

СТАТЬЯ

УДК 621.833

**АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ SKIVING МЕТОДА**

Шабаев А.А., Крапивина А.И.

Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережные Челны, e-mail: AAShabaev@kpfu.ru

Цель работы – анализ возможности повышения производительности и качества процесса нарезания зубчатых венцов Skiving методом за счет применения современных технологий повышения эффективности зубообработки за счет применения триботехнологий, технологий моделирования и повышения стойкости на основе применения покрытий. Согласно рассмотренным источникам, Skiving метод имеет ряд преимуществ. Он позволяет совмещать черновую и чистовую обработку, что значительно сокращает время и повышает производительность, обеспечивая высокую точность и качество обработки, что, в свою очередь, снижает уровень шума и вибраций в зубчатых передачах. При этом учитываются и отрицательные элементы: внедрение Skiving требует значительных финансовых затрат, этап производства требует точной настройки оборудования, а к инструменту предъявляются повышенные требования. Для снижения влияния рассмотренных факторов делается предположение о необходимости дополнительно шлифовать режущие инструменты и применять износостойкие покрытия, особенно после переточки, что увеличит срок службы инструмента и снизит износ. Применение азотирования режущих кромок может улучшить эксплуатационные характеристики инструмента и оптимизировать процесс обработки, а использование материалов с самосмазывающимися свойствами достаточно перспективно. В конечном итоге показано, что Skiving метод демонстрирует высокую производительность, точность и качество обработки. Он наиболее оптимален для серийного и массового производства. Однако следует учитывать высокую стоимость оборудования при внедрении в производство и необходимость точной настройки. Применение износостойких покрытий и компьютерного моделирования может значительно повысить эффективность и качество обработки зубчатых колес, а Skiving метод представляет собой перспективное направление, способное существенно повысить скорость и качество производственных процессов.

Ключевые слова: зубчатые колеса, Skiving метод, обработка металлов, точность обработки, износостойкость инструментов, моделирование

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SOME MODERN
TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY
OF GEAR PROCESSING FOR THE SKIVING METHOD**

Shabaev A.A., Krapivina A.I.

Naberezhnye Chelny institute, branch of the Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny, e-mail: AAShabaev@kpfu.ru

The article examines in detail the features of using the SKIVING method of cutting gear wheels, based on the mutual movement of the tool and the workpiece. The purpose of this work is to analyze the possibility of increasing the productivity and quality of the process of cutting gear rims by the SKIVING method through the use of modern technologies, increasing the efficiency of gear processing through the use of tribotechnologies, modeling technologies and increasing durability based on the use of coatings. According to the sources considered, the Skiving method has a number of advantages. It allows you to combine roughing and finishing, which significantly reduces time and increases productivity, ensuring high accuracy and quality of processing, which, in turn, reduces the level of noise and vibration in gears. At the same time, negative elements are also taken into account, such as the introduction of Skiving requires significant financial costs, and the production stage requires fine-tuning of the equipment, and increased requirements imposed on the tool. To reduce the impact of the factors considered, an assumption is made about the need to additionally grind cutting tools and use wear-resistant coatings, especially after resharpening, which will increase the service life of the tool and reduce wear. The use of nitriding of cutting edges can improve the performance characteristics of the tool and optimize the processing process, and the use of materials with self-lubricating properties is quite promising. Ultimately, it is shown that the Skiving method demonstrates high productivity, accuracy and quality of processing. It is most optimal for serial and mass production. However, one should take into account the high cost of equipment when implementing it in production and the need for fine-tuning. The use of wear-resistant coatings and computer modeling can significantly improve the efficiency and quality of gear processing, and the Skiving method is a promising direction that can significantly increase the speed and quality of production processes.

Keywords: gears, Skiving method, metalworking, precision machining, tool wear resistance, modeling

Введение

Несмотря на изменяющееся направление развития общества зубчатые колеса имеют также большое значение в совре-

менных устройствах. Сама форма зубчатых колес накладывает определенные ограничения и сложности при их получении. Сегодня условно можно выделить три класса

производства зубчатых колес: классические методы, прогрессивные методы и перспективные методы [1].

К классическим методам можно отнести долбление, где процесс включает в себя последовательное вырезание зубьев с использованием долбежного станка и метод обкатки (hobbing), где используется специальная фреза, которая постепенно формирует профиль зуба. Также сюда можно отнести и шевингование (shaving), где поверхность зубьев формируется специальными инструментами – шеверами, а также метод электроэрозионной обработки (EDM), где материал удаляется с помощью электрических разрядов.

К прогрессивным методам можно отнести: метод обкатывания (rolling), где зуб формируется путем пластической деформации материала; метод лазерной резки (laser cutting), где используется лазер для формирования профиля зубьев; метод Skiving, где синхронное перемещение инструмента и заготовки дают не только повышенную производительность и точность, но и позволяют совмещать черновую и чистовую обработку.

К перспективным методам можно отнести: метод аддитивного производства (3D printing), где основой является послойное наращивание материала для создания профиля зуба, и различные современные методы термообработки и химико-термической обработки, которые позволяют не только формировать зуб, но и улучшать его механические свойства. Конечно, разделение чисто условное, и методы, отнесенные к перспективным или прогрессивным, обусловлены текущим уровнем развития техники и технологии.

Сам процесс получения зубчатых колес до сих пор сталкивается с рядом проблем, связанных с требованием качества производительности и экономичности. Перечислим основные из них.

Первый ряд проблем связан с материалом зубчатых колес. Сам принцип работы зубчатых колес связан с трением и усилиями, приходящимися на каждое зубчатое колесо по отдельности. В связи с этим накладываются определенные требования к материалу зубчатых колес, такие как прочность износостойкость. К тому же зубчатое колесо постоянно подвергается изгибающим нагрузкам. Увеличенная твердость современных сплавов усложняет их механическую обработку и требует применения специализированных технологий. Применение термических воздействий изменяет геометрические параметры зубьев.

Во-вторых, стоит обратить внимание на режущий инструмент. Основной современ-

ной проблемой является повышение производительности, как следствие, это приводит к повышенным температурам в зоне обработки, которые влияют на геометрию инструмента и ухудшение его режущих свойств и стойкости. На точность профиля и качество обработки также значительно влияет износ инструмента. Это требует частой замены или восстановления инструментов, что увеличивает затраты и время простоя.

Стоит выделить точность и качество обработки, причем малейшие отклонения от требуемого профиля зуба приводят к проблемам в работе зубчатых передач – вызывают шумы, вибрации и, как следствие, повышенный износ. Все это сказывается на дальнейшей эксплуатации зубчатых колес.

Отдельно стоит выделить такую характеристику, как производительность: длительное время цикла обработки снижает общую производительность производства. Сложность профиля создает проблемы с автоматизацией и интеграцией искусственного интеллекта в производственный процесс на текущем уровне развития технологий. Сюда же можно добавить экономические аспекты, такие как затраты на более производительное и сложное оборудование. Стоит также отметить экологические требования, которые не будем выводить в отдельный пункт.

На основе представленного краткого анализа методов обработки зубчатых колес можно выделить на сегодняшний день Skiving метод как наиболее оптимальную технологию. Ее и будем далее рассматривать.

Цель данной работы – анализ возможности повышения производительности и качества процесса нарезания зубчатых венцов Skiving методом за счет применения современных технологий повышения эффективности зубообработки за счет применения триботехнологий, технологий моделирования и повышения стойкости на основе применения покрытий.

Материалы и методы исследования

В первую очередь Skiving метод позволяет совмещать черновую и чистовую обработку, что значительно сокращает время обработки и повышает производительность производства. При этом сам метод высокопроизводителен. Это особенно важно для серийного и массового производства зубчатых колес. Следует заметить, что только в этих типах производства Skiving и будет целесообразен. Кроме очевидных причин, таких как высокая производительность (в массовом производстве требуется обрабатывать большое количество зубчатых колес за короткое время), есть экономические

составляющие: снижение себестоимости, то есть каждая экономия на временных и ресурсных затратах масштабируется на большее количество изделий, что существенно снижает себестоимость продукции. Первоначальные инвестиции в оборудование при внедрении рассматриваемого метода требуют дорогостоящего специализированного оборудования, а в массовом производстве высокая производительность компенсирует эти первоначальные затраты. Важным фактором также является стабильное качество. В массовом производстве важно поддерживать стабильно высокое качество продукции.

Во-вторых, Skiving обеспечивает высокую точность и качество обработки поверхности зубьев. Сам метод подразумевает использование специализированных инструментов, и их низкое качество не позволит изготовить зубчатое колесо. Специализированный инструмент всегда учитывает особенности его использования. Это помогает минимизировать отклонения в профиле зубьев, чего трудно добиться при использовании стандартного инструмента, а основная задача по их компенсации перекладывается со стандартного инструмента на технологическое оборудование. Специальный инструмент обычно более устойчив к износу за счет оптимизации своей конструкции и выверенного использования износостойких покрытий (например, на основе нитридов или карбидов). Конструкция специализированного инструмента и его зажимного приспособления всегда подразумевает минимизацию трения и нагрева, а это позволяет избежать перегрева, деформаций и ухудшения качества поверхности формируемой поверхности колеса. Специализированные инструменты разрабатываются с учетом специфики процесса обработки, а это позволяет контролировать параметры резания, такие как глубина реза, скорость и подача, более точно, что обеспечивает стабильное высокое качество при серийном производстве.

Несмотря на заявленные преимущества, Skiving метод сталкивается с рядом проблем, которые необходимо учитывать при его внедрении на производство. Первая и главная проблема связана с точностью настройки оборудования и инструмента. Поскольку Skiving метод требует взаимного синхронного перемещения относительно друг друга заготовки и режущего инструмента, даже незначительные отклонения в настройке приводят к значительным дефектам в профиль зубьев. Для достижения необходимой точности требуются значительное время и усилия на настройку

оборудования и инструмента. Это приводит к увеличению начальных затрат на производство. Требуется более квалифицированный персонал для выполнения этих операций, а значит, и высокооплачиваемый. Неправильная или неточная настройка оборудования приводит к производству бракованных изделий, а увеличение брака не только увеличивает затраты на материалы и инструменты, но и замедляет производственный процесс, что, в свою очередь, дополнительно увеличивает общие затраты на производство. Высокая точность требует регулярного обслуживания и калибровки оборудования, что приводит к более частым остановкам на техническое обслуживание, а это снижает общую производительность. Использование специализированных инструментов требует дополнительных инвестиций в специализированное оборудование хранения и доставки, что повышает общую стоимость производства. Кроме того, такие инструменты имеют более короткий срок службы при недостаточном уходе. Высокая точность настройки, как отмечалось выше, требует квалифицированного персонала, что дополнительно приводит к дополнительным затратам, связанным с повышением квалификации и удержанием специалистов, а недостаточная квалификация персонала приводит к ошибкам.

Второй важной проблемой является быстрый износ инструмента. Сам метод обработки подразумевает высокие механические и тепловые нагрузки. Это приводит к повышенному износу режущих кромок инструмента. Высокие нагрузки могут приводить к возникновению микротрещин деформации инструмента, что приводит к непрогнозируемому выходу инструмента из строя, а это также негативно влияет на производительность [2].

Термомеханические воздействия, возникающие при обработке, представляют собой еще одну проблему. Высокие температуры, возникающие в процессе резания, могут вызывать термическое расширение и деформации как обрабатываемой детали, так и инструмента [3]. Это требует стабильной системы охлаждения и повышенные требования к СОЖ.

Стоит обратить внимание, что Skiving метод достаточно легко внедряется в автоматизированное производство. Skiving метод позволяет и требует точно контролировать параметры обработки, такие как скорость, подача, и глубина резания, а также взаимное перемещение заготовки и инструмента. Станки, формирующие зубчатый профиль, включают сенсоры и датчики, которые контролируют параметры процесса в реальном

времени. Это позволяет оперативно реагировать на изменения в работе оборудования, предотвращать возможные сбои и увеличивать надежность процесса. Использование программируемых логических контроллеров (PLC) и компьютерных систем управления (CNC) позволяет снимать, контролировать и учитывать параметры обработки, такие как скорость, подача и глубина резания. Автоматизированные системы проектирования и системы компьютерного управления производством позволяют легко внедрять программное обеспечение, необходимое для использования Skiving. Инженеры могут использовать цифровые модели зубчатых колес, которые затем автоматически переводятся в программы для станков [4]. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения легко интегрируется в системы Skiving. Алгоритмы способны анализировать данные о производственном процессе и реализуют оптимизацию обработки. Автоматическое производство всегда использует автоматические системы загрузки и выгрузки заготовок и инструмента. А производство подразумевает использование магистральной подачи охлаждения и смазки.

Несмотря на то, что ранее было заявлено, что Skiving метод замечательно автоматизируется, следует отметить, что происходит автоматизация целой станочной системы, а автоматизировать отдельные процессы крайне сложно. Как было сказано выше, стабильность обработки не всегда прогнозируема, а это значительно усложняет автоматизацию процессов целом для остальных участников автоматизированной цепочки [5].

Экономические аспекты также можно отнести и к отрицательным факторам. Высокая стоимость специализированного оборудования может стать серьезным барьером для его широкого применения, особенно для малых предприятий. Постоянные настройки и калибровка оборудования требуют высококвалифицированных специалистов [5]. Экономические аспекты также играют важную роль. Высокая стоимость специализированного оборудования и инструмента для Skiving может стать серьезным барьером для его широкого применения, особенно в небольших производствах. Кроме того, необходимость регулярного технического обслуживания и калибровки оборудования увеличивает эксплуатационные расходы.

Таким образом, несмотря на все преимущества, метод Skiving требует тщательного подхода к внедрению, настройке и контролю параметров обработки, а также значительных инвестиций в специализированное оборудование и инструменты.

Результаты исследования и их обсуждение

Skiving метод является эффективным методом получения зубчатых колес. Как было показано, точность качества обработки в значительной степени зависит от состояния инструмента и предварительных настроек оборудования. Для повышения качества обработки предлагается шлифовать режущие инструменты. Шлифование обеспечивает высокую геометрическую точность режущего инструмента. Это минимизирует трение и износ во время процесса резания, и откладывает микроразрушение режущих зубьев, а также улучшает качество обработки зубчатого колеса на микроуровне.

Статье [6] предлагается повышать стойкость инструмента за счет износостойких покрытий зуба режущего инструмента. Это должно оказать значительное влияние на сроки использования инструмента и качества полученной поверхности изделия. Износостойкие покрытия на современном инструменте играют ключевую роль в повышении эффективности обработки. Они применяются для улучшения твердости и снижения трения режущего инструмента во время работы. Такие покрытия чаще всего состоят из твердых материалов на основе нитридов или карбидов металлов. Покрытия наносятся методами физического или химического осаждения из паровой фазы состояния вещества [7].

В статье [8] рассматриваются примеры азотирования режущего инструмента. Сам процесс азотирования представляет собой проникновение атомов азота в поверхностный слой материала детали, что приводит к формированию азотированного слоя, повышающего твердость. Еще один полезный эффект от азотирования – это хорошая адгезия азотированного слоя со смазочными материалами. Азотирование обычно повышает твердость, но инструмент испытывает ударные нагрузки, и добиться желаемого эффекта без снижения основных эксплуатационных характеристик крайне сложно.

Один из возможных способов добиться желаемого эффекта – возможность применения моделирования. Использование компьютерных моделей позволяет учитывать различные факторы, влияющие на процесс резания, начиная от расчета параметров режимов резания и выбора оптимальных технологических решений до оценки влияния геометрических параметров и материалов на конечные характеристики выпускаемого продукта [9]. Возможно, ключевым преимуществом моделирования является возможность проведения множе-

ства виртуальных экспериментов без необходимости физического изготовления и испытаний прототипов. Это сокращает время и затраты на разработку новых технологий и улучшение существующих процессов обработки зубчатых колес, повышению качества производства, снижению брака [10].

Skiving обработка – достаточно сложный процесс, требующий значительных затрат на подготовку производства, контроль производственных параметров. Как было сказано выше, Skiving метод требует качественной доставки смазочно-охлаждающих материалов в зону обработки, и при этом ключевой проблемой является неожиданный выход инструмента из строя. Одним из вариантов решения сложившейся проблемы авторы видят возможность самосмазывающих включений в материал [11]. Такие материалы должны обладать способностью самостоятельно смазываться в процессе обработки и задерживать на себе смазочные вещества. Свойства, которые должны закладываться к применяемому материалу с эффектом самосмазывания, должны учитывать специфику эксплуатационных условий, химическую совместимость, устойчивость к высоким температурам и агрессивным средам. Интеграция свойств самосмазывания должна быть осуществлена как в заготовку зубчатого колеса, так и в обрабатывающий инструмент [12]. Интеграция самосмазывающихся материалов не только в заготовки зубчатых колес, но и в инструмент, как нам кажется, представляет собой перспективное направление, которое может значительно улучшить их эксплуатационные характеристики и эффективность процесса производства.

Заключение

В данной статье проведен анализ современных методов повышения эффективности обработки зубчатых колес, с особым акцентом на Skiving метод. Этот метод продемонстрировал высокую производительность, точность и качество обработки, что делает его оптимальным для серийного и массового производства. Однако его внедрение связано с определенными трудностями, такими как высокая стоимость оборудования и необходимость точной настройки. Применение износостойких покрытий и компьютерного моделирования может значительно повысить эффективность и качество обработки зубчатых колес. В целом Skiving метод представляет собой перспективное направление, способное су-

щественно повысить качество производственных процессов.

Список литературы

1. Хусаинов Р.М., Паренкина Е.В. Оценка показателей точности нарезаемого колеса с учетом погрешностей технологической системы // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. 2013. № 1. С. 216–220.
2. Gilman V.N., Balabanov I.P., Faskhutdinov A.I. Improving the efficiency of shaving through the use of wear-resistant coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Казань, 05–07 декабря 2018 г.). Vol. 570. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012024.
3. Gilman V.N., Faskhutdinov A.I., Balabanov I.P. Increase effectiveness of shaving by using wear-resistant coatings and preliminary modeling cutting // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 839–844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.839.
4. Khusainov R.M., Khaziev R.R. Mathematical Model for Assessing the Accuracy of Processed Gears on Gear Shaping Machines // Procedia Engineering Vol. 206. 2017. P. 1087–1092. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.599.
5. Gilman V.N., Fashutdinov A.I., Balabanov I.P. Experience in the application of nitriding in a glow discharge to increase the efficiency of gear processing by the method of grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Казань, 04–06 декабря 2019 г.). Kazan, 2020. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012014.
6. Wang W., Arif A.F.M., Veldhuis S.C. [et al.] Effects on tool performance of cutting edge prepared by pressurized air wet abrasive jet machining (PAWAJM) // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 277. P. 116456. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116456.
7. Garcia J., Pitonak R., Weissenbacher R., and Kopf A. Production and characterization of wear resistant Ti (C, N) coatings manufactured by modified chemical vapor deposition process // Surface & Coatings Technology. 2010. № 205. P. 2322–2327.
8. Гильман В.Н., Фасхутдинов А.И., Балабанов И.П. Опыт применения азотирования в тлеющем разряде для повышения эффективности обработки шестерни методом зуботочения // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК «ИМТОМ – 2019»): материалы X Международной научно-технической конференции (Казань, 05–06 декабря 2019 г.). Т. 2. Казань: Акционерное общество «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2019. С. 226–229.
9. Balabanov I.P., Balabanova Yu., Agayev A. Development of a Parametric Model for Calculating Cutting Forces in External Cylindrical Turning of 16MnCr5 Steel // Key Engineering Materials. 2024. Vol. 979. P. 11–18. DOI: 10.4028/p-4xsctu.
10. Балабанов И.П., Балабанова О.Н., Гильман В.Н. Разработка параметрической модели расчета сил резания при наружном цилиндрическом точении стали 20crmnti // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК «ИМТОМ – 2019»): материалы X Международной научно-технической конференции (Казань, 05–06 декабря 2019 г.). Т. 2. Казань: АО «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2019. С. 7–11.
11. Балабанов И.П. Обзор триботехнических самосмазывающихся материалов на основе полимеров // Молодой ученый. 2015. № 12–1 (92). С. 9–12.
12. Leushin I.O., Leushina L.I., Balabanov I.P., Savin I.A. Production of moulding cores and waterglass mixtures using “dry ice” for steel and iron casting // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 21. P. 34–37. DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.05.