

# 3-х мерная числовая технология конструирования и производства зубчатых колес.

Лунин Степан Васильевич.

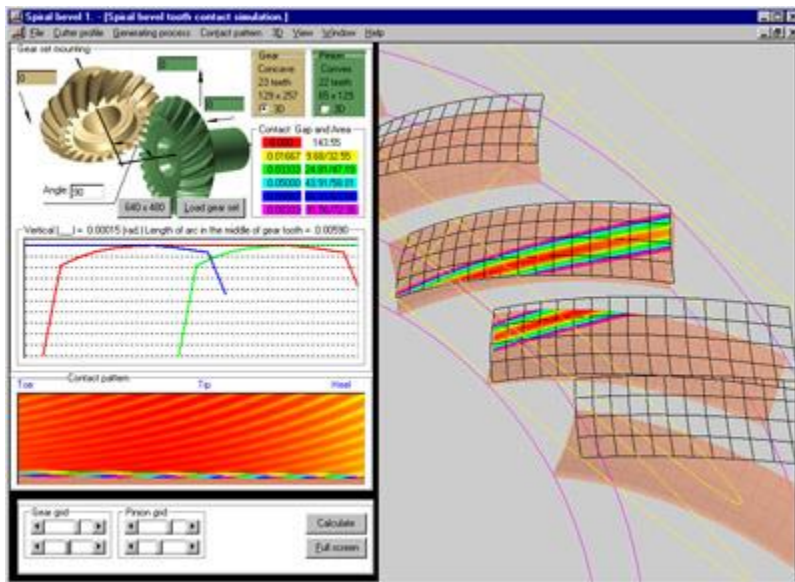
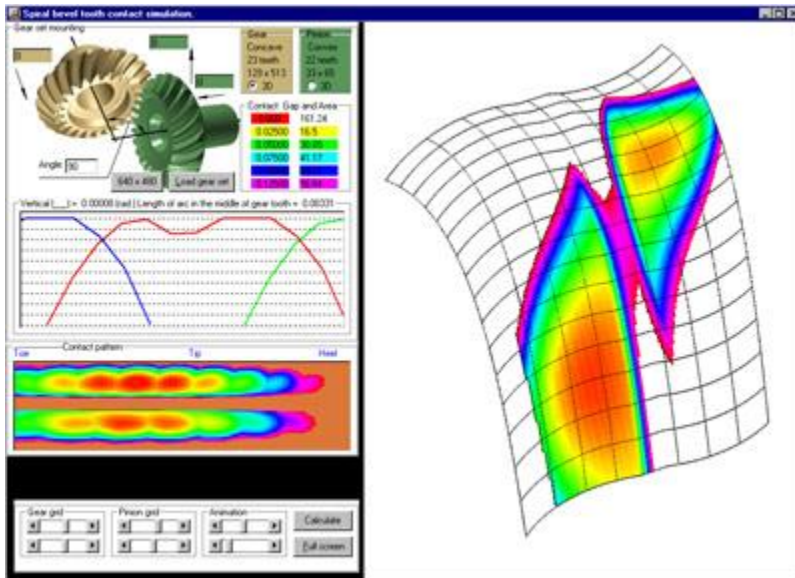
Спирально-коническая Корпорация.

Ирвин, Калифорния, США.

[Контактная форма и телефон здесь.](#)

## **Когда и где зародилась технология.**

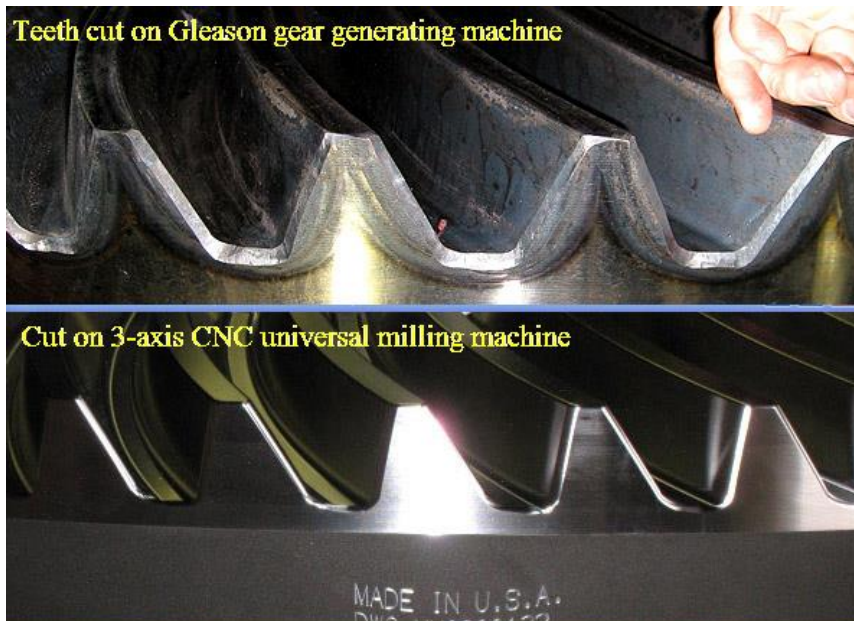
Попытки нарезать зубчатые колеса на универсальных станках ЧПУ были наверное всегда и в СССР и за пределами. Но практический всплеск произошел в 2009 году, когда в горнодобывающей промышленности возникли трудности с поставками спирально-конических колес размера от 1500мм. Я начал развивать эту технологию на МВЗ им Миля в 1986 году сначала технологом в цехе 19 под руководством Кречета Валентина Яновича и позднее в Технологическом Отделе Агрегатного Производства под руководством Авакова Юрия Михайловича. На МВЗ были трудности с расчетом наладок на станки Глисона, чтобы уменьшить количество итераций при доводке пятна контакта. Моя идея была в том, чтобы смоделировать пятно контакта математически исходя из предлагаемых наладок станка. Таким образом, наладки станка можно будет проверить и оптимизировать на математической модели без того, чтобы резать реальные колеса. Такую программу я опробовал на ЕС ЭВМ в отделе главного технолога, где я так-же был выбран секретарем комсомола. Моя программа потом помогла Герману Александровичу Журавлеву, ученому из Ростова-на Дону подтвердить кинематическую сопряженность Эвольвентно-Точечного Зацепления, которое в то время проходило испытания на стенде. В 1986 практически внедрить 3-х мерную технологию в производство не удалось, т.к. еще не было достаточно быстрых компьютеров, чтобы быстро обчислять модели колес и пятен контакта. Да и в цеху у Кречета В. Я. были очень опытные зуборезчики такие как Смирнов и Сизов. А в ТОАПе были Михалыч и Саша Андреев. Поэтому, внедрение компьютера, к тому-же недостаточно быстрого, тогда как-то не пошло. Но нет худа без добра. Позднее, в 1999, когда я работал на Дженерал Моторс, а потом на Вольво забытая идея с МВЗ всплыла и расцвела, т.к. время пришло - компьютеры подтянулись до необходимого уровня. В 2000 году родилась 3-х мерная программа, которую я доложил на конгрессе в Фукуоке и потом с Гольдфарбом Вениамином Вениаминовичем, известным во всем мире зубчатником из Ижевска, вместе развивали.



Герман Штадфелд, Ген. Конструктор Глисона, тогда этот метод и особенно 3-х мерную программу очень критиковал, как обман зрения. У Глисона до сих пор нет программы расчета пятна контакта с такой точностью как была на MB3 в 1986. Но главное, что не понравилось Глисона, это один побочный эффект программы, который мог похоронить монополию Глисона в конички, как потом и произошло. Побочным эффектом было моделирование реального 3-х мерного профиля зуба. Тогда уже многие производители колес охотились за возможностью моделировать 3-х мерный зуб идентичный тому, что выходит из под станка Глисона. Дело в том, что если есть правильная 3-х мерная модель зуба то нарезать коничку можно намного быстрее и дешевле без использования станков Глисона. Например с моими друзьями из Чикаго, Кейси и Марекком мы наладили производство цементированных спирально-конических пар для компании Metso Minerals практически с нуля всего за 2 месяца с начальным капиталом 60 т.д. получив наш первый заказ на 2 м.д.



Слева на право: я, Марек и Кейси на фоне станка, что мы купили в кредит (650 т.д. включая поворотный стол за 160 т.д.) и установили в 200 кв.м. гараже в Чикаго в 300 м от фирмы Овертон, которой я тоже помог с технологией предварительной нарезки в 2007-2008 т.к. у них уже были станки Клингелнберга для окончательной нарезки. Колесо на заднем плане 1700 мм в диаметре цементированное с окончательной нарезкой зуба после закалки в свободном вывешивании без закалочного пресса. Стол станка 4560мм позволял вес заготовки до 40т. Станок имел координатную контрольно-измерительную функцию, так, что можно было просканировать окончательный зуб и сравнить с 3-х мерной моделью.



На верхней фотографии крупным планом показан зуб на оригинале произведенном фирмой Brad Foote Gear Works - индукционная закалка зуба. Ниже, наше колесо - клон. Заказчик, Metso Minerals из Висконсина, попросил нас клонировать колеса их поставщика, чтобы уменьшить зависимость от существующей монополии. На нашем клоне отчетливо заметно мастерство металлообработки по сравнению с работой монополиста-поставщика из другого штата. В глаза бросаются такие наши незначительные детали как, почти зеркальная чистота поверхности зуба, идеально закругленные кромки по периметру зуба, оптимизированная с точки зрения напряжений выкружка впадины, и идеально отгравированная на ЧПУ метка "Сделано в США". Наше колесо цементированно, закалено в вывешанном состоянии ось горизонтально без

закалочного пресса. Закалочные поводки компенсированны и конечная глубина цементации выровняна по специальному методу, который возможен только при этой технологии нарезания и заслуживает отдельного разговора.



Зубья шестерни после закалки не протачивали т.к. ее силно не вело, да и поверхность зуба спроектировали на компенсацию возмжных поводок.

Metso Minerals, наш заказчик, испытывал колеса на натурном изделии на полигоне в Техасе. Пары собирали в разных комбинациях. Наша шестерня с нашим колесом, наше колесо с не нашей шестерней и наоборот. Наши колеса оказались плавнее и легче в сборке для достижения желаемого пятна контакта. Даже смешанные пары с нашими колесами были лучше, чем чисто чужие пары. В результате наши колеса стали продавать с 100-процентной наценкой как особо долговечные. А монополист, Brad Foote Gear Works, постовщик из другого штата сильно упал в цене и улучшил график поставок в 2 раза. Но позднее, я помог этому поставщику с технологией, т.к. они стали терять заказчиков, т.к. все их заказчики стали сами колеса нарезать без станков Глисона. Например, National Oil Varco (NOV) попросили помочь, и я им помог делать колеса для буровых столов на станках Mazak, что они и начали успешно делать сами в 2010.

Mazak потом стал много станков продавать под нарезание зуба и я им до сих пор помогаю с программами и теории колес.



Super modern machine CNC 5 axis in machining spiral bevel gear, MAZAK INTEGREX e-670H-II

[https://www.youtube.com/watch?v=q1\\_ksqJcYcl](https://www.youtube.com/watch?v=q1_ksqJcYcl)

Конечно 5-ти координатные станки немного дороже чем 3-координатный который был у меня, но все равно в 3 раза дешевле чем зуборезный Глисон и на нем можно не только зуб нарезать, но и все колесо проточить и отфрезеровать и корпус редуктора сделать. Но кроме Mazak много других подходящих станков. Я помогал фирмам Remacontrols, DMG Gildemeisted, Breton. Все они успешно режут конички на своих станках.

## **Часто задаваемые вопросы**

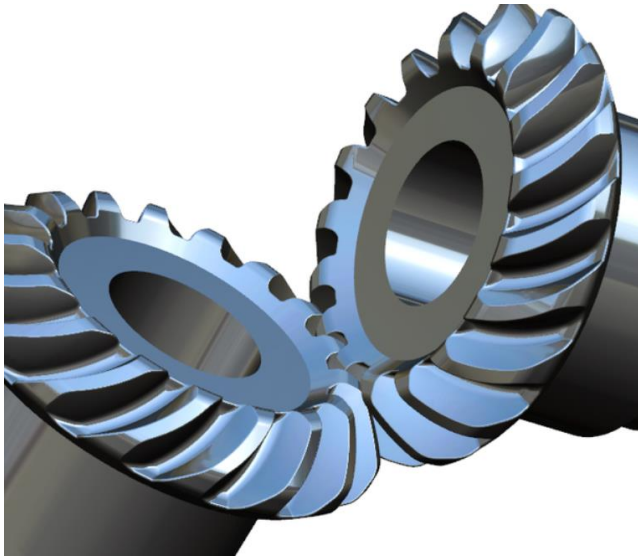
### **1. Какие типы и размеры колес можно нарезать?**

С 1999 года я продаю 3-х мерные модели практически всех типов колес для нарезания числовым методом. Гипоидные - особенно часто покупаются почему-то из Австралии для большегрузных грузовиков. Глобоидные - из Южной Африки. Плоские с цилиндрической шестерней - в США для вертолетов, медицины и приборов. Червячные редко кто покупает. Спиroidные (плоские червячные) покупают для механизмов электрического рулевого управления. Как ни старанно много покупают простых цилиндричек, но с малым числом зубьев, наверное из-за того, что моя программа правильно моделирует подрезание впадины зуба. Очень много продается переменного передаточного отношения шестерня/рейка для рулевого управления автомобилей. Спирально-конические колеса клиенты предпочитают моделировать сами покупая мои программки моделирования, которые очень недорогие и просты в применении. Ограничений по размерам нет. Но конечно стратегия нарезания должна быть правильно выбрана для достижения наилучшего результата.

### **2. А в авиации как обстоят дела с новой технологией?**

В авиации нарезанных по такому методу колес пока не видел. Это не потому, что в авиации метод не работает, а потому, что все вертолетные поставщики колес были выбраны до того как новая технология стала популярна. В консервативной авиации трудно изменить процесс если процесс уже утвержден. Но судя по всему скоро технология пойдет в авиацию т.к. не только цена и время производства сокращается, но и прочность колес увеличивается благодаря новым возможностям конструирования зуба, например как на этой модели:





<https://grabcad.com/library/spiral-bevel-miter-gear-set-1>

### **3. Какие можно применять материалы и виды термообработки?**

Материалы и термообработка аналогичны. Лично мы применяли 4320 цементированное и 4340 закаленное для горной индустрии. В вертолетостроении типовая цементируемая сталь 9310. Окончательная обработка цементированной поверхности HRC 64 производится специальной фрезой. Мы например платили 30 долл за шт карбидная 1/2 дюйма диаметром. Для сравнения Глисоновская резцовая головка обошлась бы в 20 т.д. плюс спец станок для сборки плюс спец станок для заточки плюс спец станок для заточки зубошлифовальный станок. Мы даже фрезы не перетачивали, а просто заряжали 20 шт в станок и станок менял их когда тупились.

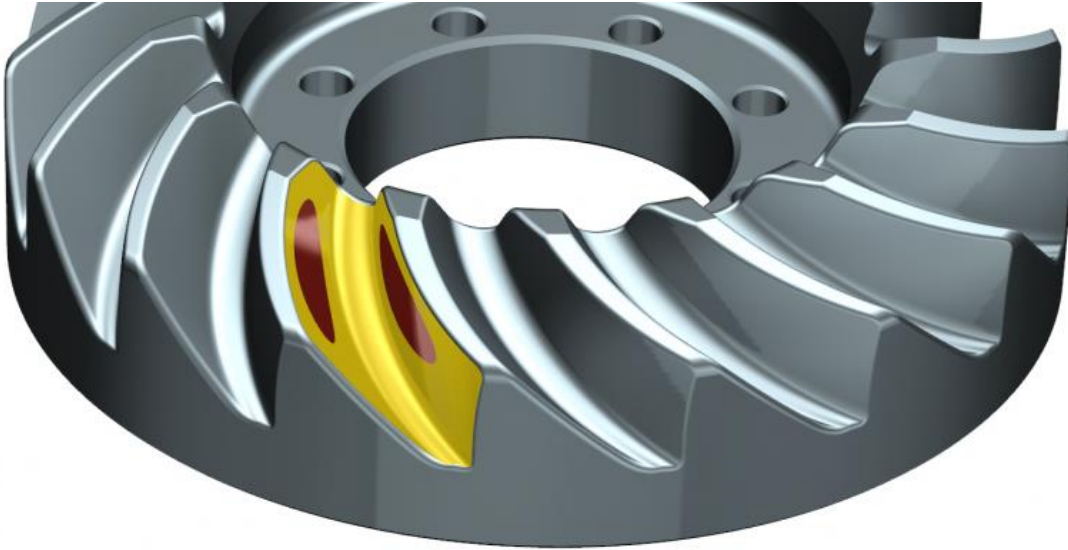
Закалку лучше всего делать в свободном состоянии без пресса, как мы и делали на 1600мм колесе. Закалка под прессом оставляет остаточные напряжения, которые могут неблагоприятно наложиться на рабочие напряжения. Закалочные поводки можно скомпенсировать числовым методом - подправить зубья на модели сохранив требуемую погрешность шага (локальную кинематическую погрешность). На Глисоне так сделать нельзя, а придется выкинуть почти законченную деталь если сильно повело при закалке.

### **4. Какое нужно программное обеспечение и оборудование?**

- Нужна простая и надежная программа для 3-х мерного моделирования зуба. Сейчас наверное около 10 фирм такие программы продают включая меня ([spiralbevel.com](http://spiralbevel.com)).

- Неплохо иметь программы моделирования пятна контакта как у меня. Но можно моделировать пятна и в стандартном CAD пакете, например в NX:

[http://www.spiralbevel.com/tca\\_in\\_cad](http://www.spiralbevel.com/tca_in_cad)



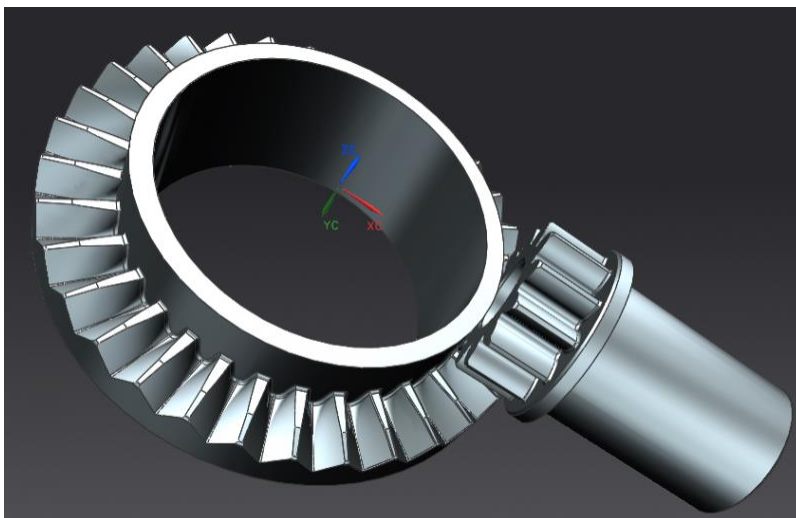
- Надо стандартную программу для программирования станка ЧПУ. Таких программ полно на любой вкус. Самая популярная [MasterCam](#).
- Надо программу для контрольно-измерительного станка, чтобы проверять правильность окончательного зуба по 3-х мерной модели.
- Надо станок ЧПУ
- Надо 3-х координатный измерительный станок
- Зуборезный Глисон не надо
- Зубошлифовальный не надо
- Контрольнообкатной не надо
- Станок для заточки резцовых головок не надо
- Станок для сборки резцовых головок не надо
- Станок для измерения кинематической погрешности не надо
- Закалочный пресс не надо
- Проверку на шлифовочные прижоги не надо
- Дорогие программы Глисона не надо
- Опытных зуборезчиков не надо, но надо опытных станочников универсалов

## 5. Какие преимущества и недостатки для авиации в сравнении с традиционным методом?

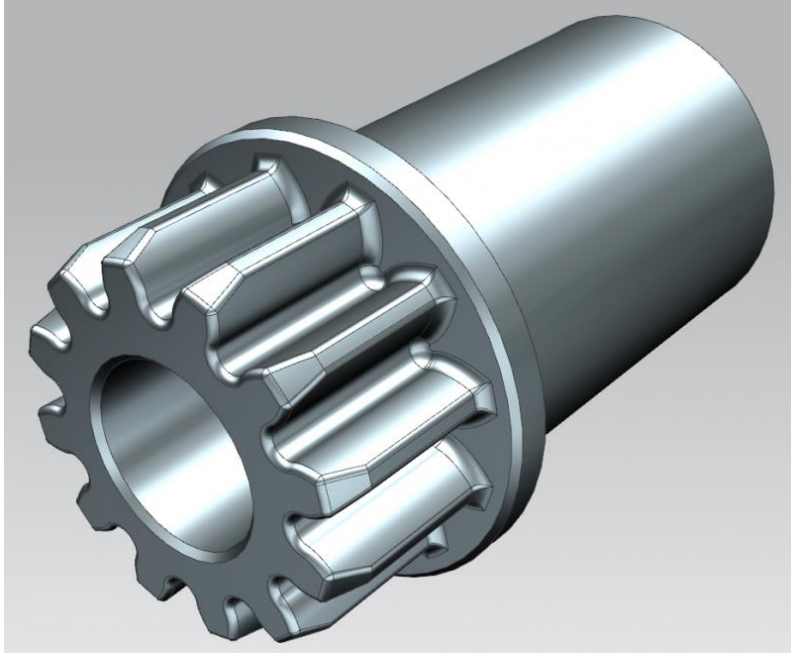
Главный и наверное единственный недостаток это консерватизм авиации. Поставщики уже владеют дорогими станками Глисона и не хотят осознать, что все чем они гордились уже не конкурирует. Например в Автомобильной промышленности Глисон побеждает продуктивностью. Но на Боинге мы не делаем 3000 колес в день как на General Motors. На Боинге мы делаем от силы 3000 за всю историю данного изделия, как бы штучное производство. Так, что единственное преимущество в скорости Глсону в авиации не помогает. В авиации, как в России так и в США проблема еще в том, что начальники в колесах не понимают. Поэтому они не планируют достаточно время и денег на доводку пятна контакта. В результате пятно контакта как-правило хуже оптимального. А на станках Глисона пятно надо доводить. В автомобильной промышленности на это есть деньги, а в авиастроении нет. Поэтому, нарезание на станках ЧПУ с 3-х мерных моделей в авиастроении выгоднее, т.к. пятно доводить не надо.

### Преимущества:

- Цена в разы меньше, чем на системе Глисона при одинаковом качестве. Особенно экономия налицо когда надо наладить новое производство колес с нуля как Кейси, Марек и я наладили в гараже в Чикаго за несколько недель.
- Колеса лучше по плавности и прочности благодаря возможности оптимизировать поверхность зуба.
- Меньше брака при закалке и при обработке. Естественным образом нет прижогов.
- Можно проектировать детали редукторов как раньше не было возможно из-за специфики инструмента Глисона. Вот пример:







- Легче контролировать конечную форму зуба на координатно-измерительном станке, а не по пятну. Пятно можно смоделировать для каждой конкретно изготовленной пары и проверить на влияние перекосов на компьютере.
- Не надо опытного зуборезчика, а надо опытного станочника универсала.
- Станки могут делать не только колеса но и многое другое.
- Технология развивается очень быстро, тогда как Глисон технология совсем не развивается.