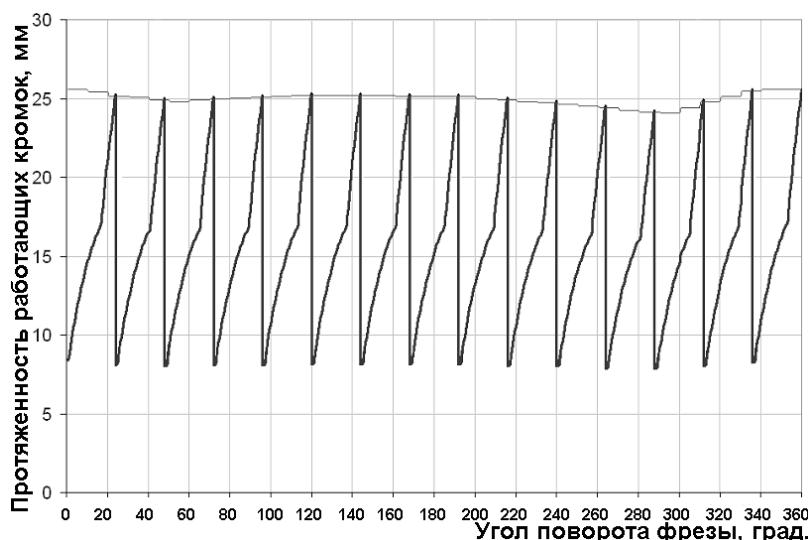


Рис. 5. Изменение суммарных нагрузок от действия обоих факторов

В проекции 2 с торца обрабатываемой заготовки (рис.3), также можно наблюдать изменение длины режущих кромок у каждого ряда зубьев фрезы (рис.4).

Величины длин в проекциях 1 и 2 были просуммированы (рис.5). Доминирующее влияние оказывает фактор 1 входа-выхода зубьев фрезы над фактором 2 входа-выхода зубьев заготовки.

Неравномерность нагрузки весьма существенна, и максимальные значения превышают минимальные не менее чем в три раза.

Выполненный анализ изменения нагрузки при резании позволил перейти к проектированию главного привода зубофрезерного станка с ЧПУ. Рассмотрены характеристики ряда частотно-регулируемых приводов отечественного и зарубежного производства, кото-

рые могут быть использованы в зубофрезерном станке с ЧПУ.

Одной из привлекательных особенностей таких приводов является возможность электродвигателей работать в нормальном режиме S1 и в режимах кратковременной перегрузки S3-S6. В режимах перегрузки электродвигатель может определенное время (в процентах от основного времени) работать с мощностью, превышающей номинальную до 1,8 раза.

Другой особенностью приводов, которая существенно влияет на их силовые характеристики, является наличие участка возрастания мощности от нуля до номинального значения $P_{\text{ном}}$ при увеличении частоты вращения двигателя от нуля до номинального значения $n_{\text{ном}}$.

Поскольку зубофрезерование выполняется на относительно малых частотах вращения режущего инструмента, то между двигателем и шпинделем станка необходима редукция, которая одновременно повышает врачающий момент на шпинделе. В таблице 1 рассмотрены характеристики приводов с четырьмя двигателями фирмы Siemens: 1PH4135-4NF26, 1FT6086-8WF7, 1FT6086-8WH7 и 1FT6086-8WK7, первый двигатель асинхронный, остальные синхронные, все работают с водяным охлаждением. Первый является двигателем, созданным фирмой Siemens для приводов главного движения металлорежущих станков. Остальные три двигателя предназначены для приводов подач станков. Свообразие зубофрезерования и отличие его от других видов металлообработки создало предпосылки для использования в зубофрезерном станке для привода главного движения именно двигателей, предназначенных для приводов подач.

Различные сочетания двигателей при двух режимах их работы и редукторов создали 14 различных возможных вариантов привода, которые проанализированы на предмет пригодности для зубофрезерных станков.

Расчет силовых характеристик привода проведен в табличном процессоре MS Excel и включил в себя вычисления значений мощности (кВт) на шпинделе при частоте его вращения от 100 до 500 об/мин через 10 об/мин и значений врачающего момента (кНм) на шпинделе при частоте его вращения от 0 до 500 об/мин через 50 об/мин. Помощью этой программы были проведены расчеты для всех вариантов привода, построенных на основе:

- асинхронных электродвигателей с частотным регулированием 1PH4 135 для приводов главного движения с ременной передачей и без нее;
- синхронных электродвигателей 1FT6086, предназначенных для приводов подач, и червячных беззазорных редукторов со значениями передаточных отношений от 5,2 до 14,5.

Каждый из вариантов просчитывался в двух режимах:

- 1) S1 – режим нормальной рабочей нагрузки;
- 2) S3 и S6 – режимы перегрузки, которая действует в течение соответственно 40% и 25% времени от времени всего цикла работы.

Именно режим перегрузки наиболее соответствует работе зубофрезерного станка, при которой нагрузка носит циклический характер. Для легких зубофрезерных станков можно рекомендовать привод с использованием двигателя 1FT6086-8WF7 и редуктора с передаточным отношением 5,2; для средних станков – двигателя 1FT6086-8WH7 и редуктора с передаточным отношением 10,25; для тяжелых станков – двигателя 1FT6086-8WK7 и редуктора с передаточным отношением 14,5.

По результатам расчетов построена диаграмма (рис.6), выявившая «слабые» характеристики привода с использованием двигателя 1PH4135-4NF26, не соответствующие требуемым режимам зубофрезерования. Хотя его номинальная мощность 22

кВт достаточна велика, при передаточном отношении 1 он развивает на шпинделе при 100 об/мин всего 1,6 кВт, а при передаточном отношении 2 – 3,2 кВт.

Полностью используются мощность $P_{дв}$ и врачающий момент $T_{дв}$ регулируемого двигателя, когда частота вращения шпинделя находится в диапазоне значений от номинального $n_{ном,шп}$ до максимального $n_{макс,шп}$. В таблице 1 и на рис.6 видно, что этот диапазон в режиме S1 составляет: для легких станков от 675 до 770 об/мин, для средних станков 420 – 585 об/мин, для тяжелых станков 448 – 550 об/мин. Для червячной фрезы диаметром 90 мм такие частоты соответствуют скоростям резания от 120 до 215 м/мин.

Таблица 1. Характеристики приводов различного исполнения

№ привода	Двигатель	Режим	$P_{ном,дв}$, кВт	$n_{ном,дв}$ об/мин	$T_{ном,дв}$, кНм	i	$n_{ном,шп}$ об/мин	$n_{макс,шп}$ об/мин
1	1PH4135-4NF26	S1	22	1500	0,140	1	1500	1500
	1PH4135-4NF26	S6-25%	31	1500	0,197	1	1500	1500
2	1PH4135-4NF26	S1	22	1500	0,140	2	750	1500
	1PH4135-4NF26	S6-25%	31	1500	0,197	2	750	1500
3	1FT6086-8WF7	S1(100K)	16,9	3510	0,046	5,2	675	770
	1FT6086-8WF7	S3-40%	19,1	3250	0,056	5,2	625	770
4	1FT6086-8WF7	S1(100K)	16,9	3510	0,046	7,25	484	550
	1FT6086-8WF7	S3-40%	19,1	3250	0,056	7,25	448	550
5	1FT6086-8WF7	S1(100K)	16,9	3510	0,046	10,25	342	390
	1FT6086-8WF7	S3-40%	19,1	3250	0,056	10,25	317	390
6	1FT6086-8WH7	S1(100K)	21,2	4310	0,047	10,25	420	585
	1FT6086-8WH7	S3-40%	23,2	3950	0,056	10,25	385	585
7	1FT6086-8WK7	S1(100K)	29,3	6500	0,047	14,5	448	550
	1FT6086-8WK7	S3-40%	34,6	5900	0,056	14,5	407	550

Варианты приводов 1, 2 и 6 из таблицы 1 проверены в ходе производственных испытаний первого опытного образца станка мод. 53Р32Ф6 с диаметром обработки до 500 мм, который относится к зубофрезерным станкам среднего типоразмера. Подтвердилась возможность исключить маховик из конструкции привода. Этому способствует использование в редукторах беззазорных червячных передач при высокой круговой жесткости привода.

На станке нарезали незакаленные и закаленные зубчатые венцы модулей от 3 до 8 мм. Испытания подтвердили правильность выполненных расчетов. Как и ожидалось, приводы по вариантам 1 и 2 показали неудовлетворительные результаты, при резании происходили вибрации, а нарезание венцов с модулями выше 3 мм приходилось во избежание перегрузки и отключения привода выполнять в два прохода.

Остановились на варианте привода с двигателем 1FT6086-8WH7 и беззазорным червячным редуктором с передаточным отношением 10,25. При таком приводе нарезание червячной фрезой со сверхтвёрдыми покрытиями венцов модуля 8 в один проход под последующее зубошлифование происходит без вибраций и перегрузки привода. При пиковых перегрузках автоматически включается режим S3, для чего в устройстве

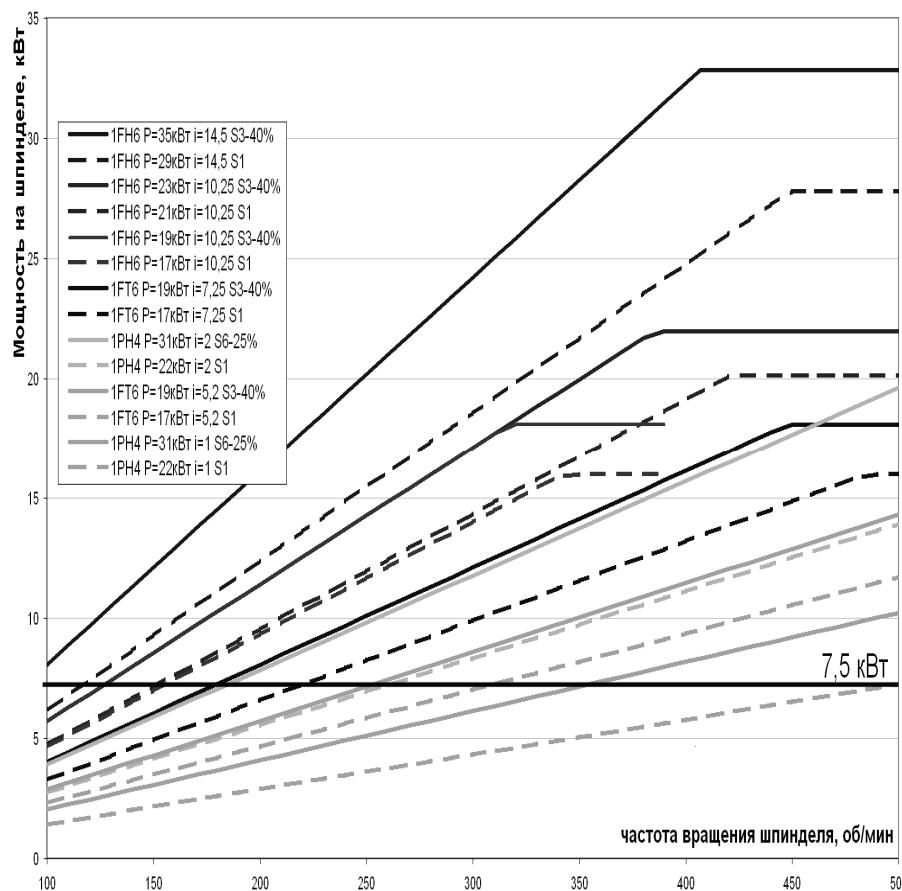


Рис. 6. Графики силовых характеристик вариантов главного привода

сплавной фрезой класса точности ААА со скоростью резания 70 м/мин зубчатых венцов, закаленных до твердости HRC 48, достигнута точность колес, соответствующая 5 степени по ГОСТ 1643-81. Подтверждена возможность при использовании высокоточных станков с ЧПУ замены зубошлифования фрезерованием.

Выполненная работа явилась теоретической основой проектирования и изготовления для гаммы станков с ЧПУ с диаметрами обработки 320, 500 и 800 мм бесступенчато регулируемых приводов главного движения, отвечающих широкому спектру требований зубофрезерования от высокопроизводительного по целому материалу до финишного взамен зубошлифования.

Список литературы: 1. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 2004. 480 с. 2. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение.Ленингр.отд., 1987. 846 с. 3. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник / под ред. Г.А. Харламова. – М.: Машиностроение, 2007. 240 с. 4. Овумян Г.Г., Адам Я.И. Справочник зубореза. – М.: Машиностроение, 1983. 223 с.

ЧПУ в параметрах привода установлена возможность работы с нагрузкой 200%. Поскольку перегрузка кратковременна (рис. 5) перегрев двигателя не наблюдается.

Нарезание фрезой Ø90мм из порошковой быстрорежущей стали со сверхтвердым покрытием партии колес модуля 3 мм из Ст45 под последующее зубошлифование со скоростью резания 145 м/мин (частота вращения 512 об/мин) с осевой подачей 3 мм за оборот заготовки дает повышение производительности в 5 раз.

При фрезеровании твердо-

Сдано в редакцию 16.01.2009