

(концевые фрезы), совместно с применением САПР систем позволяющих в автоматическом режиме создавать управляющие программы, что обеспечит повышение точности обработки винтовых поверхностей.

Литература

1. Высокопроизводительное протягивание фасонных поверхностей / Черепяхин А.А., Виноградов В.М.: Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2012 г. – р. 293
2. Методы обработки ответственных деталей автомобилей / А.А. Черепяхин, В.В. Клепиков, В.Ф. Солдатов: М., изд. МГИУ, 2011 – с 214.
3. Новые концепции совершенствования технологических систем в машиностроительной промышленности / Таратынов О.В., Клепиков В.В.: Вестник машиностроения, 2005, № 8 - с. 51-58
4. Технология обработки материалов / Черепяхин А.А.. М., изд. «Академия», 2012 – с. 272.
5. Технологические процессы машиностроительного производства / Кузнецов В.А., Черепяхин А.А., Колтунов И.И., М.: ФОРУМ, 2010 – с. 528.
6. Технология конструкционных материалов. Обработка материалов резанием / Черепяхин А.А., Кузнецов В.А.: М., изд. Академия, 2011 – с. 287.
7. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формирования зубьев / В.М. Виноградов, А.А. Черепяхин: М., Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), том 2, 2012 - с. 238-242.

Современные червячные фрезы: конструкция, инструментальные материалы и износостойкие покрытия

к.т.н. Локтев Д.А.
ЗАО «ИТЦ Технополис»
+7 985 764 27 89, d.loktev@technopolice.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности современных червячных фрез: конструктивные характеристики, применяемые материалы и износостойкие покрытия. Оценено влияние различных конструктивных параметров на производительность и стойкость фрез.

Ключевые слова: червячные фрезы, инструментальный материал, быстрорежущая сталь, твердый сплав, износостойкие покрытия

Особенности конструкции современных червячных фрез

Основными критериями, определяющими качество любого инструмента, являются: производительность обработки, которую этот инструмент может обеспечить, если соблюдены все требования по его применению; стойкость инструмента, причем как в части продолжительности периода стойкости (времени резания новым или восстановленным инструментом), так и в части полного периода стойкости (суммы периодов стойкости до достижения предельного состояния), при этом особую важность приобретают вопросы восстановления работоспособности; качество обработки, выполненной этим инструментом.

Рассмотрим эти критерии применительно к современным червячным фрезам (рисунок 1).



Рисунок 1. Внешний вид современных червячных фрез

Производительность при зубофрезеровании определяется временем обработки зубчатого венца t_0 , которое, в свою очередь, зависит от нескольких конструктивных параметров чер-

вячной фрезы и режимов обработки.

$$t_o = \frac{z_2 \cdot d_{a0} \cdot \pi \cdot (L_n + b + L_o)}{z_0 \cdot s_o \cdot V_c \cdot 1000},$$

где: z_2 – число зубьев обрабатываемой детали; d_{a0} – наружный диаметр червячной фрезы, мм; L_n – расстояние подвода фрезы, мм; b – ширина обрабатываемого венца, мм; L_o – расстояние отвода фрезы, мм; z_0 – число заходов червячной фрезы, s_o – осевая подача фрезы, мм/оборот детали; V_c – скорость резания, м/мин.

Параметры обрабатываемой детали z_2 и b определены как исходные данные. На остальные величины, определяющие время обработки, мы можем влиять. Все эти параметры определяются конструкцией червячной фрезы, а некоторые (например, диаметр фрезы и число заходов) просто являются элементами самой конструкции.

Основными элементами, полностью определяющими конструкцию червячной фрезы, являются: наружный диаметр фрезы; диаметр посадочного отверстия; общая длина фрезы и длина рабочей части фрезы; число заходов фрезы; число стружечных канавок; угол наклона стружечных канавок; задний угол головки зуба фрезы; исходный профиль.

Рассмотрим сначала влияние различных элементов конструкции современных червячных фрез на производительность и стойкость фрез, а также на качество обработки, а затем выясним, какие значения этих параметров соответствуют современному уровню техники и технологии.

Наружный диаметр. Теоретически, наружный диаметр червячной фрезы может быть любым. На практике, кроме ограничений по максимальному и минимальному диаметрам со стороны станка, на выбор диаметра фрезы влияют несколько факторов.

Диаметр фрезы может быть ограничен размерами фрезерной головки станка. Если на детали есть буртик или обрабатывается колесо с несколькими зубчатыми венцами, на диаметр фрезы также налагаются ограничения.

Величина наружного диаметра фрезы с посадочным отверстием определяется в первую очередь толщиной материала между стенкой отверстия или продольной шпонки до стружечной канавки. Необходимо обеспечить достаточную жесткость в этом сечении для противостояния силам резания (рисунок 2).



Рисунок 2 Ограничение минимального наружного диаметра фрезы

Минимальный диаметр фрезы ограничен высотой зуба фрезы. При неизменном числе стружечных канавок, чем больше наружный диаметр, тем больше высота зуба и, соответственно, величина переточки фрезы. Уменьшение высоты зуба сокращает полный период стойкости и увеличивает стоимость фрезы, отнесенную на одну деталь.

С другой стороны, уменьшение наружного диаметра сокращает время обработки. Сокращение происходит по двум причинам: благодаря уменьшению расстояния подвода-отвода и за счет увеличения числа оборотов и подачи для сохранения заданной скорости резания.

Длина фрезы и длина её режущей части. Современная технология зубофрезерования предполагает, что червячные фрезы в работе подвергаются осевому смещению, при котором в работу вступают новые участки фрезы. Такая стратегия обработки существенно увеличивает стойкость червячной фрезы.

В то же время совершенствование технологии изготовления червячных фрез привело к тому, что стоимость фрезы не увеличивается в прямой пропорции от её длины. А вот количество деталей, которое фреза может обработать до переточки, увеличивается быстрее с увели-

чением длины червячной фрезы. Например, увеличение длины фрезы на 50% приводит к увеличению стоимости фрезы всего на 40%, в то время как число обработанных деталей увеличивается на 80% (рисунок 3). Необходимо также учитывать, что затраты на замену изношенной фрезы и её переточку намного выше, чем увеличение стоимости фрезы при увеличении её длины.

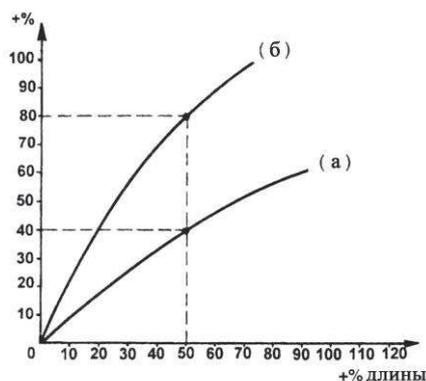


Рисунок 3. Соотношение увеличения периода стойкости и стоимости фрезы

Число заходов фрезы. Приведенная выше формула показывает что, с увеличением числа заходов червячной фрезы пропорционально сокращается основное время фрезерования, т.е. при тех же режимах обработки при применении двухзаходной фрезы вместо однозаходной фрезы время резания должно сокращаться вдвое. На практике, однако, эта зависимость носит не прямой характер, поскольку увеличение числа заходов требует небольшого уменьшения подачи для компенсации погрешностей изготовления и искажения кинематики резания.

Число стружечных канавок. Увеличение числа стружечных канавок сокращает время обработки, уменьшает износ и увеличивает число огибающих, формирующих зуб. При увеличении числа канавок стойкость фрезы существенно возрастает.

Однако увеличение числа стружечных канавок ограничено, с одной стороны, уменьшением полезной длины зуба фрезы и сокращением из-за этого количества переточек фрезы, с другой стороны, уменьшением объема стружечных канавок, что может привести к прекращению схода стружки и повреждению зубьев фрезы.

Посадочное место червячной фрезы. Посадочное место червячной фрезы имеет огромное значение, с точки зрения качества обрабатываемой детали. По-прежнему самым применяемым является исполнение червячных фрез с отверстием с продольной посадочной шпонкой (рисунок 4, а). Точность посадочного отверстия определяется международными нормами как *H5* для фрез класса AA и AAA. Погрешность формы отверстия не должна превышать 50% допуска на диаметр.

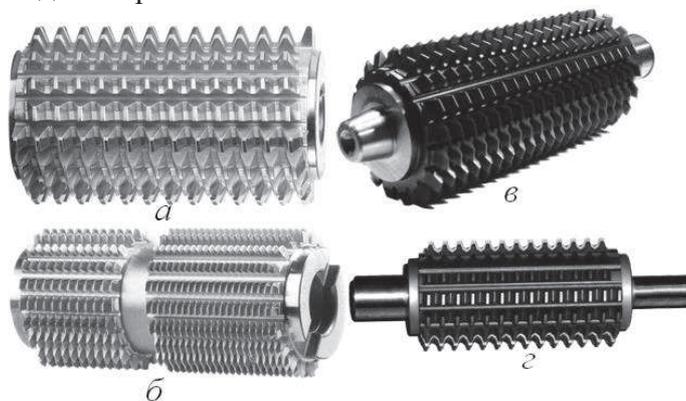


Рисунок 4. Посадочные места червячных фрез

Кроме указанного посадочного места, применяются фрезы с отверстием и торцевыми шпонками (рисунок 4, б). Твердосплавные фрезы изготавливаются практически исключительно в таком исполнении. Как специальные выпускаются фрезы с отверстием, но без шпо-

НОК.

Для крупносерийного производства все более часто применяются фрезы с короткими цилиндрическими или коническими хвостовиками с обеих сторон фрезы (рисунок 4, в, з). Преимущества такого способа крепления заключаются в существенном сокращении времени замены фрезы и в очень высокой точности установки фрезы на станок.

Конструкция современных червячных фрез

Наружный диаметр современных фрез выбирается при проектировании фрезы с учетом всех указанных выше составляющих: минимального времени обработки, максимальной высоты зуба для увеличения числа возможных переточек.

Стандартная длина фрезы для крупносерийного производства составляет сегодня 200 ... 220 мм, для мелкосерийного производства – 140 мм. Хотя на современные станки можно установить практически любые фрезы, обычно соотношение между длиной фрезы и её диаметром не превышает 4.

Традиционно до последнего времени число стружечных канавок составляло 12 или 14. Например, в ГОСТ 9324-80 для фрез среднего модуля степени точности АА и ААА рекомендовалось 14 стружечных канавок. Сейчас эта величина удвоилась или даже утроилась. На рынке преобладают фрезы, носящие неофициальное название «многозубые», с числом стружечных канавок от 20 до 30. Длина зуба в этом случае допускает 10...12 переточек. Поскольку сегодня стоимость времени обработки существенно выше стоимости инструмента на одну деталь, целесообразно увеличивать число стружечных канавок до разумного предела, заведомо предполагая сокращение количества переточек. В этом случае время обработки сократится, сокращая тем самым эту составляющую затрат на обработку, а стоимость инструмента на деталь незначительно увеличится. В результате сокращаются полные затраты на обработку детали.

Инструментальные материалы современных червячных фрез

Любой инструментальный материал должен сочетать вязкость и твердость. В особой степени это относится к материалу червячных фрез. В процессе зубофрезерования зуб фрезы проходит разные участки резания. На этих участках меняется толщина стружки на головке зуба фрезы и дуга контакта зуба с обрабатываемой деталью. Например, на входе в деталь при попутном фрезеровании толщина стружки максимальна, что требует высокой вязкости инструментального материала. На выходе зуба из детали (при попутном фрезеровании) и на выходящей стороне профиля зуба фрезы формируется тонкая стружка, приводящая к проскальзыванию зуба и высокому трению, что требует высокой сопротивляемости абразивному износу (твердости). Получение такого сочетания вязкости и твердости возможно за счет комбинации вязкого инструментального материала и твердого износостойкого покрытия.

Идеальным инструментальным материалом является тот, который позволяет реализовать обработку на высокой скорости резания (благодаря высокой износостойкости и теплопроводности) и высокой подаче (благодаря высокой вязкости и высокой прочности на изгиб и растяжение). Сравнение применяемых сегодня инструментальных материалов с идеальным материалом показано на рисунке 5.

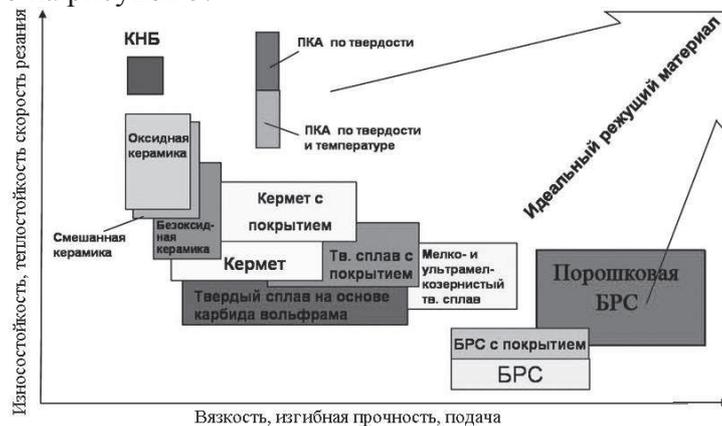


Рисунок 5. Современные инструментальные материалы

Основными инструментальными материалами для червячных фрез являются быстрорежущая сталь и твердый сплав.

Быстрорежущая сталь

Быстрорежущая сталь была изобретена и применена как инструментальный материал в начале 20 века Фредериком Тейлором. В последние годы быстрорежущие материалы претерпели значительные изменения, что привело к существенному улучшению их технических характеристик. В результате режимы резания с применением инструментов из быстрорежущей стали существенно возросли при одновременном увеличении периода стойкости инструмента. В основном это определяется переходом на быстрорежущие стали, полученные порошковым методом.

Порошковая технология получения быстрорежущей стали отличается от традиционного метода. В результате получается компактная масса, в которой равномерно распределены карбиды различных легирующих элементов.

Одной из основных проблем, связанных с быстрорежущими сталями, полученными традиционным методом, являются непостоянные форма и размеры, и неравномерное распределение карбидов (рисунок 6, б). Управлять размерами и распределением карбидов очень сложно. В результате сталь может обладать целым рядом дефектов, таких как неоднородность металлургических характеристик, избыточная твердость и хрупкость в отдельных зонах, плохая обрабатываемость, высокий уровень деформаций при термической обработке и т.д.

В быстрорежущих сталях, полученных порошковым методом, карбиды имеют малые размеры и очень хорошо распределены по всей массе материала (рисунок 6, а). Кроме того, в этих сталях легче контролировать размер и распределение карбидов. Как следствие, можно увеличивать процентное содержание легирующих элементов, улучшая режущие способности стали. Преимущества порошковой быстрорежущей стали также обуславливаются её мелкозернистой структурой, отсутствием примесей (существенно влияет на вязкость) и отсутствием ликвации (сегрегации), т.е. высокой однородностью всей заготовки по химическому составу, структуре и включениям. Метод получения порошковой стали ограничивает наружный диаметр изделия (в нашем случае червячной фрезы) до 250 мм.

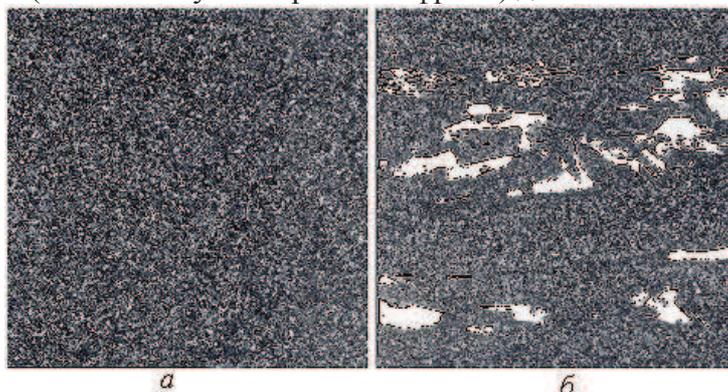


Рисунок 6. Сравнение порошковой (а) и обычной (б) быстрорежущей стали

Одной из наиболее важных характеристик быстрорежущей стали является её твердость, которая обеспечивается соответствующей термической обработкой. Термическая обработка быстрорежущей стали всегда была достаточно сложным процессом, но появление порошковой стали предъявляет к этому процессу еще более высокие требования. Небольшое отклонение от заданной температуры или времени выдержки стали внутри закалочной печи может существенно изменить результат. Закалка может производиться в соляных или вакуумных печах. Современные порошковые стали закаляются до твердости 65...67 HRP.

Как уже упоминалось выше, порошковые быстрорежущие стали находятся ближе к «идеальному» материалу – они одновременно имеют и более высокую твердость, и более высокую прочность (рисунок 7). Как видно из приведенной диаграммы, свойства порошковых быстрорежущих сталей существенно различаются между собой.



Рисунок 7. Свойства различных быстрорежущих сталей:
1 – REX121; 2 – S380; 3 – REX76; 4 – порошковая БРС; 5 – обычная БРС

Одновременное увеличение твердости и прочности позволяют одновременно увеличивать скорость резания и подачу. В таблице 1 приведены возможные значения скоростей резания и максимальной толщины стружки на головке зуба фрезы (фактически показывает уровень подачи при обработке). Указанные значения приведены для обработки зубчатых колес модулем 2 мм из стали прочностью около 700 Н/мм². Из данной таблицы видно, что скорости резания при применении порошковых сталей на 10...200% выше, чем для обычной быстрорежущей стали. Уровень подачи также выше.

В результате, применение порошковых быстрорежущих сталей обеспечивает существенное увеличение производительности. В таблице 2 показан рост производительности при переходе с обычной быстрорежущей стали на порошковую быстрорежущую сталь. В этой таблице порошковые стали (*ASP2030*, *S390*, *Rex76*, *ASP2080*, *Rex121*) приведены в порядке возрастания цены.

Таблица 1

Возможные значения скоростей резания и максимальной толщины стружки на головке зуба фрезы

Материал фрезы	Возможные скорости резания, м/мин	Макс толщина стружки, мм	Возможные покрытия	Повторное нанесение
M35	90 (в)	0,00 * 0,25 *	Все*	Нет* (в)
ASP 2030	100 (в)	0,00 * 0,25*	Все*	Нет* (в)
S 390	125 (в) 180 (с)	0,00* в 0,10** 0,30* 0,25**	Все* TiAlN / AlCrN**	Нет* (в) Да**
Rex 76	130 (в) 165 (с)	0,00* 0,10** 0,30 * 0,25**	Все* TiAlN / AlCrN**	Нет* (в) Да**
Rex 121	135 (в) 170 (с)	0,00* 0,10** 0,30* 0,25**	Все* TiAlN / AlCrN**	Нет* (в) Да**
ASP 2080	130 (в) 180 (с)	0,00* 0,10** 0,30* 0,25**	Все* TiAlN / AlCrN**	Нет* (в) Да**

*Примечание:** - обработка с применением СОТС; ** - сухая обработка. Для толщины стружки приведен диапазон значений.

Таким образом, применение самой дорогой порошковой стали обеспечивает 50% рост производительности. Отметим при этом, что применение стали S390 обеспечивает примерно такой же рост производительности, но стоимость её всего на несколько процентов выше стоимости обычной быстрорежущей стали.

Это иллюстрирует рисунок 8, на котором приведена сравнительная стоимость одной и той же червячной фрезы, изготовленной из сталей различных марок. Данные приведены для фрезы с хвостовиком, модуль 2,8 мм, наружный диаметр 65 мм, полная длина 225 мм, рабочая длина 170 мм, посадочный диаметр 22 мм с одной стороны и хвостовик SK30 с другой стороны, с 15 стружечными канавками.

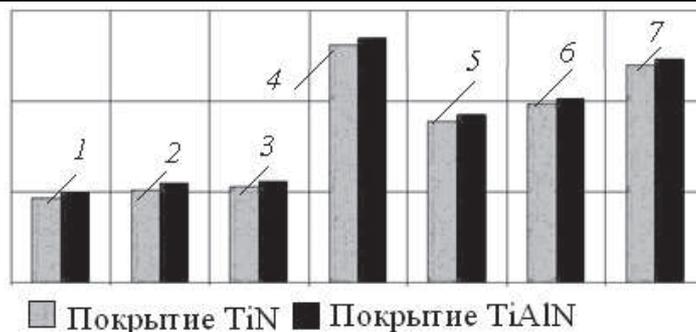


Рисунок 8. Стоимость различных червячных фрез: 1 – M35; 2 – ASP30; 3 – S390; 4 – ASP80; 5 – CPM Rex T15; 6 – CPM Rex T76; 7 - CPM Rex T121

Таблица 2 и рисунок 8 показывают реальное положение дел в производстве червячных фрез. Сегодня около 75% червячных фрез в мире изготавливается из порошковой быстрорежущей стали S390. При незначительно более высокой стоимости по сравнению с обычной быстрорежущей сталью при этом обеспечивается увеличение производительности на 45...50%.

Таблица 2

Рост производительности при переходе с обычной быстрорежущей стали на порошковую быстрорежущую сталь

Материал червячной фрезы	Увеличение скорости резания, [%]	Сокращение времени обработки при неизменной подаче, [%]	Сокращение времени обработки при увеличении подачи, [%]
M35 (обычная БРС)	Базовый вариант	Базовый вариант	Базовый вариант
ASP 2030	11	18	18
S 390	39	28	46
Rex 76	44	31	48
ASP 2080	44	31	48
Rex 121	50	33	50

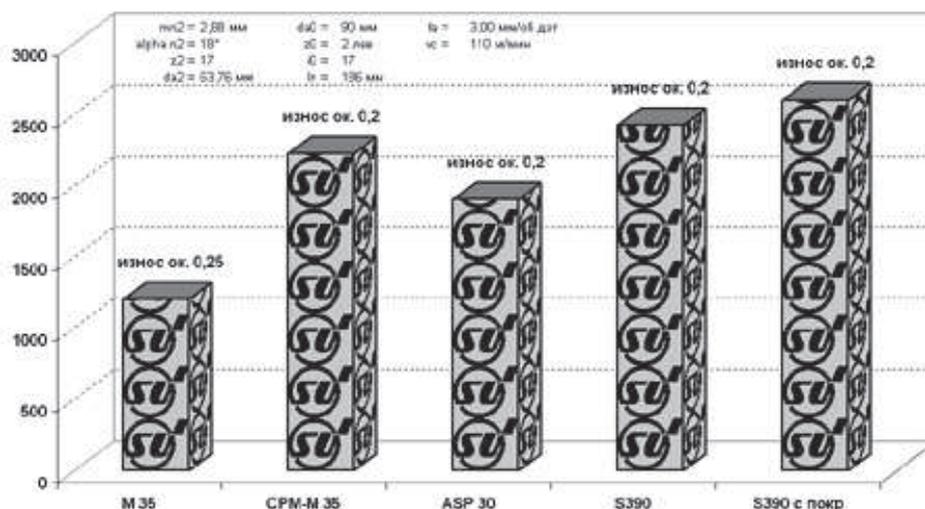


Рисунок 9. Стойкость различных червячных фрез

Применение порошковой быстрорежущей стали обеспечивает также существенный рост периода стойкости при зубофрезеровании. Если для стали M35 (P6M5K5) средний пе-

риод стойкости зуба фрезы составляет 3 метра, то для порошковых сталей типа S390 этот показатель в полтора раза выше – около 4,5 метров. На рисунке 9 представлены результаты работы идентичных червячных фрез из различных инструментальных материалов: период стойкости и величина износа по задней поверхности.

Подводя итог рассмотрению быстрорежущей стали в качестве инструментального материала для червячных фрез, отметим, что наиболее эффективным материалом сегодня являются порошковые быстрорежущие стали средней ценовой категории, обеспечивающее по сравнению с обычными быстрорежущими сталями (даже кобальтовыми) повышение режимов резания (скорости резания и подачи) при одновременном повышении периода стойкости.

Твердый сплав

Под твердым сплавом понимают материал, полученный методом порошковой металлургии, состоящий, в основном, из твердых металлов и их карбидов и вязкого связующего материала. Основными карбидами являются карбид вольфрама (WC), карбид титана (TiC) и карбид тантала (TaC). В качестве связки применяется кобальт.

По сравнению с быстрорежущей сталью твердый сплав обладает более высокой твердостью при более низкой изгибной прочности. В таблице 3 приведены основные характеристики быстрорежущей стали (БРС) и твердого сплава.

Более высоким значением прочности твердого сплава в таблице 3 соответствуют более низкие значения твердости.

Доля червячных фрез из твердого сплава увеличилась за несколько прошедших лет. В первую очередь, червячные фрезы из твердого сплава применяются для чистовой обработки закаленных колес методом зачистного фрезерования. Однако все чаще твердосплавные фрезы используются для предварительной обработки зуба. По последним данным, доля червячных фрез из твердого сплава в мире составляет около 20%.

Таблица 3

Основные характеристики быстрорежущей стали (БРС) и твердого сплава.

Характеристика	БРС	Твердый сплав	
		Зерно < 2 мкм	Зерно < 0,7 мкм
Твердость, HV10	800...900	1200...1600	1600...2100
Прочность на изгиб, Н/мм ²	5000	1700...2500	2500...4000
Модуль эластичности, 10 ³ Н/мм ²	217	480...560	560...650
Плотность, г/см ³	8...8,3	11...15	11...15
Коэффициент температурного расширения, мкм/(м*°C)	10...13	5...7	5...7
Теплопроводность (до 20°C), Вт/(м*°C)	19	30...100	30...100
Рабочая температура, °C	500	1000	1000

В пользу применения твердого сплава в качестве инструментального материала для червячных фрез можно привести следующие аргументы: сокращение времени резания за счет повышения скорости резания; существенное улучшение качества обработанной поверхности; хорошие возможности для применения сухой обработки благодаря высокой износостойкости при высоких температурах; высокая прочность режущей кромки.

В то же время существует целый ряд аргументов против применения твердого сплава: существенно более высокая стоимость инструмента; существенно более высокая стоимость восстановления инструмента; большие сроки поставки инструмента (плохая доступность); особые требования при обращении (чувствительность к ударам); иногда низкая технологическая надежность.

Необходимость обязательного нанесения износостойкого покрытия из-за опасности возникновения диффузионного износа, отсюда высокая стоимость восстановления инструмента, увеличение складского запаса и увеличение связанного капитала.

Возможно возникновение проблем при химическом снятии старого покрытия (утечка кобальта)

Современные износостойкие покрытия для червячных фрез

По данным производителей червячных фрез, на сегодняшний день более 90% этих инструментов выпускаются с различными износостойкими покрытиями. Это практически самое высокое соотношение инструментов с покрытием и без покрытия среди всех типов инструментов. Для сравнения: метчики с покрытием составляют 50% от общего количества, сверла и концевые фрезы из быстрорежущей стали – 45%, протяжки – 40%. В чем же причина столь широкого применения покрытий при эксплуатации червячных фрез?

В процессе нанесения износостойкого покрытия на инструментальном материале создается твердый слой, который создает своего рода барьер между инструментальным и обрабатываемым материалом. Покрытие, как правило, имеет более низкий коэффициент трения по сравнению с инструментальным материалом. В результате снижается трение между стружкой и передней поверхностью, что существенно сокращает абразивный износ. Наличие барьерного слоя также ослабляет эффект адгезионного износа, поскольку сокращается наростообразование в процессе резания. Наличие износостойкого покрытия сокращает количество тепла, попадающего в инструментальный материал. В результате уменьшается нагрев инструментального материала. Уменьшение температуры и создание барьера практически полностью предотвращает диффузию инструментального и обрабатываемого материала и связанный с ней диффузионный износ. Покрытие также создает химический барьер, увеличивая стойкость инструмента против окисления и других химических воздействий.

Таким образом, наличие покрытия замедляет все основные процессы износа инструментального материала. Этим фактом можно воспользоваться не только для повышения стойкости, но и для существенного повышения производительности.

Из существующих двух основных методов нанесения износостойкого покрытия на режущий инструмент: метода химического осаждения (*CVD*) и метода физического осаждения (*PVD*), для покрытия червячных фрез применяют исключительно второй метод. Это связано с температурой процесса, составляющей для метода химического осаждения 900...1100°C, что исключает его применение для нанесения покрытий на фрезы из быстрорежущей стали.

На сегодняшний день существует много видов износостойких покрытий на режущий инструмент. Они различаются по структуре, по химическому составу и толщине.

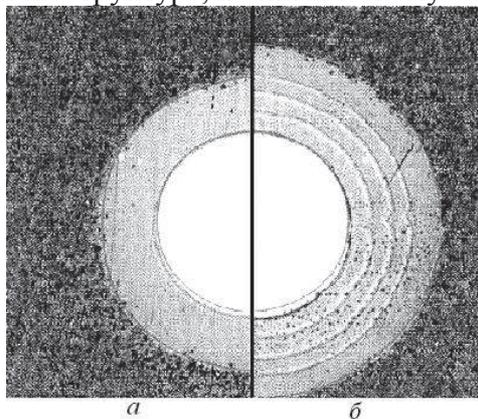


Рисунок 10. Различные виды покрытий

В однослойных покрытиях (рисунок 10, *а*) на материал наносится равномерный слой определенного химического состава. Это самые простые покрытия. Современная технология позволяет наносить более сложные покрытия с более высокими эксплуатационными характеристиками. Градиентными называются покрытия, в которых химический состав постепенно изменяется от покрываемого материала к внешней поверхности покрытия. Градиентные покрытия могут состоять из одного химического соединения или реализовывать постепенное замещение одного химического соединения другим. Покрытия, в которых слои с разным химическим составом чередуются и имеют четко очерченные границы, называются многослойными (рисунок 10, *б*). Если слоев много, то они очень тонкие (толщина каждого слоя составляет несколько нанометров и такие покрытия называют нанослойными). В многослойных и нанослойных покрытиях слои выполняют разные функции: одни повышают износостой-

кость, другие, обладая низкой теплопроводностью, создают температурный барьер между основой и наружной поверхностью покрытия. Важным свойством многослойных покрытий является способность останавливать возникающие трещины, которые распространяются не вглубь покрытия, а вдоль границ отдельных слоев. Одной из особых разновидностей многослойных покрытий является комбинированное покрытие, когда поверх твердого покрытия нанесен слой покрытия с низким коэффициентом трения («самосмазывающееся покрытие»).

От химического состава покрытия во многом зависят его эксплуатационные свойства. Покрытия с разным химическим составом, как правило, различаются по цвету, и опытный пользователь всегда может определить, какое именно покрытие нанесено на инструмент.

Свойства основных износостойких покрытий

Износостойкие покрытия оцениваются по следующим основным характеристикам:

- твердость слоя покрытия;
- теплостойкость покрытия (способность покрытия сохранять свои свойства при высоких температурах);
- коэффициент трения (влияет на сход стружки и выделяемое при этом тепло);
- теплопроводность покрытия (влияет на распределение выделяемого при резании тепла);
- вязкость покрытия (способность противостоять изгибающим нагрузкам без разрушения);
- шероховатость поверхности покрытия (влияет на сход стружки и на возникновение очагов разрушения покрытия).

Рассмотрим более подробно износостойкие покрытия, применяемые для червячных фрез (они представлены в таблице 4).

Таблица 4

Характеристики износостойких покрытий

Покрытие	Цвет	Твердость, (HV _{0,05})	Толщина, мкм	Коэффициент трения (по стали, сухое)	Максимальная температура применения, °С
TiN	Золотой	2500	1 ... 7	0,4	600
TiCN	Серо-голубой	3300	1... 4	0,35	450
TiAlN	Фиолет.-черный	3500	1 ... 4	0,45	800
AlCrN	Серо-голубой	3200	2 – 5	0,45	1100
nACro	Серо-голубой	4000	1 ... 7	0,35	1100

Наиболее распространенным на сегодняшний день износостойким покрытием для инструмента является нитрид титана TiN. Это покрытие начало применяться еще в начале 80-х годов прошлого века и применяется как покрытие общего назначения для обработки резанием, обработки давлением, литейных форм и для снижения трения в деталях машин. Покрытие TiN обладает высокой твердостью в сочетании с высокой вязкостью, хорошей износостойкостью, низким коэффициентом трения со сталью, хорошей химической стойкостью, высокой сопротивляемостью окислению на воздухе, хорошей адгезией на изделиях сложной формы. Высокая твердость покрытия обеспечивает сопротивляемость как абразивному износу, так и луночному износу. В результате становится возможным увеличение режимов обработки, при этом износ инструмента остается на том же уровне, что у инструментов без покрытия. Низкий коэффициент трения позволяет улучшить сход стружки и уменьшить количество выделяемого при этом тепла. Низкая химическая активность покрытия TiN по отношению к большинству материалов снижает вероятность приваривания стружки к инструменту, уменьшая тем самым луночный износ.

В результате нанесения покрытия TiN можно увеличить стойкость червячной фрезы в 2 ... 12 раз. Поскольку рабочая температура этого покрытия не превышает 600°С, скорость резания может быть увеличена в определенных пределах. Ограничение по рабочей температуре предопределяет использование инструментов с покрытием TiN только с применением СОТС.

Традиционное покрытие карбонитридом титана TiCN (более правильное написание Ti(C,N), так как содержание углерода может быть различным) отличается от покрытия TiN

более высокой твердостью. Высокая твердость (обусловленная наличием углерода в кристаллической решетке) в сочетании с низким коэффициентом трения определяет широкую область применения данного покрытия как в качестве твердого покрытия на инструмент, так и в качестве снижающего трение покрытия на детали машин. Цвет покрытия серо-голубой или медно-красный и зависит от соотношения доли углерода и азота. При использовании инструментов с покрытием TiCN обязательно применяется СОТС (из-за низкой температурной стойкости покрытия). Покрытие часто наносится в виде многослойного или градиентного с постепенным увеличением содержания углерода к поверхности.

Доля покрытий (Ti,Al)N в общем объеме износостойких покрытий последние годы постоянно увеличивается. Преимущество этих покрытий в высокой стойкости к окислению при очень высокой твердости и низкой теплопроводности. Покрытие (Ti,Al)N создает тепловой барьер, практически изолирующий инструментальный материал от воздействия тепла, образующегося при резании. Происходит перераспределение тепловых потоков, и большая часть тепла уходит в стружку. Кроме того, в отличие от других видов покрытия, с увеличением температуры резания на поверхности этого покрытия образуется пленка оксида алюминия, обладающая более низким коэффициентом трения. В результате снижаются усилия при обработке. Как следствие, областью применения инструментов с покрытием (Ti,Al)N является обработка с большими термическими нагрузками на инструмент. К таким операциям относится высокопроизводительная обработка, когда повышение режимов резания приводит к увеличению температуры в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и обработка без применения СОТС. Именно с появлением и широким распространением этого покрытия в промышленности широко стало применяться «сухое» резание.

Созданное несколько лет назад, не содержащее титана покрытие AlCrN нашло широкое распространение, прежде всего, именно для червячных фрез. Более высокая износостойкость покрытия обеспечивает увеличение стойкости и сокращение затрат на инструмент. По сравнению с рассмотренными выше видами покрытия, покрытие AlCrN характеризуется стойкостью к окислению при температурах до 1100°C, сохраняя при этих температурах высокую химическую стабильность. Это покрытие может быть нанесено на червячные фрезы как из порошковой быстрорежущей стали, так и из твердого сплава. По сравнению с покрытиями TiAlN в этом случае обеспечивается рост стойкости (в некоторых случаях - двухкратный).

Покрытие $n\text{AlCrO}$ по химическому составу совпадает с покрытием AlCrN, но имеет нанокompозитную структуру. Нанокompозитная структура представляет собой нанокристаллические зерна материала покрытия, внедренные в аморфную матрицу. Если сравнить обычное покрытие с сухим песком на пляже, то нанокompозитное покрытие обладает свойствами мокрого песка. В результате при более высокой твердости это покрытие одновременно является и более эластичным, хотя обычно эти два параметра являются взаимно исключаящими. Увеличение твердости и снижение коэффициента трения благоприятно сказывается на стойкости инструментов с нанокompозитным покрытием.

Основные комбинации инструментального материала и покрытий для червячных фрез

На обычную быстрорежущую сталь наносят, как правило, покрытия TiN, TiCN и TiAlN. Покрытие TiN применяется для обработки различных материалов с применением СОЖ на скоростях резания, не превышающих 100 м/мин. Покрытие TiCN также требует обязательно использования СОТС и применяется для обработки материалов высокой твердости.

Фрезы из обычной быстрорежущей стали достаточно редко применяются для сухой обработки. Если все же такая комбинация имеет место, то на фрезу наносят покрытие TiAlN. Скорости резания в этом случае не превышают 110 м/мин, что определяется свойствами быстрорежущей стали.

На порошковую быстрорежущую сталь могут наноситься все рассмотренные выше виды износостойких покрытий. Любое из этих покрытий может быть применено в случае обработки с использованием СОТС. Скорости резания в этом случае могут быть увеличены до 130 м/мин. Червячные фрезы с покрытиями, содержащими алюминий, применяются также для сухой обработки (без СОТС). Скорости резания в этом случае могут быть увеличены до

180 м/мин. Отметим, что на фрезы для сухой обработки в процессе восстановления режущих свойств после переточки обязательно наносится новое покрытие для предотвращения возникновения луночного износа. Решение о повторном нанесении покрытия на червячные фрезы, работающие с СОТС, принимается в зависимости от условий их эксплуатации.

Выбор покрытия на твердый сплав также зависит от того, предполагается ли применение СОТС на данной операции. Покрытие AlCrN может быть применено во всех случаях. Для покрытия TiN СОТС не применяется. Покрытие TiCN применяется только для обработки с СОТС. Покрытие TiAlN на твердом сплаве применяется в виде однослойного покрытия для сухого резания.

Технология нанесения износостойкого покрытия

Покрытие может наноситься на новые червячные фрезы и восстанавливаться после переточки. Различными в этом случае являются первые, подготовительные, операции.

После изготовления новой червячной фрезы она поступает на участок подготовки перед нанесением покрытия. Основной операцией на этом этапе является струйная обработка специально подобранным абразивом. Целью этой обработки является удаление заусенцев, образовавшихся на кромках фрезы после шлифования зубьев по передней поверхности, и очистка задних поверхностей зубьев для лучшей сцепляемости покрытия с инструментальным материалом. Операция производится на специальных автоматизированных струйных установках.

После струйной обработки червячные фрезы, как правило, попадают непосредственно на операцию нанесения покрытия. В отдельных случаях они могут проходить через специализированную мойку, однако, при нормальной струйной обработке это не требуется (в этом заключается основное отличие нанесения покрытий на червячные фрезы от нанесения покрытий на большинство других инструментов, когда мойка является обязательным этапом).

Червячные фрезы загружаются на поворотные стойки камеры для нанесения покрытия. Положение фрез в камере – вертикальное. Количество одновременно покрываемых фрез зависит от размера камеры установки для нанесения покрытия.

После завершения цикла нанесения покрытия осуществляется контроль покрытия. Поскольку контролировать саму фрезу достаточно затруднительно из-за её сложной формы, в камеру нанесения покрытия помещается небольшой образец («свидетель») из того же инструментального материала, что и червячная фреза. На образец наносится такое же покрытие, как и на фрезу и на нем оно и контролируется.

Технология нанесения износостойкого покрытия в процессе восстановления режущих свойств инструмента отличается от рассмотренной выше технологии нанесения покрытия на новые фрезы только подготовительными операциями. Сначала надо решить, будет ли восстанавливаться износостойкое покрытие. В некоторых случаях покрытие не наносится заново, фрезы просто перетачиваются по передней поверхности, и с них снимаются заусенцы. Это происходит в том случае, когда фреза работает на низких скоростях резания и не требуется обязательного наличия покрытия на передней поверхности для защиты от луночного износа. В этом случае переточка фрезы осуществляется «по покрытию», что снижает стойкость шлифовальных кругов.

Если необходимо восстановить износостойкое покрытие и на задней и на передней поверхностях инструмента, то первой операцией является удаление старого покрытия. Покрытие удаляется химическим способом (растворяются) в специально подобранных растворах.

После удаления покрытия червячные фрезы проходят операцию струйной очистки и поступают на заточку. Заточенная червячная фреза должна обязательно пройти процедуру струйной обработки для удаления заусенцев и подготовки поверхности под последующее нанесение покрытия. С этого момента процесс нанесения покрытия на восстанавливаемые фрезы полностью совпадает с процессом покрытия новых фрез, рассмотренным выше.

Влияние современного покрытия на стойкость и производительность червячных фрез

Как уже указывалось выше, эффект от применения износостойких покрытий имеется и в том случае, когда оно наносится на червячные фрезы традиционной конструкции из обыч-

ной быстрорежущей стали. Рассмотрим несколько конкретных примеров, отражающих результат нанесения современных качественных покрытий на червячные фрезы «собственного» изготовления нескольких российских заказчиков. Существенное увеличение периода стойкости наблюдается даже в тех случаях, когда сравнение производится с инструментами, на которые потребители наносили износостойкое покрытие на установках предыдущих поколений.

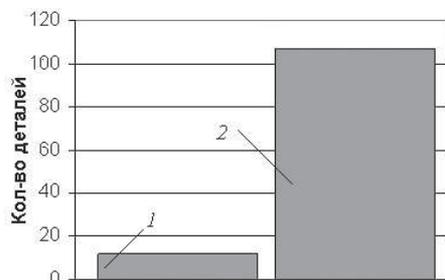


Рисунок 11. Рост стойкости червячных фрез после нанесения покрытия: 1 - стойкость без покрытия; 2 – стойкость с покрытием

На рисунке 11 приведено сравнение стойкости червячной фрезы без покрытия и червячной фрезы с покрытием TiN. Фреза работает на одном из крупнейших российских автомобильных заводов. Приведенные данные получены от московской фирмы «Технологические покрытия», активно работающей на рынке нанесения современных покрытий на червячные фрезы.

Литература

1. Современные методы обработки зубчатых колес / Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А.: Москва, 2012.
2. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формообразования зубьев / Виноградов В.М., Черепяхин А.А.: Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 2. № 2 (14) - с. 238-242.
3. Параметрическая оптимизация зубообрабатывающих операций / Виноградов В.М., Черепяхин А.А.: Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 2. № 1 (15) - с. 22-30.

Анализ износа и причин выхода из строя подшипников качения высокоскоростных шпиндельных узлов

Решняк С.Е., к.т.н. Максимов А.Д.
Университет машиностроения
8 (962) 988-06-58 anatoliy_litha@mail.ru

Аннотация. В статье приведен анализ факторов, влияющих на ресурс работы подшипников качения высокоскоростных шпиндельных узлов, а также приведены и проиллюстрированы наиболее типичные повреждения подшипников с анализом картины явления износа, его причины и рекомендациями по предупреждению выхода подшипников из строя.

Ключевые слова: шпиндельные узлы, высокоскоростные опоры, подшипники качения, ресурс работы подшипников, проблемы в работе, виды отказов, предупреждение поломок

Одним из наиболее критичных компонентов любого высокоскоростного шпиндельного узла (ШУ) является система подшипников. При конструировании ШУ особое внимание уделяется опорам. В ряде случаев высокоскоростные шпиндельные узлы работают на максимальных скоростях и соответственно имеют невысокую долговечность подшипников. При правильном использовании ШУ типовой срок службы его подшипников, например в Европе – 5...7 тысяч часов.

Срок службы подшипников зависит от следующих основных факторов: скорости,