

Бородин Максим Игоревич,
Магистр
Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

***Аннотация:** В статье проведён сравнительный анализ традиционных методов изготовления зубчатых колёс и современных аддитивных технологий. Рассмотрены показатели точности, шероховатости поверхности, механических свойств и экономической эффективности производства. Показано, что традиционные технологии обеспечивают более высокое качество рабочих поверхностей и стабильность характеристик, тогда как аддитивные методы обладают преимуществами при изготовлении сложнопрофильных и единичных изделий. Сделан вывод о перспективности гибридного подхода, сочетающего аддитивное формирование заготовки и последующую механическую обработку.*

***Ключевые слова:** зубчатые колёса, аддитивные технологии, SLM, DMLS, зубофрезерование, зубошлифование, шероховатость поверхности, себестоимость, гибридное производство.*

***Abstract:** The article provides a comparative analysis of traditional methods for manufacturing gears and modern additive technologies. It examines the accuracy, surface roughness, mechanical properties, and economic efficiency of these methods. The article shows that traditional technologies provide higher quality working surfaces and stable characteristics, while additive methods have advantages for manufacturing complex-shaped and single-piece products. The article concludes that a hybrid*

approach combining additive manufacturing and subsequent mechanical processing is promising.

Keywords: *gears, additive technologies, SLM, DMLS, gear milling, gear grinding, surface roughness, cost, hybrid production.*

Зубчатые колёса являются одними из наиболее распространённых деталей машин и широко применяются в автомобильной промышленности, станкостроении, авиации и робототехнике. Традиционно их изготовление осуществляется методами механической обработки: зубофрезерованием, зубодолблением и последующим шлифованием [1]. Развитие аддитивных технологий привело к появлению возможности изготовления зубчатых колёс методом селективного лазерного сплавления металлических порошков [2].

Традиционные методы обеспечивают получение зубчатых колёс 5–6 степени точности после шлифования. Шероховатость поверхности составляет Ra 0,2–0,8 мкм, что позволяет использовать изделия в высоконагруженных передачах [3].

При аддитивном производстве шероховатость поверхности после печати обычно находится в пределах Ra 6–12 мкм, а точность размеров уступает показателям традиционной обработки. Поэтому напечатанные зубчатые колёса требуют дополнительной механической обработки рабочих поверхностей [4].

Сравнение механических свойств зубчатых колёс, изготовленных традиционными и аддитивными методами, показывает неоднозначную картину. Детали из стали 40X, обработанные по традиционной технологии с последующей термообработкой, демонстрируют предел прочности на уровне 900–1100 МПа и твёрдость поверхности 58–62 HRC после цементации и закалки. Образцы, полученные методом SLM из порошка нержавеющей стали 316L или инструментальной стали H13, при оптимальных параметрах печати обеспечивают предел прочности 600–850 МПа, однако уступают традиционным

аналогам по усталостной прочности вследствие остаточной пористости и анизотропии микроструктуры [2]. Горячее изостатическое прессование (ГИП) позволяет устранить большую часть дефектов и повысить усталостную прочность аддитивных заготовок на 15–25 %, приближая их характеристики к литым или кованым деталям.

Отдельного внимания заслуживает вопрос контроля качества изделий, изготовленных аддитивными методами. Традиционные технологии обеспечивают стабильность характеристик от партии к партии, тогда как при 3D-печати на результат существенно влияют качество исходного порошка, влажность рабочей среды, настройки лазера и ориентация детали при построении. Это обуславливает необходимость 100-процентного входного и выходного контроля аддитивных изделий, включая компьютерную томографию для выявления внутренней пористости. Данное обстоятельство увеличивает стоимость единичных и мелкосерийных партий, но не является критичным препятствием для применения технологии при изготовлении высокоответственных деталей в аэрокосмической и медицинской отраслях.

Для серийного производства традиционные методы остаются наиболее экономически выгодными благодаря высокой производительности оборудования и снижению удельной себестоимости при увеличении объёма выпуска. Аддитивные технологии позволяют отказаться от дорогостоящей оснастки и сократить сроки подготовки производства, что особенно важно при изготовлении прототипов и мелкосерийных изделий [5].

Наиболее перспективным направлением является применение гибридных технологий. В этом случае заготовка формируется методом 3D-печати, после чего выполняются термообработка, горячее изостатическое прессование и финишное зубошлифование. Такой подход позволяет снизить массу изделия, уменьшить расход материала и обеспечить высокое качество рабочих поверхностей [6].

Проведённый анализ показал, что аддитивные технологии в настоящее время не могут полностью заменить традиционные методы изготовления зубчатых колёс. Однако их применение эффективно при производстве опытных образцов, ремонте и изготовлении деталей сложной геометрии. Для высоконагруженных передач наиболее рациональным является гибридный подход, сочетающий преимущества аддитивного и субтрактивного производства.

Список литературы:

1. Старжинский В. Е., Шилько С. В., Шалобаев Е. В. Технология производства зубчатых колёс из термопластичных полимерных материалов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4. № 2. С. 6–31.
2. Metals. Additive Manufacturing Technologies for Metal Components. 2025. Vol. 15. No. 10.
3. Which Type of Gear Machining Is More Accurate? URL: <https://m.delinggearbox.com/info/which-type-of-gear-machining-is-more-accurate-102958010.html>
4. Additive Manufacturing for Gears: When It's Ready and When It's Not. URL: <https://geartechnologyindia.com/additive-manufacturing-for-gears-when-its-ready-and-when-its-not/>
5. Technical and Economic Analysis of Alternative Manufacturing Technologies // Lviv Polytechnic National University. 2025.
6. Управление надёжностью технологических процессов зубообработки / П. А. Гудков, В. А. Брюхов // Вестник Курганского государственного университета. 2011. № 20. С. 63–64.