

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ И ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ НЕЖЕСТКИХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЩЕЛЕВЫХ ПАЗОВ

А. Ю. Попов, Е. В. Кривонос, Э. Р. Минибаев, В. Р. Аллагулов 

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

 vadim_allagul@mail.ru

В статье рассмотрена актуальная проблема обработки глубоких щелевых пазов, полостей малой ширины ≤ 3 мм в деталях аэрокосмического и энергетического машиностроения. Основное внимание уделено недостаточной жесткости и склонности к вибрациям удлиненных цельных твердосплавных фрез с соотношением длины к диаметру $L/D > 5$.

Вибрации приводят к ухудшению качества поверхности, повышенному износу режущих кромок, образованию биений и к поломке инструмента. Для решения этой проблемы проанализированы существующие подходы. Предложен новый способ увеличения жесткости, заключающийся в использовании поддерживающего люнета. Люнет служит дополнительной опорой для фрезы, значительно повышая её жесткость и демпфируя колебания. Приводятся результаты математического моделирования статической жесткости инструментальной системы. Одним из ключевых преимуществ нового подхода является его технологическая простота и возможность интеграции в существующие станки с числовым программным управлением без кардинальной модернизации оборудования.

В отличие от активных систем указанный метод не требует сложной электроники или программного обеспечения. Метод позволяет вести обработку глубоких и узких пазов даже при неблагоприятном соотношении их ширины к глубине, что прежде считалось труднореализуемой задачей. Возросшая жесткость системы, в свою очередь, положительно сказывается на износостойкости инструмента и дает возможность увеличить режимы резания, тем самым наращивая общую производительность. Наибольший потенциал метод раскрывает при работе с жаропрочными сплавами, где классическое фрезерование наталкивается на жесткие технологические ограничения.

Ключевые слова: малоразмерная фреза, нежесткий инструмент, щелевой паз, вибрации, жесткость, поддерживающая стойка

Для цитирования: Попов А. Ю., Кривонос Е. В., Минибаев Э. Р., Аллагулов В. Р. Способ повышения жесткости и виброустойчивости нежестких концевых фрез при обработке щелевых пазов. Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 16–22. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-16-22>. EDN: DFRAWD.



© Попов А. Ю., Кривонос Е. В., Минибаев Э. Р., Аллагулов В. Р., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHOD OF INCREASING THE RIGIDITY AND VIBRATION RESISTANCE OF NON-RIGID END MILLS IN PROCESSING SLOT GROOVES

A. Yu. Popov, E. V. Krivonos, E. R. Minibaev, V. R. Allagulov 

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

 vadim_allagul@mail.ru

The article addresses the pressing challenge of machining deep slot grooves and narrow cavities with widths of 3 mm or less in components used in aerospace and power engineering. Particular emphasis is placed on the insufficient rigidity and tendency to vibrate in elongated solid carbide end mills, especially when the length-to-diameter ratio $L/D > 5$.

These vibrations degrade surface quality, accelerate cutting edge wear, induce runout and often lead to tool failure. The authors analyse existing solutions and propose a new method to enhance tool rigidity: the use of a supporting steady rest (steady). This device acts as an additional support for the end mill, significantly increasing its stiffness and suppressing vibrations. The authors present results from mathematical modeling of the static rigidity of the tool system. One of the key advantages of this method is its technological simplicity and the ability to integrate it into existing CNC machines without major equipment overhaul.

Unlike active damping systems, the method does not require complex electronics or specialized software. It enables the machining of deep, narrow slots even under highly unfavorable width-to-depth ratios—a task previously considered technologically challenging. Moreover, increased rigidity improves tool life and allows for higher cutting parameters, boosting productivity.

This approach is particularly promising for machining parts made from heat-resistant alloys, where conventional milling techniques face significant limitations.

Keywords: small-diameter end mill, low-rigidity tool, narrow slot, vibrations, stiffness, supporting steady rest

For citation: Popov A. Yu., Krivonos E. V., Minibaev E. R., Allagulov V. R. Method of increasing the rigidity and vibration resistance of non-rigid end mills in processing slot grooves. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):16–22. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-16-22>. EDN: DFRAWD. (In Russ.).



© Popov A. Yu., Krivonos E. V., Minibaev E. R., Allagulov V. R., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

При изготовлении моноколёс для высокотемпературной части турбин применяются труднообрабатываемые порошковые материалы с более высокими механическими свойствами и менее технологичными. Конструкции моноколёс становятся менее технологичными — глубина пазов и кривизна лопаток увеличивается, ширина пазов уменьшается [1, 2]. Моноколёса из хрупких порошковых материалов разработчики не рекомендуют обрабатывать методами, связанными с эрозией или высокотемпературными воздействиями. Остаются традиционные методы обработки — лезвийным инструментом, в основном фрезами [3].

Основной технологической проблемой является низкая жесткость концевых фрез, приводящая к следующим негативным явлениям:

1. Изгиб под действием радиальной силы резания, вызывающий погрешность формы паза, такие как: конусность, бочкообразность и отклонение от прямолинейности [4, 5].

2. Автоколебания (вибрации), возникающие из-за малого демпфирования и динамической неустойчивости процесса, приводят к ускоренному износу, ухудшению качества поверхности и поломке инструмента [6, 7].

3. Термодеструкции из-за затрудненного отвода тепла из зоны резания.

Компенсировать эти факторы, до некоторой степени, можно за счёт оптимизации режимов резания, применения смазочно-охлаждающих жидкостей и виброгасящих оправок, но эти методы теряют эффективность при $L/D > 5$ [8]. Наиболее очевидный способ повышения жесткости инструмента — это изготовление специальных фрез с режущей части на небольшом участке торцевой части фрезы и цилиндрической или конической части остального стержня. К сожалению, применение фрез конической формы «морковки» не всегда возможно. Наиболее неблагоприятный вариант, когда приходится выполнять цилиндрический стержень с диаметром, как на режущей части.

Таким образом, внедрение дополнительной опоры представляет собой рациональное решение про-

блемы обработки глубоких узких пазов в труднообрабатываемых материалах. Метод сочетает в себе простоту реализации, высокую эффективность и технологическую гибкость. Он позволяет не только увеличить соотношение L/D , но и стабилизировать процесс резания, повысить качество поверхности и снизить себестоимость операции за счёт увеличения стойкости инструмента. В перспективе возможно развитие концепции с использованием самоцентрирующихся или адаптивных опор, реагирующих на изменение нагрузки в реальном времени.

Применение данного способа расширяет возможности технологических решений при изготовлении деталей сложной формы для авиакосмической и энергетической отраслей. Метод стоит взять на вооружение производствам, где высокоточное фрезерование приходится вести в стесненных рамках, заданных конструкцией инструмента и спецификой обрабатываемого материала.

В рамках настоящей работы решаются две взаимосвязанные задачи: конструирование поддерживающего люнета, способного повысить жесткость концевой фрезы до уровня, эквивалентного отношению $L/D \leq 3$, и построение математической модели статической жесткости инструментальной системы, необходимой для расчета конструктивных параметров этого люнета.

Анализ существующих методов

В исследовании были проанализированы следующие методы:

1. Конструктивно-технологические: использование фрез с переменным шагом и неравномерным углом наклона зубьев, которые позволяют эффективно бороться с вибрациями [9], но кратно повышают стоимость инструмента и не решают проблему статического изгиба инструмента.

2. Оборудование: использование прецизионных шпинделей с активными системами демпфирования, которые также не решают проблему не жесткости инструмента.

3. Рациональные стратегии обработки: реверсивное фрезерование, трохоидальные стратегии,

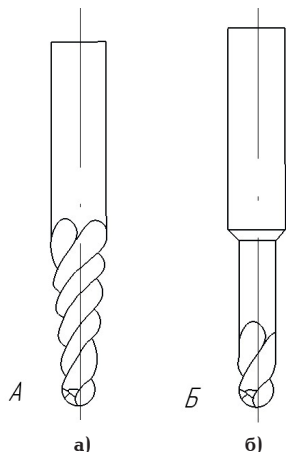


Рис. 1. Фрезы: а) коническая;
б) специальной геометрии
Fig. 1. Milling cutters: а) conical;
б) evaluation rating

Источник / Source: разработано
авторами / compiled by the authors

которые снижают радиальную силу, но увеличивают путь инструмента и время обработки [10].

Таким образом, актуальной задачей является разработка комплекса мер, обеспечивающих увеличение критической проблемы обработки моноколес — повышение жёсткости концевых фрез для обеспечения качественных показателей изделия.

Для работы с люнетом конструкция фрез должна быть изменена по сравнению с образцами, имеющимися на рынке. В основном предлагаются фрезы с конической режущей частью и сферической формой торцевой части (рис. 1а). Геометрия целевого паза изделия не позволила использовать такие фрезы. Возникла необходимость изготовления специальной конструкции фрезы цилиндрической формы, у которой стержень дополнительно занижен по сравнению с режущей частью на 0,05 мм (рис. 1б). Анализ стратегий обработки пазов лопаток моноколес конической и цилиндрической формы показывает, что практически весь припуск снимается сферическим торцом, а боковая поверхность редко используется. Коническая часть выполняет роль поддержки торцевой части и приближает форму фрезы к балке равного сопротивления. На цилиндрической части специальной фрезы делать винтовые канавки нецелесообразно, так как это снижает момент инерции сечения и увеличивает величину отгиба фрезы.

На торце специальной фрезы длина режущей части не превышает 3 диаметров только для выхода круга. В работе участвует только сферическая часть инструмента. Фреза выбрана двузубая. Это позволяет выполнять фаски и дополнительную доработку лезвия. Зона контакта фрезы и заготовки не превышала 1,5 мм в самом неблагоприятном месте траектории и не выходила на цилиндрическую часть фрезы. Контакт только по сфере в разных ее участках приводил к изменению равнодействующей силы по направлению и по величине. Наиболее неблагоприятное для деформации стержня

фрезы было перпендикулярное направление к оси инструмента. Именно этот вариант рассматривался в расчетной модели. Максимальная сила резания по расчетам не превышает 40 Н. Лезвие инструмента оказывает значительное влияние на процесс обработки. Параметр остроты лезвия ρ (условный радиус округления лезвия) связан с величиной подачи на зуб (0,15 мм/зуб). Он должен быть в пределах 0,1–0,2 от величины подачи, т. е. от 0,005 до 0,01 мм. Нормальное значение ρ — от 0,01 до 0,015 мкм. Лезвие дорабатывалось мелкозернистым инструментом. Для обработки хрупкого материала повышенной твердости (до 40 HRC) инструмент показал хороший результат при величине ρ от 0,004 до 0,006 мм.

Для повышения прочности лезвия и предотвращения сколов выполнялась отрицательная фаска — 20° по всей длине режущих кромок на сферической части режущей части. При величине ρ менее 0,004 мм стойкость инструмента становилась нестабильной. Это, очевидно, связано с неодинаковым сечением срезаемого слоя. 0, 15 мм — это максимальное сечение снимаемого слоя, среднее сечение не превышало 0,06 мм. По имеющейся в теории резания классификации, форма частиц соответствовала стружке надлома. В этом случае усадки стружки не происходит, и сечение стружки практически полностью соответствует сечению срезаемого слоя. Картина вполне соответствует опыту эксплуатации инструмента при обработке хрупких материалов, дающих стружку, которую можно отнести к «стружке надлома» [11]. Еще одна особенность инструмента, использованного в работе, — это зернистость сплава. Выбирали особо мелкозернистый сплав с размерами зерен менее 0,5 мкм. Он более устойчив к абразивному износу, который доминировал при обработке хрупкого порошкового сплава.

Предлагаемый способ поддержки инструмента

Предлагается способ поддержки инструмента, суть которого заключается в установке поддерживающего люнета, стойки которого поддерживают цилиндрическую часть фрезы и не позволяют ей совершать автоколебания (рис. 1).

Принцип действия: опорные стойки 6, установленные на минимальном технологическом расстоянии, создают дополнительную опору для фрезы 4,кратно увеличивая ее жесткость и подавляя поперечные колебания.

Материалы и методы исследования

Для проверки эффективности концепции люнетной поддержки было проведено конечно-элементное моделирование статического прогиба и модального анализа инструментальной системы в среде SOLIDWORKS Simulation 2024 [12, 13]. Выбор данной системы обусловлен её гибкостью и параметрическим моделированием, что позволяет быстро исследовать влияние геометрических параметров опоры на жесткость инструмента¹ [14].

Процедура моделирования включает следующие этапы:

1. Построение параметрической 3D-модели. В среде SOLIDWORKS была создана упрощенная,

¹ ГОСТ Р 57700.10—2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. Введ. 01—01—2019. Москва: Стандартинформ, 2018. 16 с.

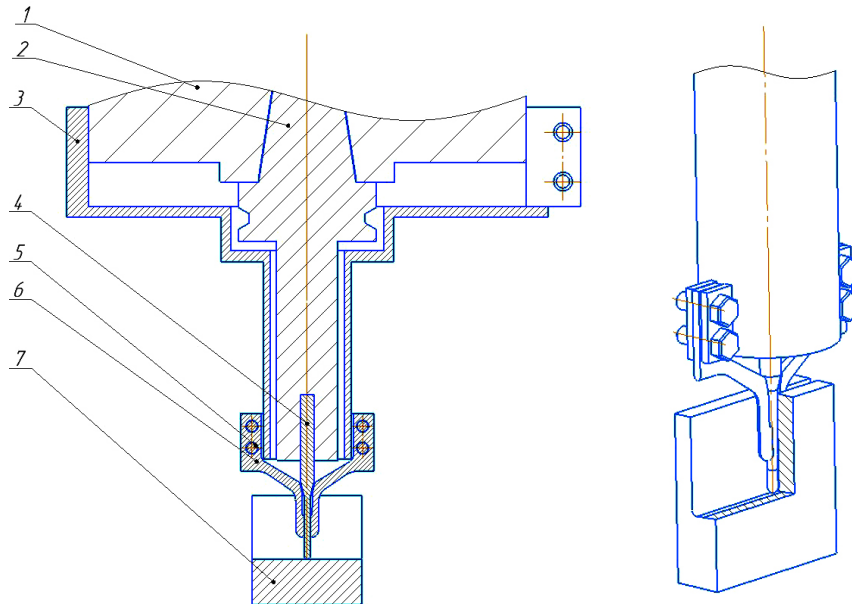


Рис. 2. Схема предлагаемого способа поддержки:
1 — шпиндель; 2 — оправка; 3 — корпус люнета; 4 — удлинённая малоразмерная фреза; 5 — крепёжные винты; 6 — поддерживающие стойки; 7 — заготовка с щелевым пазом

Fig. 2. Diagram of the proposed support method:
1 — spindle; 2 — mandrel; 3 — steady rest body; 4 — elongated small-sized cutter; 5 — fastening screws; 6 — supporting posts; 7 — workpiece with a slotted groove
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

но качественная для прочностного анализа модель цельной твердосплавной концевой фрезы диаметром 3 мм. Для учета реальных условий закрепления рабочий вылет составлял 30 мм.

2. Определение материалов и граничных условий:

— материал инструмента: выбран твердый сплав WC-Co (карбид вольфрама). Основные свойства: модуль упругости Юнга $E = 60000 \text{ Н/мм}^2$, плотность $\rho = 14500 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$;

— материал опорной стойки: выбрана бронза, так как она имеет низкий коэффициент трения и идеально подходит в качестве подшипника скольжения;

— граничное условие «Закреплено» было применено к цилиндрической поверхности хвостовика, что моделирует идеальное зажатие в цанговом патроне высокой точности (рис. 2а).

— условие для расчета статической жесткости: к сферической вершине инструмента приложена сила величиной, не превышающей 40 Н, направленная в противоположную сторону от направления подачи перпендикулярно оси инструмента (радиальная составляющая силы резания). Такое значение силы было выбрано исходя из опыта других исследователей [15]. В расчете учитывалась только радиальная составляющая силы резания, так как данная составляющая вызывает изгиб стержня фрезы. Это доминирующий фактор.

3. Обоснование расчетной схемы:

— вариант 1: базовый случай, без поддержки: анализ модели с вылетом 30 мм $L/D = 10$ только с указанными выше условиями;

— вариант 2: с одной поддерживающей стойкой, которая расположена на расстоянии 10 мм от вершины инструмента. Данное условие ограничивает перемещения узлов сетки в радиальном на-

правлении, имитируя контакт с неподвижной поддерживающей стойкой.

4. Для определения прогиба и напряжений построена сетка конечных элементов и при решении задачи использована автоматическая сетка из тетраэдральных элементов второго порядка, тип исследования — «Статика».

5. Постобработка и анализ результатов:

— для статического анализа были проанализированы изображения распределения статического прогиба и эквивалентных напряжений (рис. 3);

— оценивалось максимальное смещение на вершине фрезы.

Результаты моделирования и выводы:

1. По статической жесткости получены следующие результаты: в конфигурации без опоры максимальный прогиб достиг 0,112 мм, тогда как установка люнета уменьшила его до 0,038 мм. Таким образом, статическая жесткость системы выросла в 2,9 раза.

2. Анализ напряжений: во второй конфигурации, оснащенной опорой, пик эквивалентных напряжений переместился из области заделки инструмента в зону его контакта с люнетом. При этом абсолютные значения напряжений остались кратно ниже предела прочности материала.

К преимуществам использованного подхода можно отнести наглядное представление результатов, прямую параметрическую связку с геометрической моделью и высокую скорость сравнительной оценки конкурирующих вариантов конструкции. Вместе с тем модель имеет ряд упрощений: она не охватывает нелинейные эффекты в зоне контакта, не учитывает демпфирование и податливость узла «шпиндель — патрон». По этой причине получаемые цифры следует трактовать как оценочно-сравнительные, что вполне достаточно для оценки эффективности предлагаемого способа поддержки.

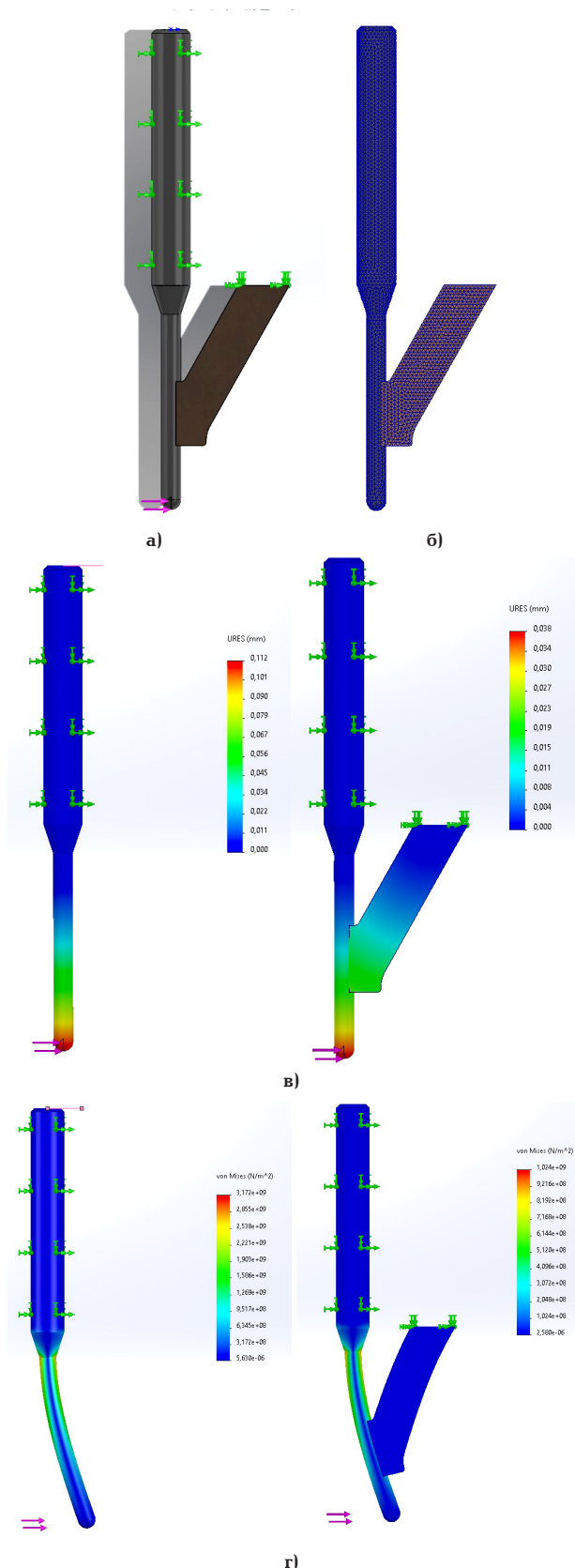


Рис. 3. Этапы конечно-элементного моделирования в SOLIDWORKS Simulation:

- а) граничные условия (закрепление и нагрузка);
б) локализованная сетка конечных элементов в зоне опоры;
в) результаты статического анализа — прогиб;
г) результат статического анализа — напряжения

Fig. 3. Course-element modeling stages in SOLIDWORKS Simulation: а) boundary conditions (fixation and load); б) localized finite elements mesh in the support zone; в) static analysis results — deflection; г) static analysis result — stress

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

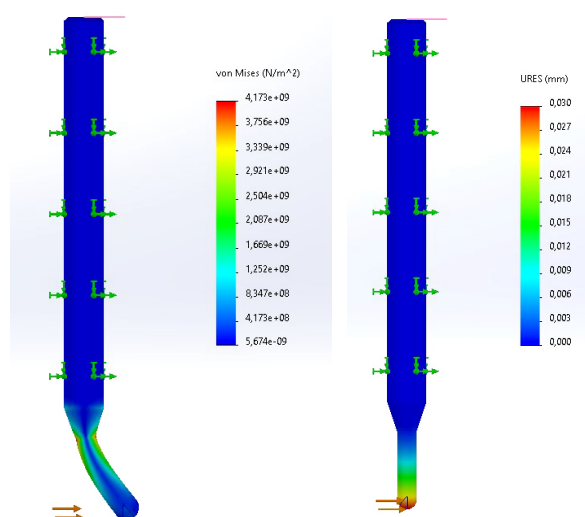


Рис. 4. Конечно-элементное моделирование для фрезы с вылетом $L/D = 3$

Fig. 4. Finite element modeling for milling cutters with the $L/D = 3$ span

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Проведенный в SOLIDWORKS Simulation численный эксперимент сыграл роль серьезного теоретического фундамента, предваряющего дорогостоящие натурные испытания, и дал возможность заблаговременно оптимизировать как геометрию опорных элементов, так и их расположение

На пятикратном координатном обрабатывающем центре OKUMA MU – 400VA был проведен ряд экспериментов по обработке щелевого паза при благоприятных условиях, а именно $L/D = 3$. Использовались фрезы фирмы ZCC – СТ диаметром 3 мм со сферическим торцом, количество режущих зубьев 2. Режимы обработки были следующие $A_p = 0,3$ мм, $N = 1500$ об/мин, $F = 0,05$ мм/зуб.

В ходе экспериментов выявлено, что при соотношении вылета инструмента к диаметру $L/D \leq 3$ подбор режимов резания и стратегии обработки позволяет увести систему из резонансной зоны. Это обстоятельство напрямую отразилось на качестве и точности получаемой поверхности.

На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса резания в благоприятных условиях. Максимальная величина упругого отгиба инструмента составила 0,038 мм. Следовательно, дополнительная опора способна поднять жесткость фрезы с вылетом $L/D = 10$ до уровня, эквивалентного $L/D = 3$. Опираясь на такой запас жесткости, удалось подобрать рациональные режимы резания и выдержать допуск на обработку пера лопатки в пределах $\pm 0,025$ мм.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования показали, что установка дополнительной опоры уменьшила максимальный прогиб с 0,112 до 0,038 мм, что по уровню жесткости приближается к случаю, когда вылет фрезы ограничен соотношением $L/D = 3$. Анализ полученных данных свидетельствует, что определяющий фактор роста стойкости инструмента — подавление вибраций, благодаря чему снижаются ударные нагрузки и предотвращается преждевременное разрушение режущей кромки. Улучшение же качества поверхности и геометрической точно-

сти детали является прямым следствием возросшей жесткости инструментальной системы.

Недостатки и ограничения способа остаются:

— необходимость точной установки опор относительно оси шпинделя;

— сложность применения при обработке пазов с переменной глубиной и нелинейной формой. Необходимо расчет и моделирование формы опорных стоек люнета.

Выводы и заключение

Проведенный анализ проблемы низкой жесткости и предрасположенности к автоколебаниям, свойственных удлиненным малоразмерным фрезам с отношением $L/D > 3$, позволил предложить принципиально новый метод их стабилизации, основанный на применении специального поддерживающего люнета.

Для верификации предложенной концепции было выполнено параметрическое конечно-элементное моделирование в программной среде SOLIDWORKS Simulation, включавшее статический анализ. Объектом исследования служила фреза диаметром 3 мм с вылетом 30 мм, что соответствует отношению $L/D = 10$. Моделирование с имитацией люнетной опоры дало следующие ключевые результаты:

— статическая жесткость: максимальный статический прогиб под действием радиальной силы 100 Н снизился с 0,112 (базовый случай) до 0,038 мм, что свидетельствует об увеличении жесткости в 2,9 раза;

— распределение напряжений: введение опоры привело к смещению пика эквивалентных напряжений из области заделки хвостовика в зону контакта стержня фрезы с опорными элементами люнета; при этом абсолютные значения напряжений не вышли за границы безопасного диапазона для твердосплавного инструментального материала группы WC-Co.

Результаты математического моделирования доказывают физическую состоятельность и высокий потенциал предлагаемого способа. Они количественно подтверждают, что даже одна дополнительная опора, расположенная вблизи свободного конца инструмента, способна кардинально улучшить его статические и динамические характеристики, теоретически позволяя расширить диапазон рабочих отношений L/D до 10 при сохранении требуемой жесткости конструкции.

Таким образом, на основе проведенного ряда экспериментов и конечно-элементного моделирования предложенный способ поддержки может быть рекомендован как эффективное техническое решение для повышения производительности и точности обработки при фрезеровании глубоких щелевых пазов малого сечения.

Список источников / References

- Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>.
- Denkena B., Bergmann B., Teige C. Frictionally damped tool holder for long projection cutting tools. *Production Engineering*. 2018;6(12):715–722. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0847-7>. EDN: DQWRMX.
- Постнов В. В., Малахов Е. Н., Старовойтов С. В. [и др.]. Расчетно-экспериментальный метод компенсации погрешно-

сти механообработки лопаток газотурбинных двигателей на мехатронном станочном оборудовании // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 7 (52). С. 145–153. EDN: PWZUHP.

Postnov V. V., Malakhov E. N., Starovoitov S. V. [et al.]. Computational and experimental method of machining blades for gas turbine engines on mechatronic machines with error compensation. *Vestnik UGATU*. 2012;7(52):145–153. EDN: PWZUHP. (In Russ.).

4. Трусов В. Н., Скуратов Д. А., Законов О. И. [и др.]. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 85–91. EDN: OWXVSV.

Trusov V. N., Skuratov D. A., Zakonov O. I. [et al.]. Calculation of cutting temperature at milling of purveyances from hard-processing materials. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3(43):85–91. EDN: OWXVSV. (In Russ.).

5. Кочина Т. Б. Износ керамических инструментальных материалов при высокоскоростном резании жаропрочных никелевых сплавов // Металлообработка. 2013. № 2. С. 7–13. EDN: REKXIR.

Kothina T. B. Wear of ceramic tool materials in the high-speed cutting of refractory nickel alloys. *Metalworking*. 2013;2:7–13. EDN: REKXIR. (In Russ.).

6. Smith S., Tlustý J. Current trends in high-speed machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997;119(4B):664–666. <https://doi.org/10.1115/1.2836806>.

7. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z. [et al.]. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2016;65(2):785–808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>. EDN: VJNJHW.

8. Schmidt J., Tritschler H. Micro Milling of Hardened Steel. *Microsystem Technologies*. 2004;10(3):167–174. <https://doi.org/10.1007/s00542-003-0346-3>. EDN: FMEKUB.

9. Bari P., Kilic Z. M., Law M. Rapid stability analysis of variable pitch and helix end mills using a non-iterative multi-frequency solution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2023;13(237):2109–2118. <https://doi.org/10.1177/09544054221126967>. EDN: ONUWRR.

10. Pleša A., Nithyanand G., Akhavan Niaki F. [et al.]. Identification of optimal machining parameters in trochoidal milling of Inconel 718 for minimal force and tool wear and investigation of corresponding effects on machining affected zone depth. *Manufacturing Letters*. 2019;21:28–33. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.05.003>.

11. Ярославцев В. М. Особенности процессов стружкообразования и формирования поверхностного слоя детали при обработке газотермических покрытий // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 6. С. 18–29. <https://doi.org/10.7463/0616.0842354>. EDN: WISNIF.

Yaroslavtsev V. M. Osobennosti protsessov struzhko-obrazovaniya i formirovaniya poverkhnostnogo sloya detali pri obrabotke gazotermicheskikh pokrytiy. *Nauka i Obrazovaniye*. 2016;6:18–29. <https://doi.org/10.7463/0616.0842354>. EDN: WISNIF. (In Russ.).

12. Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., Witt R. J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th ed. John Wiley & Sons, 2001. 736 p. ISBN 978-0-471-35605-9.

13. Kivanç E. B., Budak E. Structural modeling of end mills for form error and stability analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;11(44):1151–1161.

14. Wang Le., Yue C., Liu X. [et al.]. Conventional and micro scale finite element modeling for metal cutting process: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;2(37):199–232. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.004>. EDN: PZBCKM.

15. Пономарев Б. Б., Нгуен Хьен Ши. Исследования динамики процесса пятикоординатного концевое фрезерования //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019. Т. 4, № 7. С. 108–120. https://doi.org/10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396.

Ponomarev B., Hien Nguyen. Dynamics of five-axis end milling process. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2019;4(7);108–120. https://doi.org/10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. Ю. Попов. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, общее редактирование текста, формулировка выводов.

Е. В. Кривонос. Разработка методологии исследования.

Э. Р. Минибаев. Разработка конечно-элементного моделирования в SOLIDWORKS Simulation.

В. Р. Аллагулов. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, разработка конструкции специального люнета.

Authors' contribution:

Andrey Yu. Popov. Setting research aim, objectives and scientific problem, general text editing, drawing conclusions.

Evgeniy V. Krivonos. Developing the research methodology.

Erik R. Minibaev. Developing the finite element modeling in SOLIDWORKS Simulation.

Vadim R. Allagulov. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, the design of a special lunette.

Информация об авторах:

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металло-режущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4871-2344

AuthorID (РИНЦ): 175664

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7703-9283>

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

e-mail: popov_a_u@list.ru

КРИВОНОС Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металло-режущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7238-5136

AuthorID (РИНЦ): 762266

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

e-mail: evgenii.krivonos@mail.ru

МИНИБАЕВ Эрик Ренатович, инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6037-9513

AuthorID (РИНЦ): 1315196

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>

e-mail: erikminibaev@yandex.ru

АЛЛАГУЛОВ Вадим Ришатович, инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2714-3643

AuthorID (РИНЦ): 1263210

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>

e-mail: vadim_allagul@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 23.12.2025; принята к публикации 31.07.2026.

Information about the authors:

POPOV Andrey Yur'yevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Metal-cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4871-2344

AuthorID (RSCI): 175664

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7703-9283>

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

e-mail: popov_a_u@list.ru

KRIVONOS Evgeniy Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Metal-cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7238-5136

AuthorID (RSCI): 762266

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-1862>

AuthorID (SCOPUS): 57193400934

ResearcherID: ABC-7096-2020

e-mail: evgenii.krivonos@mail.ru

MINIBAEV Erik Renatovich, Engineer of the Educational, Scientific, and Production Center "Modern Mechanical Engineering Technologies", Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6037-9513

AuthorID (RSCI): 1315196

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1539-053X>

e-mail: erikminibaev@yandex.ru

ALLAGULOV Vadim Rishatovich, Engineer of the Educational, Scientific, and Production Center "Modern Mechanical Engineering Technologies", Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2714-3643

AuthorID (RSCI): 1263210

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5427-7337>

e-mail: vadim_allagul@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 09.12.2025; approved after reviewing 23.12.2025; accepted for publication 31.07.2026.