

## **Состояние и возможности развития некоторых зуборезных технологий и оборудования**

Швычков Д.В.  
Университет машиностроения  
[tirnom@gmail.com](mailto:tirnom@gmail.com)

*Аннотация.* В статье описываются некоторые новые станки, инструментальные материалы и методы для зубообработки.

*Ключевые слова:* зубчатые колеса, цилиндрические зубчатые колеса, зубонарезание, точность, точность зубчатых колес, повышение производительности, зубообрабатывающее оборудование, инструмент, инструментальные материалы, покрытия.

В современном машиностроении существует множество способов передачи крутящего момента от источника к потребителю. Но подавляющее большинство трансмиссий использует для этих целей именно зубчатые передачи. Ключевой деталью любой зубчатой передачи всегда было и остается зубчатое колесо. Именно от точности его изготовления напрямую зависит качество передачи крутящего момента.

История производства зубчатых колес ведет свое начало еще из древнего Египта и охватывает веки во всех значимых эпохах человечества. Но бурное развитие зуборезного дела началось со второй половины 19 века, с массового внедрения машин и механизмов в повседневную жизнь человека. Современные представления о машиностроении как одной из важных отраслей человеческой жизни сформировались к середине 20 века и были претворены в жизнь после Второй мировой войны.

С того времени прошло более 60 лет. За это время было изобретено множество новых способов обработки деталей машин, но зуборезного дела эти изобретения коснулись лишь краем. И основные принципы, заложенные более полувека назад, были и остаются действующими. Однако реализация этих принципов претерпела серьезные изменения особенно за последние 15-20 лет. К сожалению, в связи с общим спадом 1990-х годов в нашей стране почти нет наработок в области современных зуборезных технологий, и все, что использует машиностроение, – это изобретения и оборудование зарубежных фирм и корпораций.

### **Новые материалы**

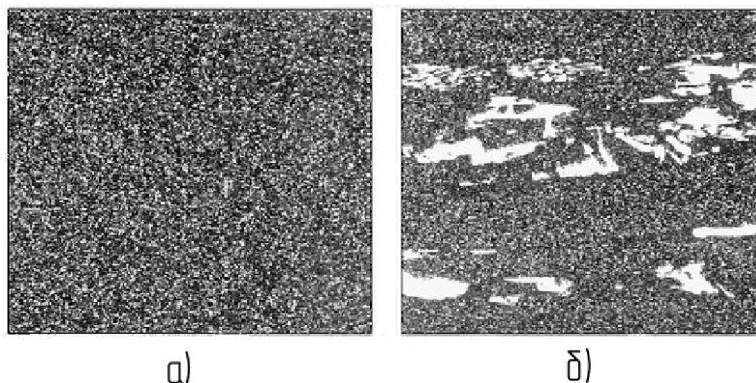
Одним из наиболее значимых новшеств в области материалов зубообработки является создание, и применение порошковой быстрорежущей стали для изготовления инструмента, главным образом червячных фрез. Обычная быстрорежущая сталь имеет в качестве основы железо и углерод, но легируется до 30 % ванадием, вольфрамом, хромом, молибденом, кобальтом и некоторыми другими, добавленными в определенной пропорции. Однако при получении стали традиционными способами возникают структурные дефекты, главные из которых – неравномерность распределения легирующих элементов в объеме стали, в том числе их карбидов. В результате этого возникает неоднородность металлургических характеристик стали, излишняя твердость и хрупкость в отдельных зонах, плохая обрабатываемость, высокий уровень деформаций при термической обработке [1].

Порошковая технология получения быстрорежущей стали отличается от традиционной. Основные легирующие элементы сначала измельчаются в среде инертного газа до состояния порошка с очень мелким зерном. Затем полученная смесь в нагретом состоянии помещается в капсулы, которые запаиваются в вакууме. Далее капсулы спрессовываются при высокой температуре и под большим давлением. В результате получается компактная масса, в которой равномерно распределены карбиды различных легирующих элементов.

В порошковых быстрорежущих сталях карбиды имеют малый размер и очень хорошо распределены по всей массе материала, что иллюстрирует рисунок 1. К тому же при таком способе производства легче контролировать содержание легирующих веществ и увеличивать содержание некоторых из них, улучшая режущую способность стали. Также порошковая быстрорежущая сталь обладает мелкозернистой структурой, отсутствием примесей и высокой

однородностью по всему объему заготовки.

Червячные фрезы также изготавливают из твердого сплава. Его так же, как и порошковую быстрорежущую сталь, получают методами порошковой металлургии, используют преимущества этого метода в создании однородной мелкозернистой структуры материала. Он в основном состоит из карбидов титана, вольфрама и тантала и связующего материала – кобальта. По сравнению с быстрорежущей сталью твердый сплав обладает более высокой твердостью при более низкой изгибной прочности. С уменьшением размера зерна твердого сплава одновременно увеличивается его изгибная прочность и твердость.



**Рисунок 1 – Структура а) порошковой и б) традиционной быстрорежущей стали**

Червячные фрезы, изготовленные из твердого сплава, обладают достаточной твердостью, чтобы обрабатывать уже термообработанные заготовки. Однако, ввиду того что материал инструмента порошковый, им возможно обрабатывать заготовки только «всухую» без применения СОЖ. Это связано с тем, что охлаждающая жидкость резко понижает температуру зуба инструмента после выхода из зоны резания. В связи с этим происходит термошок и существует опасность выкрашивания твердых карбидов и вымывания кобальта из сплава. Также от перепадов температур возможно расквашивание и порошковой быстрорежущей стали.

Чтобы производить высококачественные порошковые стали и сплавы, необходимы не только качественное сырье, но и дорогостоящие установки, способные поддерживать жесткие температурные режимы обработки порошковых металлов. К сожалению, в нашей стране почти нет организаций, способных позволить себе закупку и содержание подобных установок в достаточном количестве.

### Новые покрытия

В связи с появлением новых инструментальных материалов, отличающихся не только уникальными режущими свойствами, но и повышенными требованиями к эксплуатации, в первую очередь к температурному режиму резания, возникла необходимость создания покрытия, не только не препятствующего резанию, но и защищающего деталь от чрезмерных температурных нагрузок, налипанию и трения. [2]

Первое износостойкое покрытие, нитрид титана, появилось в 1980 году. К 1988 году начали применять еще два покрытия – карбонитрид титана и нитрид хрома. К 2000 году в Европе и Америке уже применялось 14 стандартных покрытий. В России же в связи с внутренними разногласиями техническими вопросами создания покрытий занялись уже в 21 веке.

Нитрид титана получают азотированием титана при высокой температуре. Он служит в качестве жаростойкого покрытия. Для увеличения твердости покрытия используют углерод, но при этом жаростойкость покрытия снижается до 400 градусов.

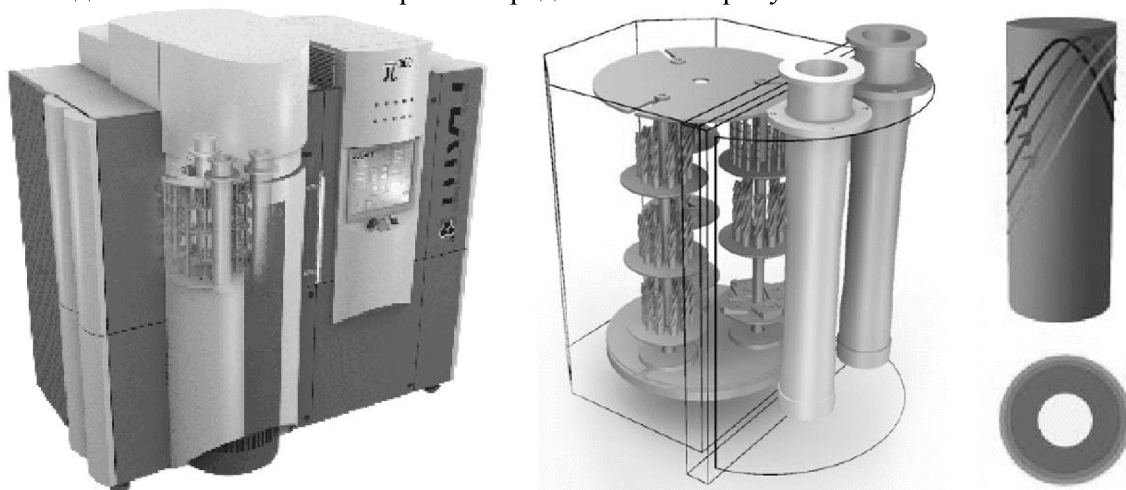
Наиболее важным преимуществом покрытий, содержащих хром, является высокая устойчивость абразивному износу. Высокая вязкость и сходная со сталью эластичность делают хромосодержащие покрытия наиболее применимыми для инструмента из быстрорежущей стали.

При добавлении в нитрид титана алюминия (до 50%) покрытие приобретает теплоизоляционные свойства и подходит для высокопроизводительной сухой обработки. Однако при

незначительном увеличении содержания алюминия в покрытии они теряют твердость и износостойкость.

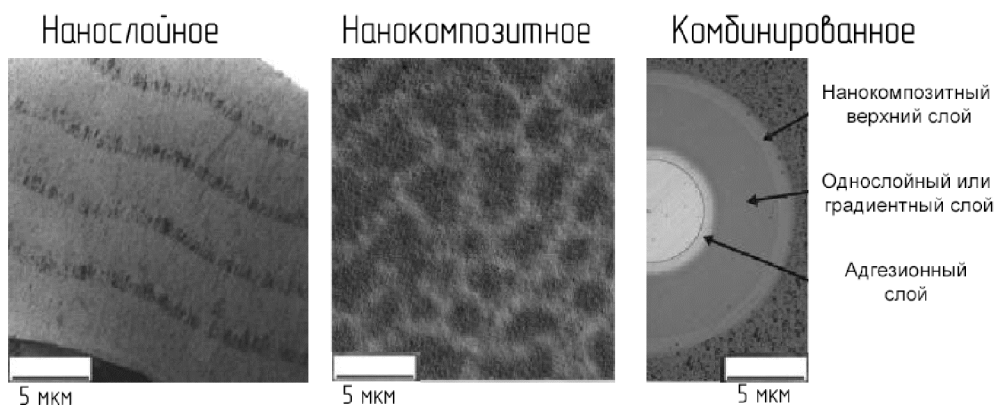
Кремний, добавленный в покрытие, обеспечивает отличную теплостойкость и изоляционные свойства. Поэтому покрытие, содержащее кремний как легирующий элемент в металлической фазе, очень хорошо подходит для высокоскоростной обработки.

В последнее время в Европе вошли в употребление установки для нанесения PVD покрытий. Это технология нанесения покрытия путем электродного осаждения материала покрытия в вакуумной среде. Принципиальное отличие от лазерного или плазменного напыления заключается в том, что материал покрытия находится не в виде сплава или мелкодисперсного порошка, а в чистых металлических катодах. И именно включение соответствующих катодов и мишени в цепь на определенные периоды времени обеспечивает нанесение покрытия любой сложности. Такой метод нанесения покрытия позволяет создавать покрытия с различным на различной глубине химическим составом и плотностью. В стандартных установках для PVD покрытий предусмотрена установка трех электродов, и все они могут быть выполнены из разного металла. В результате этого без смены электродов возможно наносить до 30 различных покрытий, а цельнометаллические катоды служат на протяжении 75 часов. Установка для нанесения PVD покрытий представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Установка фирмы Platit для нанесения PVD покрытий**

Также при помощи установок PVD стало возможным наносить трехкомпонентные нанокomпозитные покрытия. Сначала на подготовленную деталь наносится тонкий (порядка 200 нанометров) адгезионный слой чистого титана или хрома. Затем наносится вязкий центральный слой из нитрида титана и алюминия. И затем наносится твердый верхний слой, представляющий собой внедренные в матрицу из нитрида хрома и алюминия твердые зерна нитрида кремния.



**Рисунок 3 - Микроструктура нанокomпозитных покрытий**

Однако нанесение и удаление металлических покрытий требуют высокой культуры производства и безопасности. Любой испаренный материал в активной фазе является опас-

ным для человека. Таким образом, требуются установки с жесткими требованиями по герметичности и безопасности и персонал, умеющий обращаться с ними.

Появление новых материалов и новых покрытий для зуборезного инструмента сделали возможным выход на те режимы обработки, которые для традиционных материалов были недоступны. Это, прежде всего, высокоскоростная обработка без СОЖ и твердое резание [3, 4].

### Новые режимы и оборудование

Высокоскоростная сухая обработка новыми инструментами (в данном случае зубофрезерование) стала возможной благодаря применению теплоизоляционных покрытий, отводящих тепло в стружку и не дающих проникать ему в материал инструмента. А порошковая быстрорежущая сталь одновременно с этим позволила снимать больший припуск за один проход. Понятно, что это существенно увеличило производительность процесса зубофрезерования.

Червячными фрезами из твердого сплава, полученного порошковыми методами, стало возможно обрабатывать закаленные зубчатые венцы. Таким образом, для зубчатых колес общего назначения технологический процесс нарезания зубьев может быть привязан к одному станку с быстросменными червячными фрезами.

Однако и высокие скорости обработки, и твердое резание с достаточной точностью и качеством невозможны на традиционных станках. В первую очередь из-за чрезмерных нагрузок и вибраций, оказывающих воздействие не только на режущий инструмент и деталь, но и через них на приводы и далее на весь станок. Для эффективного применения новых материалов требуются специальные утяжеленные виброустойчивые и упрочненные станки. Первыми из них были станки ведущих мировых фирм в области зубообработки: Liebherr, Gleason, Samputensili [5]. Естественно, что стоимость таких станков гораздо больше стоимости классического зубообрабатывающего оборудования.

### Новые технологии

Принципиально новых технологий в зубообработке за последние 10-15 лет не появилось. Зато появились эффективные комбинации традиционных технологий. Наиболее успешной комбинацией стало объединение чистовой обработки резанием незакаленных зубчатых колес и пластического деформирования. Эта комбинация получила название шевингования-прикатывания. Существует несколько вариантов использования этого метода. [6]

Первый – использование сначала шевингования для стабилизации припуска под пластическое деформирование, а потом накатывание с целью придания зубьям окончательной формы, улучшения шероховатости и создания благоприятных сжимающих напряжений. Для реализации этого варианта необходимо либо два станка – шевинговальный и накатной, либо один комбинированный, способный делать и то и другое параллельно.

Другой вариант – объединить используемые инструменты и создать комбинированный инструмент – шевер-прикатник. Существует несколько модификаций этого инструмента. В одной из них он представляет собой шевер, условно разделенный на две части: часть с вертикальными стружечными канавками на зубьях шевера и часть с гладкими зубьями (рисунок 4).

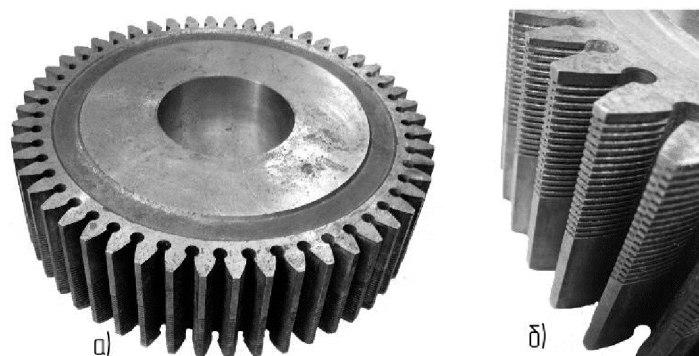
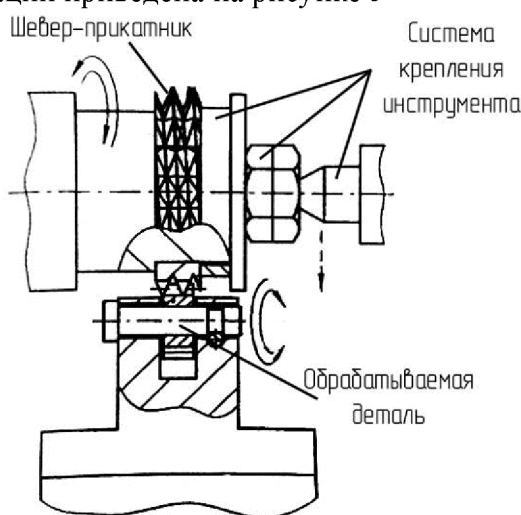


Рисунок 4 – Комбинированный инструмент: шевер-прикатник: а) общий вид инструмента; б) вид рабочей поверхности инструмента

Для этого варианта используется специальный станок, использующий силовой обкат

одновременно со скрещенной осью инструмента и заготовки. Обработка происходит следующим образом: сначала обрабатываемый зубчатый венец входит в зацепление с шеверной частью инструмента и происходит его шевингование, потом венец перемещается в зацепление с прикатной частью и в течение нескольких секунд подвергается пластическому деформированию.

Другая модификация шевера-прикатника – это инструмент, сочетающий в себе геометрию шевера и накатника. В процессе работы осуществляется срезание тонких слоев стружки режущими кромками шевера и одновременно с этим выглаживание боковых поверхностей зубьев заготовки из-за профильного проскальзывания. Схема обкатки одним шевером-прикатником этой модификации приведена на рисунке 5



**Рисунок 5 – Схема обкатки одним шевером-прикатником**

Однако именно из-за сжимающих напряжений, образующихся при накатывании, последующая термическая обработка шестерни не представляется возможной, так как существует вероятность отслоения накатанного и впоследствии закаленного слоя из-за чрезмерного усиления сжимающих напряжений.

Область применения такого метода ввиду высокой стоимости специализированного инструмента и оборудования – крупносерийное производство незакаленных зубчатых колес. Такие используются в основном в автомобилестроении.

#### **Выводы**

Чтобы минимизировать отставание от ведущих мировых производителей, необходимо, во-первых, изучать их опыт и учиться на нем, а во-вторых, изобретать что-то свое, уникальное. А для изучения опыта необходимо систематизировать его и применять на практике, пытаясь оптимизировать зарубежные технические решения в рамках отечественной промышленности и для отечественных же производителей, исходя из особенностей как страны в целом, так и нюансов ее промышленности.

#### **Литература**

1. Инструментальные материалы современных червячных фрез. Локтев Д.А. Стружка. Журнал по металлообработке. № 3, 2007.
2. 3 катода – 30 типов покрытий – 300 циклов без смены катода (мишени). Т. Cselle, J. Prochazka. Стружка. Журнал по металлообработке. № 1-2, 2008.
3. Выбор рациональных конструкционных и эксплуатационных параметров червячных фрез. Лобанов А.А. Стружка. Журнал по металлообработке. № 1-2, 2008.
4. Экономическая эффективность применения современных червячных фрез. Локтев Д. А. Стружка. Журнал по металлообработке. № 3-4, 2008.
5. Phoenix II 275 G. Bevel-gear grinding machine. Cutting technology. 2002. № 9.
6. Шевингование-прикатывание цилиндрических зубчатых колес для повышения точности и качества обработанных поверхностей. Валиков Е.Н, Борискин О.И., Белякова В.А., Ямников А.С. Справочник. Инженерный журнал. 2008, № 4.