

*В. В. Стражев, Е. М. Фролов, Ю. Л. Чигиринский, А. В. Рогачев*

## **ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: strajev.v@yandex.ru

В работе проанализированы методы повышения качества лезвийной обработки, разделенные на три группы: организационные методы, реализованные на этапе подготовки производства; организационные методы, реализованные на этапе механической обработки; технологические методы.

*Ключевые слова:* качество поверхности, стабильная обработка, проблемы при лезвийной обработке, методы обработки.

*V. V. Strazhev, E. M. Frolov, Yu. L. Tchigirinsky, A. V. Rogachev*

## **REVIEW OF METHODS FOR IMPROVING THE QUALITY OF LAPE PROCESSING**

**Volgograd State Technical University**

The work analyzes methods for improving the quality of blade processing, divided into three groups: Organizational methods implemented at the preparation stage; Organizational methods implemented on the machine; Technological methods.

*Keywords:* surface quality, stable processing, problems in blade processing, processing methods.

### **Актуальность исследования**

Постоянное повышение требований к изделиям машиностроения влечет за собой изменение номенклатуры материалов, обработка которых требует новых подходов и совершенствования технологий [4,5], разработку новых режущих материалов, способных работать в тяжелых условиях обработки [1], построение новых математических моделей, описывающих процессы лезвийной обработки, развитие автоматизированных систем поддержки маршрутно-операционного проектирования и т. д. В на-

стоящее время лезвийная обработка продолжает оставаться наиболее распространенным способом формирования формы и качества поверхностей деталей машиностроительных изделий и от ее качества зависит итоговое качество получаемых продуктов.

Рассмотренные в статье методы распределялись согласно алгоритму, так как разработать четкую и, в особенности, долгосрочную классификацию представляется затруднительным в виду достаточно интенсивного и разнонаправленного развития отрасли (рисунок).

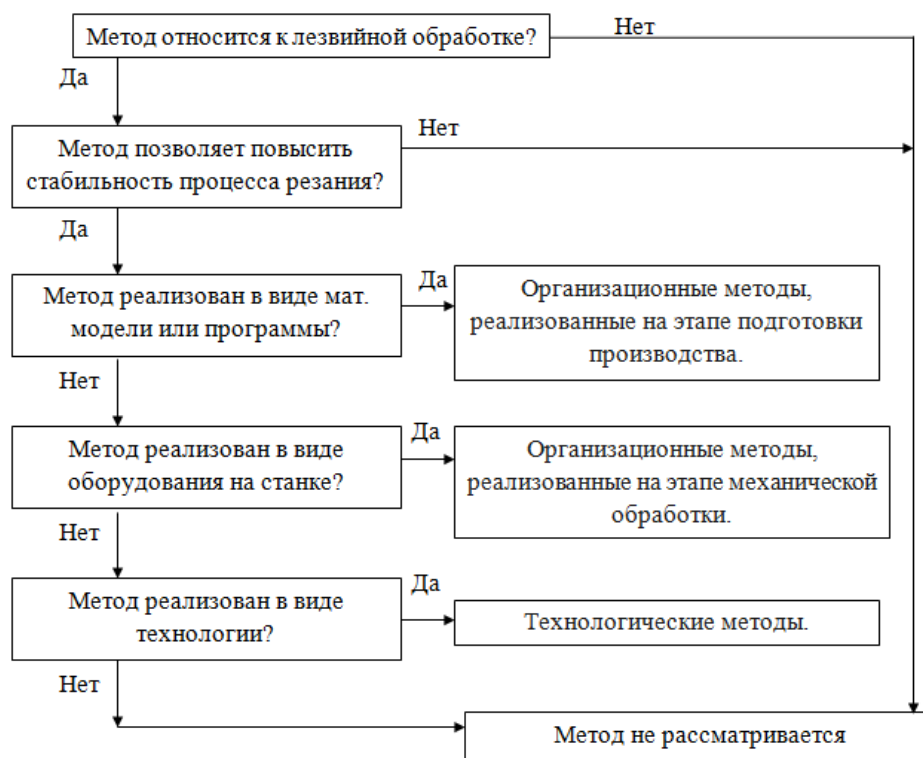


Схема распределения методов повышения качества лезвийной обработки

#### Организационные методы, реализованные на этапе подготовки

В работе [12] А. Р. Ингеманссон отмечает, что нестабильность процесса лезвийной обработки выражается в колебаниях температурно-силовых характеристик стружкообразования и контактного взаимодействия, вследствие чего отсутствует стабильное получение качества поверхности и работоспособности режущего инструмента. Автор выделяет следующие факторы, влияющие на возмущение системы: непостоянство физико-механических свойств обрабатываемого материала, непостоянство припуска, колебания жесткости, температурные деформации элементов технологической системы, изнашивание режущего инструмента. На основе результатов многоуровневых полных факторных экспериментов автором были построены математические зависимости для определения величины подачи, обеспечивающей шероховатость обработанной поверхности, требуемую техническими требованиями к готовому изделию.

В работе [3] авторы *Guillem Quintana* и *Joaquim Ciurana* провели глубокий литературный обзор проблем вибраций, возникающих во время лезвийной обработки. Так, определены три вида колебаний, возникающих в процессе обработки, которые влекут за собой три различных типа механических вибраций:

– свободные колебания, возникающие из-за разбалансировки механической системы. При съеме металла эти свободные вибрации появляются, например, в результате неправильного определения траектории инструмента, что приводит к столкновению режущего инструмента с заготовкой;

– вынужденные колебания, которые возникают из-за гармонических возбуждений. Основным источником вынужденных вибраций в процессах фрезерования является вход режущей кромки в заготовку и выход из нее. Однако вынужденные вибрации также связаны, например, с несбалансированными подшипниками или режущими инструментами, либо могут передаваться от других станков через пол цеха;

– самовозбуждающиеся колебания, возникающие в результате взаимодействия между режущим инструментом и заготовкой во время процесса обработки. Этот тип вибрации приводит систему к неустойчивости и является наиболее нежелательным и наименее контролируемым.

Авторы выделили четыре стратегии устранения возникающих колебаний:

1) стратегии прогнозирования, оценки или идентификации *SLD (Stability Lobe Diagrams* англ. – диаграммы устойчивости) посредством моделирования процесса обработки и аналитически-экспериментальных методов;

2) стратегии, посредством сенсорных технологий, мониторинга процесса и обработки сигналов выявляющие или распознающие вибрации;

3) пассивные стратегии, изменяющие или модифицирующие поведение системы и улучшающие ее производительность, удаляя колебания.

4) активные стратегии, которые ориентированы на использование элементов, устройств или исполнительных механизмов, которые активно изменяют поведение системы для подавления колебаний, как только они возникают.

В работе [13] авторы В. В. Краев и Г. Г. Крушенко отмечают, что на этапе разработки технологического процесса часто завышаются припуски на механическую обработку, что влечет за собой перерасход материала, износ инструмента, увеличение трудоемкости и электроэнергии. Припуски назначают на основе нормативных величин и справочных материалов, без учета состояния поверхностного слоя заготовки. Следовательно, существует потребность в назначении минимально необходимого припуска на механическую обработку.

Так для решения этой проблемы авторы разработали методику расчета припусков и допусков на механическую обработку.

В работе [14] авторы исследовали структуры схем процесса резания, в результате чего разработали структурную схему взаимосвязей входных параметров процесса резания, которая может быть использована для разработки систем управления, совершенствования математического моделирования и оптимизации процессов резания.

В работе [7] авторы разработали 3D модель процесса сверления отверстия диаметром 30 мм и определили факторы, оказывающие наибольшее влияние на возникновение вибрации, влияющей на формирование обработанной поверхности. А именно, длина державки инструмента, скорость подачи, скорость резания, величина волнистости поверхности заготовки. Так же авторами разработана нейросеть, которая предсказывает силу резания и шероховатость, на основе длины державки, величины волнистости поверхности заготовки, скорости резания, подачи. Точность составила 91 % для силы резания и 80 % для шероховатости. Авторы отмечают, что ошибка прогнозирования все еще велика и необходимо увеличить количество исходных данных для обучения нейросети.

#### **Организационные методы, реализованные на этапе механической обработки**

При расчете параметров процесса лезвийной обработки металла возникает неточность из-за использования усредненных значений безразмерных силовых, скоростных и поправочных коэффициентов на свойства обрабатываемого материала и материала режущего инструмента. Разность расчетных и фактических значений параметров процесса лезвийной обработки может достигать полуторной или даже двукратной величины. Решением этой проблемы может быть предварительная оценка физико-химических свойств каждой конкретной контактной пары инструмент – обрабатываемый материал по величине термоЭДС посредством интеллектуального устройства, позволяющего получить наиболее точные числовые значения частоты вращения и подачи, так как при расчете учитываются возможности станка, режущие возможности инструмента, состояние заготовки [10–11]. Определение оптимальных режимов интеллектуальным устройством и внесение их в УЧПУ станка в автоматическом режиме позволяет уменьшить время технологической подготовки производства, а также исключить риск возникновения ошибки из-за человеческого фактора [18, 20–25].

При обработке сварных соединений разных материалов переход инструмента из одного материала в другой сопровождается возникновением вынужденных колебаний. Вследствие этого возникают глубокие риски и задиры, что, как правило, недопустимо. Для решения этой проблемы авторы работы [9] спроектировали и запатентовали оправку для черновой и чистовой обработки глубоких отверстий в сплавах переменной структуры. Авторы отмечают, что применение оправки повышает стабильность процесса обработки посредством снижения высокочастотных колебаний инструмента, вследствие чего повышается точность и качество внутренних поверхностей.

В настоящее время лезвийной обработке подвергают не только изделия из сталей и сплавов. В работе [8] автор выдвигает научную гипотезу, что при обработке биоинженерных полимеров применим такой состав СОТС, который, улучшает отвод тепла, снижает трение и адгезию за счет «залечивания» дефектов поверхностного слоя непосредственно в процессе механической обработки за счет химического связывания свободных радикалов, образу-

щихся при разрушении полимера. Разработаны составы СОТС с ингибиторами свободных радикалов. Лучший результат показал трехпроцентный раствор РЕФ с третил-бутиловым спиртом. Этот раствор снижает уровень свободных радикалов в 1,6–2,3 раза по сравнению со стандартным составом СОТС, обеспечивая необходимую шероховатость поверхности и повышая долговечность готовых изделий.

#### Технологические методы

В работе [6] исследуется обработка сплава на основе никеля Inconel 625 с применением метода предварительного пламенного нагрева. Исследование показало, что силы, действующие на режущий инструмент ниже при нагреве, чем в условиях обработки при комнатной температуре. Увеличение температуры нагрева уменьшает толщину стружки и увеличивает ее ширину по сравнению с формированием стружки при комнатной температуре. Наибольшая стойкость инструмента наблюдается при высоких скоростях резания и высокой температуры нагрева.

В работе [26] исследуется противоположный описанному выше метод обработки. Для повышения обрабатываемости сплава Inconel 625 рассматривали методы минимального количества смазки *MQL* (*Minimum quantity lubrication* англ. – минимальное количество смазки), криогенного охлаждения жидким азотом (LN2) и гибридного метода *CryoMQL* (*Hybrid cooling/lubrication (MQL+Cryogenic)* англ. – гибридное охлаждение/смазка (минимальное количество смазки + криогенная обработка)). Гибридная стратегия охлаждения/смазки (*CryoMQL*) показала лучшие шероховатость Ra и топографию поверхности (наименьшая высота от пика до впадины).

В процессе лезвийной обработки желательно иметь сливную стружку, так как она характеризует устойчивость технологической системы, обеспечивает высокое качество обработанной поверхности и стойкость инструмента. Однако сливная стружка является одной из причин преждевременного износа или поломки станков и приспособлений, а также порчи изделия из-за возможного наматывания стружки. При лезвийной обработке существует необходимость формирования стружки с заданной длиной.

В работе [15] авторы для получения требуемой стружки изучают метод предварительного локального пластического взаимодействия

ЛПВ по внешней поверхности срезаемого слоя, основанный на использовании явления деформационного воздействия на поверхность, позволяющий обеспечить периодическое изменение условий обработки по сравнению с исходным состоянием материала. Ими разработаны и реализованы расчетные модели в виде компьютерных программ управления процессом стружкодробления на основе метода ЛПВ обрабатываемого материала и алгоритмов автоматизации выбора метода и параметров ЛПВ.

В работе [16] описано исследование точения фасонных поверхностей с использованием двухрезцовой схемы. Теоретически и практически подтверждено, что при применении двухрезцовой схемы с встречным расположением резцов удастся уменьшить погрешности размеров и формы сечения обрабатываемой поверхности кольцевых канавок. Экспериментально подтверждена возможность достижения требуемых параметров точности и качества поверхности при использовании различных технологических схем обработки. Также разработана математическая модель, учитывающая относительные вибрации инструмента и обрабатываемой заготовки.

В работе [17] приводятся результаты экспериментов по применению комплексного технологического процесса изготовления деталей из алюминиевых сплавов системы Al-Mg. Описанный технологический процесс включает в себя ковку прутковых заготовок по различным схемам с различными температурными параметрами, стабилизирующий отжиг, с последующим охлаждением поковок на воздухе, токарную обработку. Были проведены динамометрические и металлографические исследования для измерения твердости и шероховатости обработанной поверхности образцов. Автор отмечает, что применение равномерной деформационной обработки позволяет получить сбалансированный комплекс технологических и специальных свойств. Обрабатываемость и качество поверхности заготовок резанием улучшаются за счет повышенной твердости материала заготовки.

#### Выводы

В работе проанализированы и разделены на три группы различные методы повышения качества лезвийной обработки. В группе организационных методов, реализуемых на этапе подготовки производства, предлагается применение

ние новых математических моделей, стратегий управления вибрациями, методик расчета параметров технологических операций, применение нейросетей для прогнозирования результатов обработки. В группе организационных методов, реализованных на этапе механической обработки, предлагается применение предварительного оценивания физико-механических свойств контактной пары инструмент-деталь, применение технологической оснастки новых конструкций, различные виды СОТС. В группе технологических методов предлагается применение пламенного нагрева или охлаждения заготовки, предварительной деформационной обработки, различных схем обработки.

Следует отметить, что исследования в машиностроительной отрасли в части повышения качества лезвийной обработки разносторонние, затрагивают, в том числе обработку неметаллических материалов и рассматривают актуальное в настоящее время применение искусственного интеллекта для решения прикладных задач.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Analyses of Tool Wear and Chip Type for Different Coated Carbide Inserts in Turning Hardened 1.6582 Steel / Karel Šramhauser, Nataša Náprstková, Jan Svianek, Dana Stan'čková, Nguyen Van Tuong, Jan Novotný // *Coatings*. – 2022. – № 12(7), 974. <https://doi.org/10.3390/coatings12070974>
- The Influence of Galvanizing on the Surface Quality and Part Precision of S235J0 Alloy Machined by Turning / Sandor Ravai-Nagy, Aurel Mihail Titu, Alina Bianca Pop // *Coatings*. – 2023. – № 13(4), 701. <https://doi.org/10.3390/coatings13040701>
- Chatter in machining processes: A review / Guillem Quintana, Joaquim Ciurana // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2011. – № 51(5), С.363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>
- Finishing Turning of Ni Superalloy Haynes 282 / José Díaz-Álvarez, Antonio Díaz-Álvarez, Henar Miguélez, José Luis Cantero // *Metals*. – 2018. – №8(10), 843. doi:10.3390/met8100843
- Sustainable High-Speed Finishing Turning of Haynes 282 Using Carbide Tools in Dry Conditions / Antonio Díaz-Álvarez, José Díaz-Álvarez, José Luis Cantero, Henar Miguélez // *Metals*. – 2019. – №9(9), 989. doi:10.3390/met9090989
- FEM analysis and experimental investigation of force and chip formation on hot turning of Inconel 625 / Asit Kumar Parida, Kalipada Maity // *Defence Technology*. – 2019. – №15 (6) С.853–860. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.012>
- Studying the Factors Affecting Tool Vibration and Surface Quality during Turning through 3D Cutting Simulation and Machine Learning Model / Quang Ngoc The Ho, Thanh Trung Do, Pham Son Minh // *Micromachines*. – 2023. – №14(5), 1025. <https://doi.org/10.3390/mi14051025>
- Влияние состава СОТС при лезвийной механической обработке на стабильность эксплуатационных показателей биоинженерных полимерных изделий / С. Н. Лавриненко, И. С. Лавриненко // *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. – Севастополь, 2012. – № 129 – С. 114–118. – ISSN: 2307-6488
- П. м. 191536 Российская Федерация, МПК В23В29/00 Оправка для растачивания ступенчатых глубоких отверстий в труднообрабатываемых деталях, сваренных из разнородных материалов / В. В. Максаров, Д. А. Осминко, Т. С. Голиков; ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет, 2019.
- Пробный проход при лезвийной обработке металлов с измерением термоЭДС как способ предварительной оценки свойств контактной пары: резец-стальная заготовка / А. Л. Плотников, Н. Г. Зайцева, В. А. Аветисян, Х. Д. Ньят // *Вестник СГТУ*. – Саратов, 2012. – Т. 3. – № 1 (67). – С. 109–113. – ISSN: 1999-8341
- Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников ; науч. ред. А. П. Бабичев ; ВолгГТУ Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 231 с., ил., табл.; (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю. М. Соломенцев).
- Ингеманссон, А. Р. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 27–40. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40.
- Расчетно-аналитический метод выбора припусков на обработку резанием деталей силовых агрегатов / В. В. Краев, Г. Г. Крушенко // *Вестник СибГАУ*. – Красноярск, 2012. – № 1 (41). – С. 122–126. – ISSN: 1816-9724
- Эволюция структурных схем процесса резания / А. В. Волков, А. С. Свитка, И. К. Устинов // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – Калуга, 2016. – № 2 (6). – С. 47–58. – eISSN: 2413-6220
- Автоматизация и управление процессом стружкодробления на основе метода локального пластического воздействия на обрабатываемый материал / Максаров В. В., Ванчурин А. Н. // *Металлообработка*. – Санкт-Петербург, 2006. – № 5–6 (35–36). – С. 12–17. – ISSN: 1684-6702
- Вожжов, А. А. Обеспечение качества фасонных поверхностей при токарной обработке коллекторов электрических машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / А. А. Вожжов. – Севастопольский государственный университет, Севастополь, 2018. – 176 с.
- Крюков, А. В. Применение комплексного метода для улучшения качества изготовления деталей приборов радиоэлектронной борьбы. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):35–42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-35-42>
- Чигиринский, Ю. Л. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2022. – № 8(134). – С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48
- Change in Time of the Value of Dry and Lubricated Friction Coefficients for Surfaces Generated by Different Processing Methods / Gheorghe Nagî, Andrei Marius Mihalache, Oana Dodun, Adelina Hrituc, Laurentiu Slatineanu, Vasile Merticar // *Lubricants*. – 2023. – № 11(10), 436. <https://doi.org/10.3390/lubricants11100436>
- Способ назначения режимов резания для станков с ЧПУ на основе ЭДС резания : заявка № 2021135 Российская Федерация : В23В 25/06 (2006.01), В23Q 15/00 (2006.01) / Фролов Е. М., Рогачев А. В. ; заявитель ФГБОУ ВО «ВолгГТУ». – № 2021135456/05 ; заявлен 02.12.2021. – 30 с.

21. П. м. 201939 Российская Федерация, МПК В23В25/06 Резец сборный с элементами для измерения ЭДС резания / Е. М. Фролов, А. В. Рогачев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.

22. П. м. 201938 Российская Федерация, МПК В23В25/06 Автономный модуль для измерения ЭДС резания / Е.М. Фролов, А.В. Рогачев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.

23. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022614344 от 18 марта 2022 г. Российская Федерация. Оптимизация режимов резания для станков с ЧПУ / Е. М. Фролов, А. В. Рогачев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2022.

24. *Фролов, Е. М.* Возможности использования серийного оборудования с ЧПУ в качестве основы для построения цифровых производственных участков / Е. М. Фролов, А. В. Рогачев // Известия ВолгГТУ : научный журнал

№ 3 (250) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». – С. 41–43.

25. Исследование качества формируемой при точении на автоматически определяемых режимах поверхности / Е. М. Фролов, А. В. Рогачев, М. Ю. Полянчикова, В. В. Стражев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (272) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 32–34. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-1-272-32-34.

26. Evaluation of tool wear, surface roughness/ topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL / Çağrı Vakkas Yıldırım, Turgay Kivak, Murat Sarıkaya, Şenol Şirin // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020.–№ 9(2).-С. 2079-2092. <https://doi.org/10.1016/j.mrt.2019.12.069>