

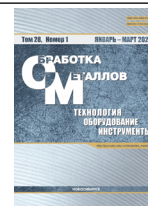
НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Интеллектуальная система поддержки принятия решений для оптимизации параметров токарной обработки тонкостенных деталей в контексте проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования

Аягма Жаргалова^{1, а, *}, Вадим Скиба^{2, б, **}, Цзыци Тун^{1, с}, Семен Папко^{2, д}, Иван Юлусов^{2, е}

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmsu.ru; ^б <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeeba_vadim@mail.ru;

^с <https://orcid.org/0009-0008-6174-3234>, tongzici29@gmail.com; ^д <https://orcid.org/0009-0004-4512-5963>, papko.duty@yandex.ru;

^е <https://orcid.org/0009-0006-7566-6722>, yulusov.2017@stud.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.011:004.891.2:621.941

История статьи:

Поступила: 17 января 2026

Рецензирование: 02 февраля 2026

Принята к печати: 14 февраля 2026

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Тонкостенные детали
Интеллектуальная система
поддержки принятия решений
Упругая деформация
Оптимизация режимов резания
Гибридное станочное оборудование
Имитационное моделирование
Метод конечных элементов

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSUN-2026-0005).

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка тонкостенных деталей представляет собой одну из наиболее сложных задач современного машиностроения, особенно в аэрокосмической отрасли, точном приборостроении и других высокотехнологичных областях, где требования к геометрической точности носят критический характер. Низкая изгибная жесткость таких конструкций обуславливает их чрезвычайную чувствительность к силовым воздействиям, возникающим при механической обработке: упругие деформации, вызванные совокупным действием сил резания и усилий зажима, приводят к значительным отклонениям от заданных размеров и формы, что является одной из основных причин производственного брака. Традиционные методы назначения режимов резания, основанные на справочных данных и эмпирическом опыте оператора, не обеспечивают возможности количественного прогнозирования деформационного отклика тонкостенной заготовки и не учитывают специфики ее деформационного поведения. Указанная проблема приобретает особую актуальность в контексте разработки гибридного станочного оборудования нового поколения, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции, где научно обоснованный выбор параметров обработки является необходимым условием обеспечения требуемого качества продукции. **Цель работы.** Разработка, программная реализация и комплексная верификация прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), предназначенной для научно обоснованного выбора оптимальных режимов токарной обработки, направленного на минимизацию упругой деформации тонкостенных деталей, как составного элемента методологии проектирования гибридных металлообрабатывающих систем. **Методы исследования.** В основу системы положена аналитическая математическая модель, устанавливающая функциональную связь между параметрами резания, результирующей силой резания и упругим прогибом заготовки, рассчитываемым по механической модели консольной балки. Реализован итерационный алгоритм многопараметрической оптимизации с целевой функцией минимизации максимального прогиба. Верификация эффективности системы проведена на двух типовых тонкостенных деталях – втулке из стали 45 и кольце из алюминиевого сплава АК9ч – посредством комплексного имитационного моделирования: проверки технологической реализуемости процесса в САМ-системе SprutCAM и оценки полей деформаций статическим конечно-элементным анализом в САЕ-системе ANSYS Mechanical. **Результаты и обсуждение.** Применение разработанной СППР обеспечило кардинальное снижение силовых нагрузок на заготовку: тангенциальная составляющая силы резания уменьшилась в 2,1 раза для стальной втулки и в 10,8 раза для алюминиевого кольца. Конечно-элементный анализ подтвердил снижение максимальной упругой деформации на 72,3 % (с 0,0602 до 0,0167 мм) для стальной втулки и на 87,9 % (с 0,0422 до 0,0051 мм) для алюминиевого кольца. Принципиальным технологическим результатом является то, что значения деформации после оптимизации не превышают конструкторских допусков на цилиндричность. Моделирование в SprutCAM подтвердило полную технологическую корректность процессов. Полученные результаты демонстрируют перспективность интеграции интеллектуальных систем принятия решений в методологию проектирования гибридного станочного оборудования для повышения конкурентоспособности отечественной станкоинструментальной отрасли.

Для цитирования: Интеллектуальная система поддержки принятия решений для оптимизации параметров токарной обработки тонкостенных деталей в контексте проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования / А.Д. Жаргалова, В.Ю. Скиба, Ц. Тун, С.С. Папко, И.С. Юлусов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 130–151. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-130-151.

*Адрес для переписки

Жаргалова Аягма Дашибалбаровна, ст. преподаватель
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
105005, г. Москва, Россия
Тел.: +7 903 177-52-38, e-mail: azhargalova@bmsu.ru

**Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

Тонкостенные детали, характеризующиеся отношением диаметра к толщине стенки более 15, служат ключевыми конструктивными элементами в аэрокосмической промышленности, точном приборостроении, энергетическом машиностроении и других наукоемких отраслях, предъявляющих критические требования к снижению массы изделий при одновременном обеспечении высокой точности геометрических параметров [1–3]. Широкое применение подобных деталей в современных конструкциях обусловлено тенденцией к облегчению изделий и повышению их функциональности, однако их производство сопряжено со значительными технологическими трудностями, определяемыми принципиальной спецификой механического поведения таких конструкций.

Фундаментальной проблемой при механической обработке тонкостенных деталей является их чрезвычайно низкая изгибная жесткость, обуславливающая выраженную чувствительность к внешним силовым воздействиям [4, 5]. При токарной обработке заготовка подвергается одновременному действию нескольких групп силовых факторов: сил резания, генерируемых инструментом при формообразовании поверхности, усилий зажима со стороны технологической оснастки и в ряде случаев сил инерции, обусловленных вращением заготовки. Совокупное действие указанных факторов приводит к возникновению упругих деформаций, которые могут превышать допустимые отклонения формы и размеров, установленные конструкторской документацией [6, 7]. Следствием этого является высокий уровень производственного брака, увеличение числа доводочных операций и в конечном счете существенное возрастание себестоимости продукции.

Традиционные методы назначения режимов резания, базирующиеся на использовании справочных нормативов и эмпирическом опыте технологов, были разработаны для условий обработки жестких заготовок и не учитывают специфику деформационного поведения тонкостенных конструкций [8, 9]. Данные методы оперируют критериями производительности и стойкости инструмента, однако не предусматривают оценки деформационного отклика заготовки, что

принципиально ограничивает их применимость для рассматриваемого класса деталей. Более того, сам процесс закрепления тонкостенной заготовки в кулачковом патроне является источником начальной деформации, форма и величина которой определяются конструкцией зажимного устройства, числом кулачков и схемой приложения усилия [10, 11].

Указанная проблема приобретает особую значимость в контексте возрастающей потребности современной станкоинструментальной промышленности в разработке гибридного станочного оборудования нового поколения, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции [12–33]. Современные требования к точности, производительности, автоматизации и адаптивности технологического оборудования в условиях цифровизации производства и реализации концепции Индустрии 4.0 диктуют необходимость создания методологических подходов, обеспечивающих оптимизацию как предпроектных исследований, так и собственно процесса проектирования конкурентоспособных гибридных металлообрабатывающих систем [34, 35]. В условиях увеличения конструктивной сложности обрабатываемых деталей, роста спроса на многофункциональное оборудование и объективного сокращения производственных циклов становится необходимым интегрировать в станочное оборудование передовые технологии – поверхностно-термическую обработку, роботизацию и цифровое управление [36, 37]. Однако существующие методологические подходы к проектированию зачастую не учитывают многозадачность таких систем, сложность их создания на этапе предпроектных исследований и необходимость обеспечения модульности и гибкости конструкции [38].

Разрозненное применение различных технологий обработки приводит к увеличению числа операций и переустановок заготовки, росту временных и материальных затрат, накоплению погрешностей базирования и, как следствие, к снижению точности обработки [39]. Так, при традиционной организации технологического процесса изготовления деталей, включающего в себя операции механической обработки и поверхностно-термического упрочнения на разном оборудовании, деформации материала при термическом воздействии и погрешности

переустановки обуславливают необходимость назначения увеличенных межоперационных припусков, достигающих 30–40 % от заданной глубины упрочненного слоя [40]. Поэтому создание комплексного подхода к проектированию гибридных систем, объединяющего современные принципы автоматизации, цифрового моделирования и прогнозирования параметров обработки, представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой имеет стратегическое значение для повышения конкурентоспособности отечественной станко-инструментальной отрасли.

Одним из ключевых элементов методологии проектирования гибридного оборудования является создание интеллектуальных инструментов, обеспечивающих научно обоснованное назначение технологических параметров обработки с учетом специфики конкретных типов деталей и условий их изготовления. Применительно к тонкостенным деталям это означает необходимость разработки систем, способных количественно прогнозировать деформационный отклик заготовки и целенаправленно оптимизировать режимы обработки для минимизации геометрических искажений.

В последние десятилетия для решения проблемы управления деформациями при обработке тонкостенных деталей активно развиваются численные и алгоритмические методы. Моделирование процесса обработки методом конечных элементов (МКЭ) в CAE-системах, таких как ANSYS и ABAQUS, позволяет проводить детальный анализ полей напряжений и деформаций, предоставляя ценную информацию для корректировки технологического процесса [41, 42]. Некоторые исследователи [43, 44] продемонстрировали эффективность применения конечно-элементного моделирования для прогнозирования термомеханических деформаций при обработке тонкостенных деталей из алюминиевых и титановых сплавов. Однако полноценный МКЭ-анализ требует значительных вычислительных ресурсов и специализированных компетенций, что существенно ограничивает возможности его оперативного использования в условиях технологической подготовки производства.

Альтернативным направлением является применение алгоритмов математической опти-

мизации – генетических алгоритмов, методов роевого интеллекта, алгоритмов имитации отжига – для поиска оптимальных комбинаций параметров резания [45–47]. Показана эффективность данных методов для решения многокритериальных задач технологической оптимизации, включая одновременную минимизацию шероховатости поверхности и максимизацию производительности обработки. Вместе с тем метаэвристические алгоритмы зачастую функционируют по принципу черного ящика, не обеспечивая пользователю прозрачного и физически интерпретируемого обоснования предлагаемых решений [48]. Это обстоятельство снижает уровень доверия к генерируемым рекомендациям со стороны технологического персонала и затрудняет практическое внедрение подобных систем.

Некоторые исследователи предприняли попытки создания комплексных систем поддержки принятия технологических решений, интегрирующих физические модели процессов с алгоритмами оптимизации. В работе [49] предложена архитектура экспертной системы для выбора условий обработки на основе производственных правил, однако статический характер базы знаний ограничивает адаптивность системы. Исследования [50, 51] продемонстрировали возможности применения нейросетевых моделей для прогнозирования силовых параметров обработки и деформаций, однако требования к объему обучающих выборок и неинтерпретируемость результатов остаются существенными ограничениями.

Таким образом, анализ текущего состояния научной проблемы выявляет потребность в создании гибридного интеллектуального инструмента, который сочетал бы быстрое действие аналитических расчетов, прозрачность физико-математической модели, целенаправленность алгоритмической оптимизации и возможность строгой верификации результатов средствами численного моделирования. Такой инструмент, с одной стороны, обеспечивает решение конкретной технологической задачи – оптимизацию режимов обработки тонкостенных деталей, – а с другой стороны, формирует элемент интеллектуальной подсистемы, пригодной для интеграции в состав гибридного станочного оборудования, реализующего концепцию цифрового производства.

Настоящее исследование продолжает и существенно развивает идеи, заложенные в ранней работе А.Д. Жаргаловой и П.А. Еремейкина [52], посвященной концептуальной архитектуре программной системы для выбора рациональных режимов токарной обработки тонкостенных деталей. Предшествующие исследования были сосредоточены главным образом на формулировке системной архитектуры на основе производственных правил и разработке модульной концепции, заложившей методологическую основу данного направления. Настоящая работа реализует существенное продвижение по нескольким направлениям: на теоретическом уровне построена аналитическая механическая модель на основе теории консольной балки, устанавливающая количественную функциональную связь между параметрами резания и упругой деформацией заготовки; на алгоритмическом уровне разработан и реализован итерационный алгоритм многопараметрической оптимизации с четко определенной стратегией корректировки параметров и условиями сходимости; на уровне программной реализации создан полнофункциональный прототип веб-системы, интегрирующий базу знаний по материалам и инструментам, вычислительное ядро и модуль оптимизации; на уровне верификации реализована стратегия кросс-платформенной валидации, сочетающая САМ-моделирование технологического процесса и статический конечно-элементный анализ деформаций.

Целью данной работы является алгоритмическая реализация и комплексная экспериментально-вычислительная верификация прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия решений для научно обоснованного выбора оптимальных режимов токарной обработки тонкостенных деталей, рассматриваемой как составной элемент методологии проектирования гибридных металлообрабатывающих систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- формирование аналитической математической модели, устанавливающей функциональную связь между параметрами резания и упругой деформацией тонкостенной заготовки;
- разработка и программная реализация итерационного алгоритма многопараметрической оптимизации режимов резания с целевой функцией минимизации максимального прогиба;

- создание прототипа веб-ориентированной СППР с графическим интерфейсом пользователя;
- верификация эффективности системы посредством САМ-моделирования технологического процесса и статического конечно-элементного анализа деформаций для типовых тонкостенных деталей из конструкционных материалов.

Методика исследований

Математическая модель деформационного отклика тонкостенной заготовки

Точность формообразования при токарной обработке тонкостенных деталей в значительной степени определяется величиной радиальной составляющей силы резания F_y , которая вызывает изгибный прогиб заготовки в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности [53]. Для количественной оценки этой деформации в разработанной системе используется упрощенная, но физически обоснованная модель консольной балки, позволяющая аналитически связать параметры режима резания с геометрическим результатом обработки.

Расчет силовых параметров процесса резания осуществляется на основе классических эмпирических зависимостей, адаптированных для задачи анализа деформационного отклика [54, 55]. Тангенциальная (главная) составляющая силы резания F_z определяется по формуле

$$F_z = C_p t^x s^y V^n K_{mp}, \quad (1)$$

где t – глубина резания (мм); s – подача (мм/об); V – скорость резания (м/мин); C_p , x , y , n – эмпирические коэффициенты, определяемые свойствами обрабатываемого материала, геометрией инструмента и условиями обработки; K_{mp} – поправочный коэффициент, учитывающий фактические механические свойства обрабатываемого материала.

Радиальная F_y и осевая F_x составляющие силы резания определяются через установленные пропорциональные соотношения с тангенциальной составляющей [56]:

$$F_x \approx 0,35 F_z; \quad (2)$$

$$F_y \approx 0,45 F_z. \quad (3)$$

Конкретные значения коэффициентов пропорциональности определяются условиями

обработки и геометрией инструмента и хранятся в базе знаний системы.

Прогнозирование максимального упругого прогиба $\delta_{\max}$ тонкостенной заготовки, моделируемой как консольная балка, защемленная со стороны патрона, выполняется по формуле

$$\delta_{\max} = \frac{F_y L^3}{3EI},$$

где L – расчетная длина консольного участка заготовки (мм); E – модуль упругости материала (МПа); I – осевой момент инерции поперечного сечения (мм⁴).

Для кольцевого поперечного сечения, характерного для рассматриваемого класса деталей, момент инерции определяется выражением

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4),$$

где D – наружный диаметр; d – внутренний диаметр заготовки.

Эта модель, несмотря на упрощающие допущения (пренебрежение вращательным движением заготовки, неравномерностью распределения нагрузки по длине обработки и динамическими эффектами), обеспечивает адекватную оценку порядка величины деформации и ее зависимости от технологических параметров, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными [57, 58]. Принципиальным достоинством аналитической модели является минимальное время расчета, что обеспечивает возможность ее использования в составе итерационного алгоритма оптимизации в режиме реального времени.

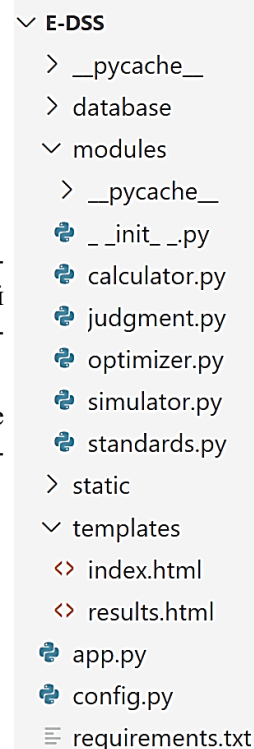
Архитектура интеллектуальной системы

Разработанная интеллектуальная СППР реализована по модульной архитектуре, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Система включает в себя четыре основных функциональных блока: базу знаний по материалам и инструментам, расчетный модуль, модуль оптимизации и веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем.

База знаний содержит структурированную информацию об эмпирических коэффициентах для расчета сил резания, физико-механических свойствах конструкционных материалов (модуле упругости, пределе прочности, пределе текучести, твердости), характеристиках режу-

Рис. 1. Компонентная архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Fig. 1. Component architecture of the intelligent decision support system



щего инструмента и справочных рекомендациях по назначению стартовых режимов обработки. Расчетный модуль реализует вычислительные процедуры определения силовых параметров и деформационного отклика в соответствии с описанной математической моделью.

Модульная архитектура системы полностью согласуется с принципами проектирования гибридного станочного оборудования, предполагающими обеспечение гибкости конструктивных решений, адаптацию к широкому спектру производственных задач и возможность модернизации функциональности. В перспективе данная система может быть интегрирована как программный модуль управления в состав цифровой подсистемы гибридного станочного комплекса для обеспечения адаптивного назначения режимов обработки с учетом реального состояния заготовки и текущих условий обработки.

Итерационный алгоритм оптимизации

Ядром системы является итерационный алгоритм многопараметрической оптимизации, цель которого состоит в определении набора параметров V, s, t , минимизирующего целевую функцию $\delta_{\max}$ при одновременном соблюдении технологических ограничений на допустимые диапазоны параметров обработки. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

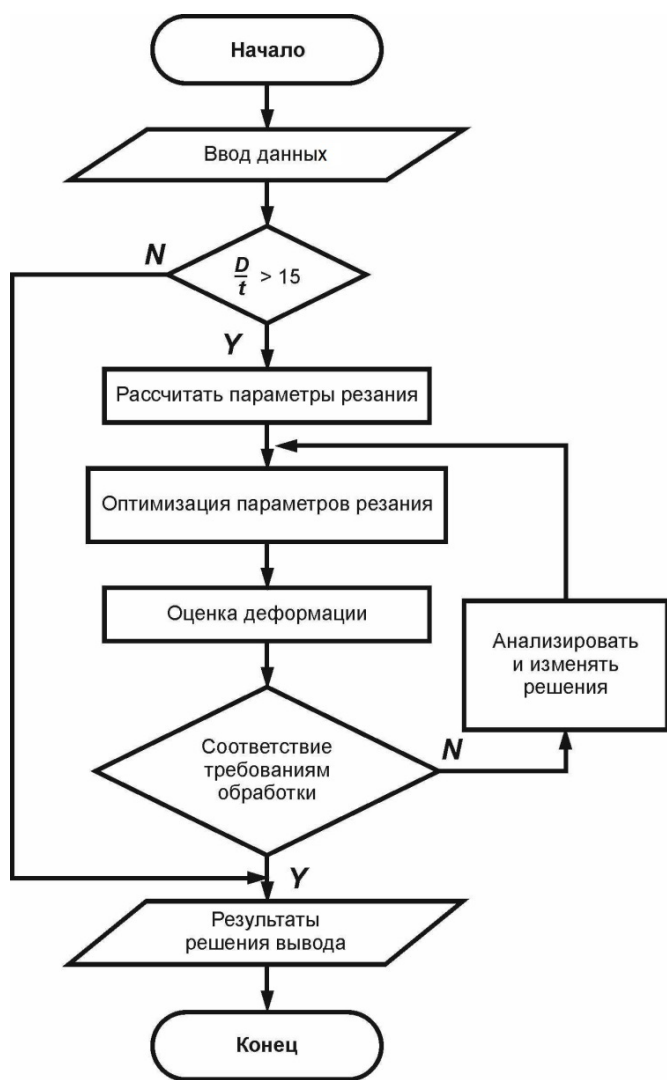


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы интеллектуальной системы

Fig. 2. Flowchart of the intelligent system's algorithm

Алгоритм начинает работу с назначения исходных (стартовых) режимов резания на основе справочных нормативов [59], хранящихся в базе знаний системы. Для данного набора параметров выполняется расчет силовых характеристик процесса и прогнозируемой деформации заготовки в соответствии с описанной математической моделью. Далее выполняется проверка условия допустимости:

$$\delta_{\max} \leq \delta_{\text{доп}},$$

где $\delta_{\text{доп}}$ – допустимая деформация, определяемая из конструкторского допуска на форму (цилиндричность) обрабатываемой детали.

В случае невыполнения данного условия алгоритм переходит к этапу итерационной корректировки параметров в направлении снижения

радиальной составляющей силы резания F_y . Стратегия корректировки основана на анализе чувствительности целевой функции к изменению каждого из управляемых параметров. Как следует из эмпирической формулы расчета силы резания, глубина резания t входит в выражение с наибольшим показателем степени x (типичные значения $x = 1,0 \dots 1,2$), что определяет ее доминирующее влияние на величину силового воздействия. Соответственно наиболее эффективным рычагом управления является уменьшение глубины резания. Алгоритм реализует последовательное снижение t и s с одновременной незначительной корректировкой V до выполнения критерия допустимости $\delta_{\max} \leq \delta_{\text{доп}}$.

Физический смысл оптимизационной стратегии состоит в переходе к так называемым «мягким» режимам резания [60], характеризующимся сниженной мгновенной силовой нагрузкой на заготовку при обеспечении технологической реализуемости процесса. Данный подход находит прямую аналогию с задачей оптимизации технологических параметров в гибридных системах обработки, где необходимо согласование режимов механического и поверхностно-термического воздействия для обеспечения требуемых характеристик изделия [61].

Структура пользовательского интерфейса

Для обеспечения удобного взаимодействия технолога с разработанной системой создан интуитивно понятный веб-интерфейс, реализованный с использованием современных фронтенд-технологий (HTML5, CSS3, JavaScript) в связке с серверной частью на базе микрофреймворка Flask (Python). Структура интерфейса представлена на рис. 3.

Интерфейс логически разделен на три основные функциональные зоны. Панель ввода параметров предназначена для задания исходных данных, необходимых для проведения расчетов: геометрических параметров обрабатываемой детали (наружного и внутреннего диаметров, длины обработки, толщины стенки), выбора материала заготовки из встроенной базы данных, а также указания требований к точности обработки – допустимой величины деформации или допуска на форму (цилиндричность). Панель вывода и оценки отображает в структу-

Система поддержки принятия решений при токарной обработке тонкостенных деталей

Моделирование обработки · Вывод параметров резания

Настройки параметров обработки

Наружный диаметр детали (mm)

64

Внутренний диаметр детали (mm)

60

Длина детали (mm)

40

Материал

Сталь 45

Рекомендуемый инструмент
Твердосплавный инструмент

Диапазон допуска (mm)

0.02

Рассчитать параметры резания

Обработка моделирования

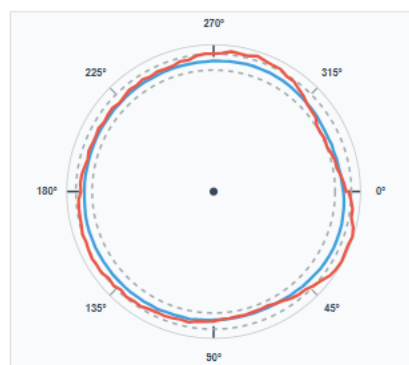
Моделирование обработки

Тонкостенная деталь

Сравнение параметров резания

Параметр	Исходные	Оптимизированные	Изменение
Скорость резания (m/min)	131.6	118.4	-10.0%
Подача (mm/rev)	0.25	0.188	24.8%
Глубина резания (mm)	2	0.2	90.0%
Сила резания Fz (N)	652.4	308.6	52.7%
Сила резания Fx (N)	228	108	52.7%
Сила резания Fy (N)	294	139	52.7%
Общая сила резания Fc (N)	750.9	355.2	52.7%
Сила зажима F3 (N)	4172.7	1193.4	71.4%
Скорость шпинделя (rpm)	655	589	-10.1%

Деформация под
действием зажимной силы



● Исходные (0.051 mm)

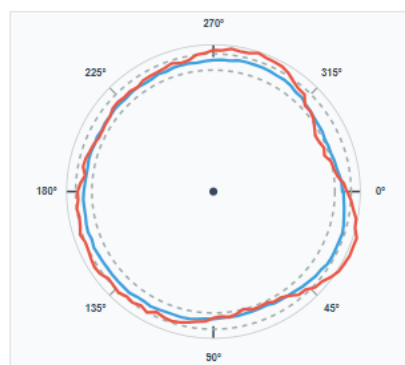
● Оптимизированные (0.010 mm)

---- Допустимый диапазон

Исходные параметры
0.0512 mm
Требование: ≤ 0.02 mm

Оптимизированные параметры
0.0104 mm
Требование: ≤ 0.02 mm

Деформация под действием
зажимной и режущей сил



● Исходные (0.064 mm)

● Оптимизированные (0.017 mm)

---- Допустимый диапазон

Исходные параметры
0.064 mm
Требование: ≤ 0.02 mm

Оптимизированные параметры
0.0173 mm
Требование: ≤ 0.02 mm

Рис. 3. Структура пользовательского интерфейса интеллектуальной СППР

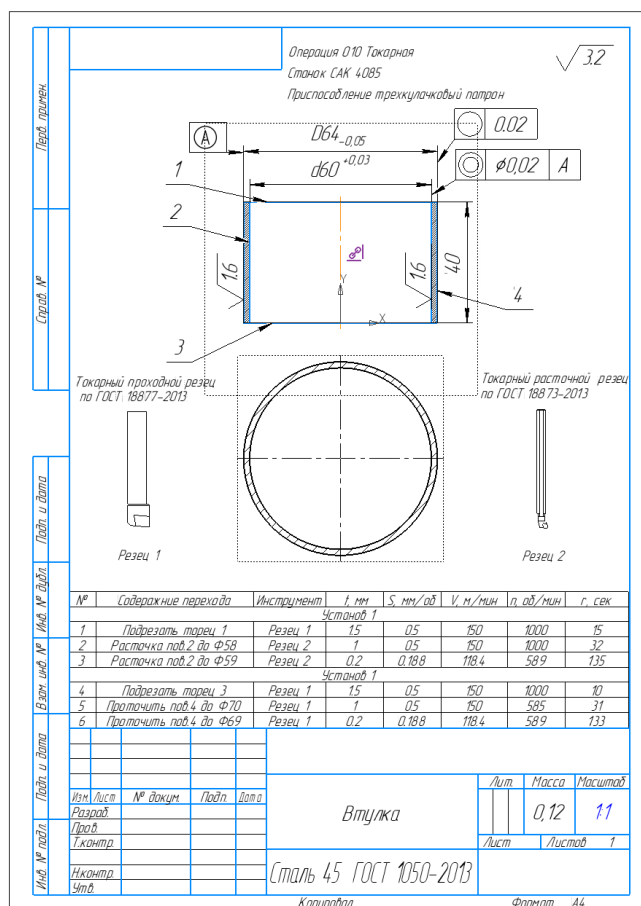
Fig. 3. Structure of the intelligent decision support system user interface

рированной табличной форме как исходные, так и оптимизированные параметры резания, рассчитанные значения всех составляющих силы резания и требуемого усилия зажима. Эта панель также содержит автоматическую классификацию детали по критерию тонкостенности на основе отношения диаметра к толщине стенки. Область визуализации результатов предназначена для наглядного графического представления итогов работы алгоритма, в том числе отображения финального значения расчетной деформации и его соответствия заданному допуску.

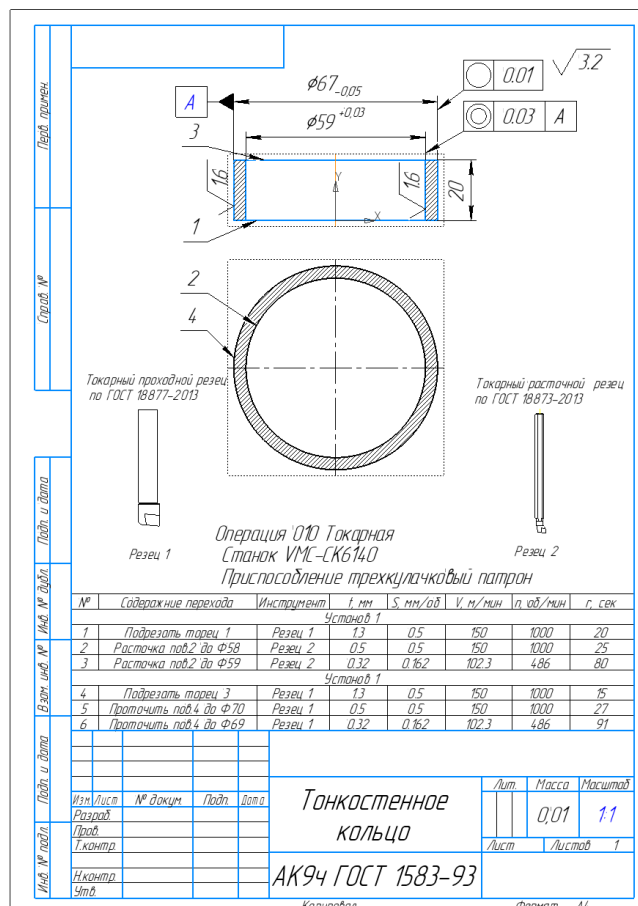
Подобная структура интерфейса позволяет минимизировать время на подготовку данных, обеспечивает прозрачность процесса оптимизации и формирует объективную основу для принятия обоснованных технологических решений. Интеграция клиентской части с серверными модулями расчета и оптимизации обеспечивает высокую скорость отклика системы.

Объекты исследования

Для тестирования и верификации эффективности разработанной СППР выбраны две типовые тонкостенные детали (рис. 4), представля-



а



б

Рис. 4. Рабочие чертежи объектов исследования:

а – втулка из стали 45; б – кольцо из алюминиевого сплава АК9ч

Fig. 4. Working drawings of the study objects:

а – bushing made of steel 45; б – ring made of AK9ch aluminum alloy

ющие различные конструкционные материалы и характеризующиеся различными геометрическими параметрами.

Деталь 1 – втулка из стали 45: наружный диаметр 64h9 мм, внутренний диаметр 60H8 мм, длина 40 мм, толщина стенки 2 мм, отношение диаметра к толщине стенки 32, допуск на цилиндричность 0,02 мм. Материал заготовки – конструкционная углеродистая сталь 45 с модулем упругости $E = 200$ ГПа.

Деталь 2 – кольцо из алюминиевого сплава АК9ч: наружный диаметр 69h9 мм, внутренний диаметр 59H8 мм, длина 20 мм, толщина стенки 4 мм (по одной стороне – 5 мм), отношение диаметра к толщине стенки 17,3, допуск на цилиндричность 0,01 мм. Материал заготовки – литейный алюминиевый сплав АК9ч с модулем упругости $E = 71$ ГПа.

Выбор данных объектов обусловлен необходимостью оценки универсальности системы

применительно к материалам с существенно различающимися физико-механическими свойствами (модуль упругости стали превышает модуль упругости алюминиевого сплава почти в три раза), а также к деталям с различной степенью тонкостенности.

Методология комплексной верификации

Верификация эффективности оптимизированных режимов резания проводилась по двухуровневой схеме, обеспечивающей всестороннюю оценку предлагаемых решений.

На первом уровне (технологическая верификация) осуществлялось САМ-моделирование в среде SprutCAM. Проводилась виртуальная обработка заготовок для проверки технологической корректности управляющих программ, сгенерированных для токарных станков с ЧПУ САК4085 и VMC-CK6140. В процессе моделирования контролировались следующие пара-

метры: корректность траектории инструмента, полнота съема припуска, отсутствие коллизий между инструментом, заготовкой и элементами станочной системы.

На втором уровне (деформационная верификация) выполнялся статический конечно-элементный анализ в среде ANSYS Static Structural. Создавались сеточные модели исследуемых деталей, к которым прикладывались силовые нагрузки, соответствующие как исходным (справочным), так и оптимизированным параметрам резания. Моделировались усилия зажима в трехкулачковом патроне и радиальная составляющая силы резания. Методология МКЭ-анализа соответствует современным подходам к моделированию технологических деформаций, апробированным в работах [62, 63]. Данная стратегия верификации обеспечивает комплексную оценку предлагаемых решений как с точки зрения их технологической реализуемости, так и с позиции гарантирования требуемой геометрической точности, что является принципиально важным для задач проектирования перспективного гибридного оборудования.

Результаты и их обсуждение

Результаты оптимизации параметров резания

Разработанная интеллектуальная СППР продемонстрировала последовательную и технологически обоснованную стратегию оптимизации, направленную на радикальное снижение мгновенной силовой нагрузки на тонкостенную заготовку. Сравнительный анализ исходных (справочных) и оптимизированных параметров резания, а также соответствующих им силовых факторов для обоих объектов исследования сведен в таблицу.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет выявить несколько принципиально важных закономерностей.

Доминирующим изменением в обоих случаях является радикальное сокращение глубины резания: в 10 раз для стальной втулки (с 2,0 до 0,2 мм) и в 6,25 раза для алюминиевого кольца (с 2,0 до 0,32 мм). Это прямое следствие математической модели: глубина резания входит в формулу расчета силы с наибольшим показателем

Сравнительный анализ параметров резания и силовых факторов до и после оптимизации
Comparative analysis of cutting parameters and force factors before and after optimization

Параметр / Parameter	Втулка (сталь 45) / Bushing (steel 45)		Кольцо (АК9ч) / Ring (AK9ch)	
	Исходный / Initial	Оптимизированный / Optimized	Исходный / Initial	Оптимизированный / Optimized
Скорость резания V , м/мин / Cutting speed V , m/min	131,6	118,4	126,0	102,3
Подача s , мм/об / Feed rate s , mm/rev	0,25	0,188	0,20	0,162
Глубина резания t , мм / Depth of cut t , mm	2,00	0,20	2,00	0,32
Частота вращения шпинделя n , об/мин / Spindle speed n , rpm	655	589	599	486
Тангенциальная сила F_z , Н / Tangential force F_z , N	652,4	308,6	161,6	15,0
Осевая сила F_x , Н / Axial force F_x , N	228,0	108,0	57,0	5,0
Радиальная сила F_y , Н / Radial force F_y , N	294,0	139,0	73,0	7,0
Суммарная сила резания F , Н / Total cutting force F , N	750,9	355,2	186,1	17,3
Усилие зажима F_3 , Н / Clamping force F_c , N	4172,7	1193,4	1298,4	161,0

степени, что делает ее наиболее эффективным параметром управления. Подача снижена на 24,8 и 19,0 % соответственно, это обеспечивает дополнительное сокращение силовых нагрузок. Скорость резания скорректирована незначительно (снижение на 10,0 и 18,8 %), поскольку данный параметр входит в формулу с наименьшим показателем степени и его влияние на силу резания сравнительно невелико.

Совокупное действие описанных корректировок привело к снижению суммарной силы резания в 2,1 раза для стальной втулки (с 750,9 до 355,2 Н) и в 10,8 раза для алюминиевого кольца (с 186,1 до 17,3 Н). Столь значительная разница в степени снижения объясняется различием в значениях эмпирических коэффициентов для стали и алюминиевого сплава: более высокая чувствительность алюминиевого сплава к изменению глубины резания обеспечивает пропорционально большее снижение силового воздействия.

Принципиально важный побочный эффект оптимизации – пропорциональное снижение требуемого усилия зажима F_z , рассчитанного по методике обеспечения условий надежного закрепления заготовки [64], – в 3,5 раза для стальной втулки и в 8,1 раза для алюминиевого кольца. Этот результат имеет самостоятельное технологическое значение, поскольку усилие зажима является независимым источником деформации тонкостенной заготовки [10, 11]. Снижение усилия зажима создает дополнительный резерв для минимизации начальной деформации заготовки, обусловленной неравномерностью радиального обжатия в кулачковом патроне.

Полученные результаты подтверждают правильность выбранной алгоритмической стратегии, основанной на приоритетном снижении глубины резания, и согласуются с общим научным подходом к формированию «мягких» режимов обработки, описанным в работах [60, 65]. Следует отметить, что переход к «мягким» режимам неизбежно сопровождается увеличением числа рабочих проходов для обеспечения полного съема припуска, однако в контексте обработки тонкостенных деталей это увеличение компенсируется кардинальным повышением геометрической точности и сокращением доли брака.

Результаты конечно-элементного анализа деформаций

Статический МКЭ-анализ в среде ANSYS дал количественное подтверждение эффективности предложенной оптимизационной стратегии. Сравнительные поля деформаций для обоих объектов исследования при исходных и оптимизированных параметрах обработки представлены на рис. 5.

Для стальной втулки максимальная упругая деформация снизилась с 0,0602 мм (при исходных параметрах) до 0,0167 мм (при оптимизированных параметрах), что составляет относительное снижение на 72,3 %. Для алюминиевого кольца аналогичное снижение составило с 0,0422 до 0,0051 мм, т. е. 87,9 %. Визуальный анализ полей деформаций (рис. 5) наглядно демонстрирует не только уменьшение абсолютной величины максимального прогиба, но и существенное сокращение зоны максимальных деформаций, что свидетельствует о более равномерном распределении напряжений в теле заготовки при оптимизированных режимах.

Наиболее значимым технологическим результатом является сопоставление значений деформации после оптимизации с конструкторскими допусками на цилиндричность. Для стальной втулки полученное значение $\delta_{\max} = 0,0167$ мм не превышает допуска на цилиндричность 0,02 мм. Для алюминиевого кольца значение $\delta_{\max} = 0,0051$ мм также укладывается в допуск 0,01 мм. Этот результат принципиален: он доказывает, что разработанная система способна генерировать не просто улучшенные, но технологически достаточные режимы обработки, гарантирующие соблюдение конструкторских требований к точности формы.

Существенно более высокая эффективность оптимизации для алюминиевого кольца (87,9 против 72,3 %) объясняется совокупностью физико-механических и геометрических факторов. Алюминиевый сплав характеризуется более низким модулем упругости, что обуславливает большую чувствительность деформационного отклика к изменению силовых параметров. Кроме того, большая толщина стенки кольца (4 против 2 мм) обеспечивает повышенный момент инерции поперечного сечения, усиливающий влияние снижения силовой нагрузки на результирующую деформацию.

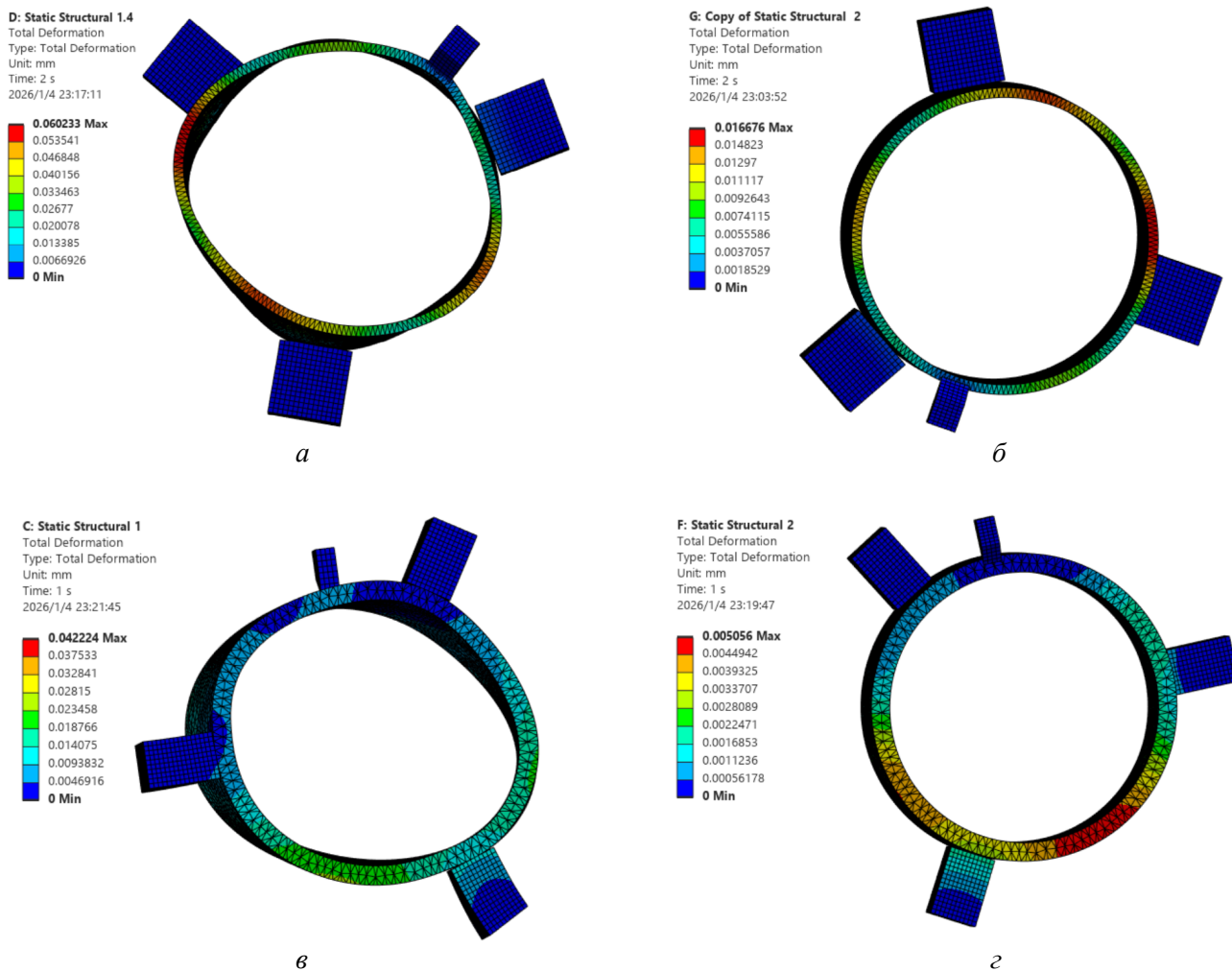


Рис. 5. Сравнение полей деформаций в ANSYS:

a – деформации стальной втулки при исходных параметрах; *б* – деформации стальной втулки при оптимизированных параметрах; *в* – деформации алюминиевого кольца при исходных параметрах; *г* – деформации алюминиевого кольца при оптимизированных параметрах

Fig. 5. Comparison of deformation fields obtained in ANSYS:

a – deformations of the steel bushing with initial parameters; *б* – deformations of the steel bushing with optimized parameters; *в* – deformations of the aluminum ring with initial parameters; *г* – deformations of the aluminum ring with optimized parameters

Следует отметить, что результаты МКЭ-анализа устанавливают нижнюю границу достижимой точности, поскольку модель учитывает статические нагрузки, но не включает ряд дополнительных факторов, таких как динамические составляющие силы резания, температурные деформации, износ инструмента, а также неидеальность базирования заготовки. Тем не менее полученные количественные оценки имеют значительную практическую ценность для предварительного анализа технологических возможностей и обоснования проектных решений при разработке технологических процессов, в том числе в контексте проектирования гибридного станочного оборудования.

Результаты САМ-моделирования

Виртуальная обработка в САМ-системе SprutCAM (рис. 6) подтвердила полную технологическую реализуемость процессов, построенных на основе оптимизированных рекомендаций СППР.

Для обоих объектов исследования корректно сгенерированы траектории движения инструмента, обеспечен полный съем припуска и исключены коллизии инструмента с элементами станочной системы. Анализ траекторий показал, что оптимизированные параметры не выходят за пределы технологических возможностей станков САК4085 и VMC-CK6140, что подтверждает практическую применимость предложенных решений.

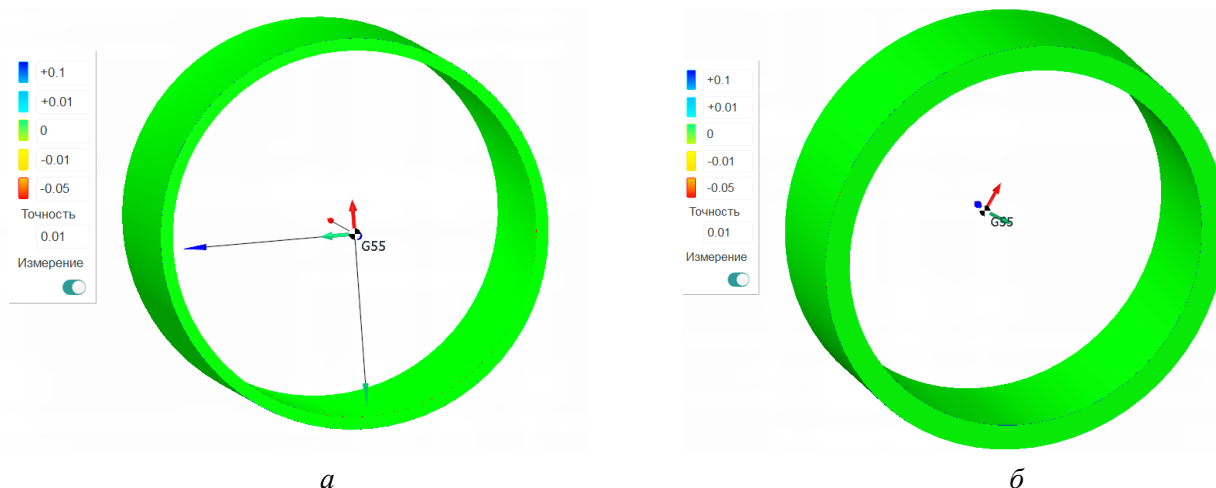


Рис. 6. Результаты виртуальной обработки в SprutCAM:

a – моделирование обработки втулки из стали 45; *б* – моделирование обработки кольца из алюминиевого сплава АК9ч

Fig. 6. Results of virtual machining in SprutCAM:

a – simulation of bushing machining (steel 45); *б* – simulation of ring machining (AK9ch aluminum alloy)

Обсуждение результатов в контексте проектирования гибридного оборудования

Разработанная СППР формализует процесс поиска «мягких» режимов обработки, связывая их непосредственно с ожидаемым геометрическим результатом через количественную оценку деформации заготовки. Это принципиально отличает предложенный подход от существующих методов, основанных на эмпирических таблицах или «черноящичных» оптимизационных алгоритмах, и согласуется с общемировым трендом на развитие научно обоснованных методов управления точностью технологических процессов [66, 67].

Полученные результаты демонстрируют, что целенаправленная оптимизация параметров резания с использованием аналитических моделей может быть не менее эффективной для контроля деформаций тонкостенных деталей, чем усложнение конструкции технологической оснастки [68], и должна рассматриваться как первый и обязательный этап технологической подготовки производства. Данный вывод имеет особое значение для задач проектирования гибридного станочного оборудования, где интеграция интеллектуальных систем управления режимами обработки позволяет компенсировать ограничения, обусловленные конструктивной сложностью multifunctional станочных систем.

В контексте реализации научного проекта по разработке теоретических основ и концептуальных подходов к проектированию гибридного станочного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические технологические операции, настоящее исследование вносит вклад по нескольким направлениям. Во-первых, продемонстрирована методология создания интеллектуальных подсистем, обеспечивающих научно обоснованное назначение параметров механической обработки, – эта методология может быть расширена на случай комбинированных (гибридных) процессов, включающих в себя одновременное или последовательное механическое и поверхностно-термическое воздействия. Во-вторых, предложенная архитектура СППР, основанная на интеграции физико-математических моделей, алгоритмов оптимизации и процедур верификации, формирует прообраз цифрового двойника технологического процесса – ключевого элемента концепции Индустрии 4.0 и интеллектуального производства [69–71]. В-третьих, полученные количественные данные о зависимости деформационного отклика тонкостенных заготовок от параметров обработки создают базу для проектирования систем адаптивного управления гибридным оборудованием, способных корректировать режимы в реальном времени на основе обратной связи от сенсорных систем мониторинга.

Перспективным направлением развития разработанной СППР является ее расширение для учета термических деформаций, возникающих при интеграции поверхностно-термических операций (индукционная закалка, лазерная обработка) в единый технологический цикл с механической обработкой. Подобное расширение потребует включения в математическую модель температурных полей и термоупругих деформаций, однако предложенная архитектура системы обеспечивает возможность такого масштабирования без принципиальной переработки алгоритмической базы.

Следует также отметить некоторые ограничения настоящего исследования, которые определяют направления дальнейших работ. Верификация системы выполнена исключительно средствами компьютерного моделирования; для окончательного подтверждения достоверности результатов необходимо проведение натурных экспериментов с измерением фактических деформаций обработанных деталей. Математическая модель деформации основана на упрощенной модели консольной балки, не учитывающей пространственный характер деформирования реальных деталей, что может приводить к погрешности при обработке деталей со сложной геометрией. Кроме того, в текущей версии системы не учитываются динамические эффекты (вибрации, автоколебания), которые могут оказывать существенное влияние при обработке особо тонкостенных деталей с толщиной стенки менее 1 мм.

Закключение

В результате проведенного исследования разработана и верифицирована методика интеллектуального выбора режимов токарной обработки тонкостенных деталей, реализованная в виде прототипа веб-ориентированной системы поддержки принятия решений, основанной на интеграции аналитического физико-математического моделирования деформационного отклика, итерационного алгоритма многопараметрической оптимизации и процедур кросс-платформенной верификации в САМ/CAE-средах.

Ключевым элементом системы является алгоритм оптимизации, который одновременно и согласованно корректирует все основные техноло-

гические параметры – глубину резания, подачу и скорость резания – в направлении минимизации целевой функции (максимального упругого прогиба заготовки) при соблюдении ограничений на допустимые диапазоны параметров. Алгоритм реализует стратегию приоритетного снижения глубины резания как параметра с наибольшим силовым эффектом, что обеспечивает согласованное уменьшение как сил резания, так и требуемого усилия зажима.

Для тестовых деталей – втулки из стали 45 и кольца из алюминиевого сплава АК9ч – применение алгоритма привело к снижению суммарной силы резания в 2,1 и 10,8 раза соответственно, а усилия зажима – в 3,5 и 8,1 раза. Статический конечно-элементный анализ в ANSYS количественно подтвердил снижение максимальной расчетной упругой деформации на 72,3 % (с 0,0602 до 0,0167 мм) для стальной втулки и на 87,9 % (с 0,0422 до 0,0051 мм) для алюминиевого кольца. Критически важным технологическим результатом является то, что значения деформации после оптимизации не превышают конструкторских допусков на цилиндричность (0,02 и 0,01 мм соответственно), что доказывает способность системы генерировать технологически достаточные режимы обработки. САМ-моделирование в SprutCAM подтвердило полную технологическую корректность сгенерированных управляющих программ.

Проведенное исследование демонстрирует, что системный подход, объединяющий аналитический расчет, алгоритмическую оптимизацию и имитационное моделирование, позволяет перейти от эмпирического назначения режимов резания к научно обоснованному, что создает основу для повышения точности обработки тонкостенных деталей, сокращения доли брака и времени технологической подготовки. Полученные результаты формируют элемент интеллектуальной подсистемы, пригодной для интеграции в состав проектируемого гибридного станочного оборудования нового поколения, объединяющего механические и поверхностно-термические технологические операции, и вносят вклад в развитие методологии создания конкурентоспособных гибридных металлообрабатывающих систем, отвечающих требованиям Индустрии 4.0.



Список литературы

1. Thin-walled part machining process parameters optimization based on finite-element modeling of workpiece vibrations / S. Bolsunovskiy, V. Vermel, G. Gubanov, I. Kacharava, A. Kudryashov // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 8. – P. 276–280. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.102.
2. Горячкин Б.С., Черната Н.С. Обзор возможных вариантов использования технологий и материалов 3D-печати в авиационной промышленности // *E-SCIO*. – 2021. – № 5 (56). – С. 657–682. – EDN XK-PRSK.
3. Predictive modeling of deformation induced by residual stress for thin-walled parts in double-sided alternating precision turning / S. Qi, S. Yan, J. Xu, Y. Sun // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2025. – Vol. 146. – P. 19–29. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.085.
4. Фоменко Р.Н., Тимофеев М.В. Оптимизация технологических условий обработки тонкостенных деталей из алюминиевых сплавов с целью снижения остаточных деформаций // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2018. – № 4 (65). – С. 4–11. – DOI: 10.30987/article_5b28d1921f23d8.29887997.
5. A review of the deformation mechanism and control of low stiffness thin-walled parts / H. Sun, J. Zhao, Z. Zheng, Y. Jiang, X. Jin, S. Deng, Y. Tang, X. Zhang // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2025. – Vol. 60. – P. 322–355. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.007.
6. Yadav M.H., Mohite S.S. Controlling deformations of thin-walled Al 6061-T6 components by adaptive clamping // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 509–516. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.076.
7. The intelligent monitoring technology for machining thin-walled components: A review / G. Liu, Y. Wang, B. Huang, W. Ding // *Machines*. – 2024. – Vol. 12 (12). – P. 876. – DOI: 10.3390/machines12120876.
8. Расчет режимов резания. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения / В.В. Марков, А.В. Сметанников, П.И. Кисеев, Л.И. Лебедева, Д.А. Ветчинников. – М.; Вологда: Инфа-Инженерия, 2023. – 136 с. – ISBN 978-5-9729-1465-4.
9. Integrated multi-objective optimization for high-precision CNC turning of 7075 aluminum alloy / I.I. Ikhries, A.F. Al-Shawabkeh, J.S. Haddad, N.A. Al-Najdawi, F.A. Alfaqs // *Next Materials*. – 2025. – Vol. 9. – P. 101338. – DOI: 10.1016/j.nxmte.2025.101338.
10. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса с применением математических моделей в зависимости от сил зажима в трех шестигрунтовокых самоцентрирующих патронах / А.С. Серков, В.Б. Масягин, Р.А. Артюх, Л.Б. Серкова, В.В. Акимов // *Омский научный вестник*. – 2020. – № 4 (172). – С. 13–18. – DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-13-18. – EDN QDXEER.
11. К вопросу о деформации тонкостенных деталей при обработке на станках токарной группы / Е.В. Арбузов, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2014. – № 2. – С. 36–48. – DOI: 10.7463/0214.0700319. – EDN QLGFKG.
12. Grzesik W., Ruszaj A. Hybrid manufacturing processes – Physical fundamentals, modelling and rational applications. – Cham: Springer, 2021. – 234 p. – ISBN 978-3-030-77106-5. – eISBN 978-3-030-77107-2. – DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2.
13. Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки / В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, К.А. Титова, А.Д. Черников // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 63–86. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86.
14. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools / J. Lv, R. Tang, S. Jia, Y. Liu // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 112 (5). – P. 3864–3874. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
15. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base / V. Skeebe, V. Ivancivsky, A. Chernikov, N. Martyushev, N. Vakhrushev, K. Titova // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (5). – P. 200. – DOI: 10.3390/jmmp8050200. – EDN AYYIFW.
16. Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2016. – № 8. – С. 18–25.
17. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.
18. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Исследование стратегических перспектив модернизации станкостроения // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2017. – Т. 16, № 5 (464). – С. 835–850. – DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
19. Martino J.P. Technological forecasting – An overview // *Management Science*. – 1980. – Vol. 26 (1). – P. 28–33. – DOI: 10.1287/mnsc.26.1.28.
20. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: The

41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, Tokyo, 2008. – London: Springer-Verlag, 2008. – 556 p. – e-ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

21. *Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R.* Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 3. – P. 100100. – DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.

22. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

23. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

24. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 57 (2). – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

25. *Brecher C., Özdemir D.* Integrative production technology: Theory and applications. – Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – e-ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

26. *Yamazaki T.* Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

27. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

28. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials / K. You, G. Yan, X. Luo, M.D. Gilchrist, F. Fang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 677–692. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

29. *Sun S., Brandt M., Dargusch M.S.* Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50 (8). – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

30. *Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H.* Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions // *Journal of Materials Research and Technology*.

– 2021. – Vol. 15. – P. 3016–3027. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.

31. *Lee Y.-H., Lee C.-M.* A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – P. 2590. – DOI: 10.3390/ma12162590.

32. Laser assisted milling device: A review / C.M. Lee, D.H. Kim, J.T. Baek, E.-J. Kim // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2016. – Vol. 3 (2). – P. 199–208. – DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.

33. *Wiedenmann R., Zaeh M.F.* Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2015. – Vol. 8. – P. 70–77. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.08.003.

34. *Rakic S., Marjanovic U., Medic N.* Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0 // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15 (22). – P. 11903. – DOI: 10.3390/app152211903.

35. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation / L. Lattanzi, R. Raffaeli, M. Peruzzini, M. Pellicciari // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 34 (6). – P. 567–597. – DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.

36. *Brecher C., Esser M., Witt S.* Interaction of manufacturing process and machine tool // *CIRP Annals*. – 2009. – Vol. 58 (2). – P. 588–607. – DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.

37. *Grzesik W.* Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review // *Journal of Machine Engineering*. – 2018. – Vol. 18. – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

38. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

39. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales / C. Wei, Z. Zhang, D. Cheng, Z. Sun, M. Zhu, L. Li // *International Journal of Extreme Manufacturing*. – 2021. – Vol. 3 (1). – P. 012003. – DOI: 10.1088/2631-7990/abce04.

40. *Колоскова А.В., Киселев И.А., Иванов И.И.* Моделирование динамики процесса точения с учетом податливости обрабатываемой детали // *Интернет журнал «Науковедение»*. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 70. – EDN YPQINX.

41. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components / H. Ning, W. Zhigang, J. Chengyu, Z. Bing // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 139 (1–3). – P. 332–336. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00550-8.

42. Болотеин А.Н. Расчетное определение технологических остаточных напряжений на основе конечно-элементной модели процесса резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Рыбинск, 2014. – 183 с. – EDN DLOZQD.
43. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review / Y. Bao, B. Wang, Z. He, R. Kang, J. Guo // Chinese Journal of Aeronautics. – 2022. – Vol. 35 (3). – P. 10–26. – DOI: 10.1016/j.cja.2021.01.026.
44. Multi-process aerospace components: Residual stress modeling and deformation optimization / X. Jiang, N. Sun, F. Ren, X. Liu, W. Guo, M. Guo, X. Fan, J. Zhou // International Journal of Mechanical Sciences. – 2026. – Vol. 309. – P. 111077. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.111077.
45. Носиров И.С., Белов А.М. Оптимизация параметров процесса резания токарного станка с ЧПУ с использованием генетического алгоритма // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2020. – № 2. – С. 73–78. – EDN MGPAOQ.
46. You Q., Tang B. Efficient task offloading using particle swarm optimization algorithm in edge computing for industrial internet of things // Journal of Cloud Computing. – 2021. – Vol. 10 (1). – P. 41. – DOI: 10.1186/s13677-021-00256-4.
47. D'Addona D.M., Teti R. Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 7. – P. 323–328. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.055.
48. Гаврюшин С.С., Жаргалова А.Д., Зарецкая В.Д. Оптимизация расчетов режимов фрезерования для тонкостенных деталей вафельного типа при помощи генетического алгоритма // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXVIII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 16–20 мая 2022 г. Т. 1. – М., 2022. – С. 64–65. – EDN KFK-BXT.
49. Martín-Mateos F.J., González Valencia L.C., Serrano Bello R. Expert system to real time control of machining processes // Current Topics in Artificial Intelligence. CAEPIA 2009, Seville, Spain. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. – P. 281–290. – DOI: 10.1007/978-3-642-14264-2_29. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 5988).
50. A novel milling force prediction method based on the AI-empowered dynamic coupling model / Z. Wang, S. Liu, H. Li, D. Peng, H. Cao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2025. – Vol. 241. – P. 113497. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113497.
51. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications / J. Wang, Y. Ma, L. Zhang, R.X. Gao, D. Wu // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 48. – P. 144–156. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
52. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д. Автоматизация выбора рациональных режимов токарной обработки тонкостенных деталей // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 2 (62). – С. 4. – DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1587. – EDN XIEUHR.
53. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей / А.Д. Жаргалова, С.С. Гаврюшин, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, № 6 (37). – С. 117. – EDN XXYHJ.
54. Зайцев В.М., Лепилин В.И. Расчет наивыгоднейшего режима резания при токарной обработке. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1974. – 120 с.
55. Трембач Е.Н., Мелентьев Г.А., Схиртладзе А.Г. Резание материалов: учебник для вузов. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 511 с. – ISBN 978-5-94178-135-5.
56. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 22–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32. – EDN YQYOH.
57. Wang L., Zhao H. A short review on machining deformation control of aero-engine thin-walled casings // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 121 (9–10). – P. 2971–2985. – DOI: 10.1007/s00170-022-10587-9.
58. Wang Y.F., Wong Y.S., Fuh J.Y.H. Off-line modelling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1999. – Vol. 39 (2). – P. 253–271. – DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00026-1.
59. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: a review / H. Liu, C. Wang, T. Li, Q. Bo, K. Liu, Y. Wang // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 17 (4). – P. 55. – DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.
60. Зарецкая В.Д. Алгоритм расчета мягких режимов фрезерной обработки тонкостенных деталей // Политехнический молодежный журнал. – 2021. – № 7 (60). – DOI: 10.18698/2541-8009-2021-7-715. – EDN JXPHOB.
61. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: process technologies / K. Raoufi, J.W. Sutherland, F. Zhao, A.F. Clarens, J.L. Rickli, Z. Fan, H. Huang, Y. Wang, W.J. Lee, N. Mathur, M.J. Triebe, S.S. Desabathina, K.R. Haapala // The International Journal of Advanced Manufacturing Technol-

ogy. – 2024. – Vol. 135. – P. 4089–4118. – DOI: 10.1007/s00170-024-14782-3.

62. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, I. Lazoglu // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

63. An adaptive clamp system for deformation control of aerospace thin-walled parts / W. Zhou, F. Yu, J. Zhang, K. Huang, Z. Xu, X. Liu, Y. Ma, P. Feng, F. Feng // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 107. – P. 115–125. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.040.

64. Технологическая оснастка / В.Г. Мальцев, А.П. Моргунов, Н.С. Морозова, Р.Л. Артюх. – Омск: ОмГТУ, 2019. – 134 с. – ISBN 978-5-8149-2951-8.

65. Prediction of cutting force considering the influence of elastic deformation in ball end milling of thin-walled parts / W. Li, J. Ren, K. Shi, Y. Lu, J. Zhou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 140. – P. 4389–4403. – DOI: 10.1007/s00170-025-16557-w.

66. Chatter stability in turning and milling with in process identified process damping / Y. Kurata, S.D. Merdol, Y. Altintas, N. Suzuki, E. Shamoto // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 4 (6). – P. 1107–1118. – DOI: 10.1299/jamdsm.4.1107.

67. Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components / Z. Li, Z. Zeng, Y. Yang, Z. Ouyang, P. Ding, J. Sun, S. Zhu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 119. – P. 463–482. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.111.

68. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions // *International Journal of Production Research*. – 2001. – Vol. 39 (13). – P. 2867–2894. – DOI: 10.1080/00207540110054579.

69. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51 (11). – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

70. Filho P.T.J.C., Junior O.C. Digital Twin in Industry 4.0: Systematic review and content analysis and an architectural reference model // *Procedia Computer Science*. – 2025. – Vol. 253. – P. 2919–2928. – DOI: 10.1016/j.procs.2025.02.016.

71. Review of applications of Digital Twins and Industry 4.0 for machining / L.R.R. da Silva, D.Y. Pimenov, R.B. da Silva, A. Ercetin, K. Giasin // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9 (7). – P. 211. – DOI: 10.3390/jmmp9070211.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Intelligent decision support system for the optimization of turning parameters of thin-walled parts in the context of designing hybrid metal-cutting equipment

Ayagma Zhargalova^{1, a, *}, Vadim Skeebea^{2, b, **}, Ziqi Tong^{1, c}, Semyon Papko^{2, d}, Ivan Yulusov^{2, e}

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>,  azhargalova@bmstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeebea_vadim@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0008-6174-3234>,  tongziqi29@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0009-0004-4512-5963>,  papko.duty@yandex.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0006-7566-6722>,  yulusov.2017@stud.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 January 2026

Revised: 02 February 2026

Accepted: 14 February 2026

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Thin-walled parts

Intelligent decision support system

Elastic deformation

Optimization of cutting parameters

Hybrid machine-tool equipment

Simulation-based modeling

Finite element method (FEM)

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSUN-2026-0005).

ABSTRACT

Introduction. Machining of thin-walled parts represents one of the most challenging problems in modern mechanical engineering, particularly in the aerospace industry, precision instrumentation, and other high-technology sectors where requirements for geometric accuracy are critical. The low bending stiffness of such structures causes extreme sensitivity to the forces arising during machining: elastic deformations induced by the combined action of cutting forces and clamping forces lead to significant deviations from specified dimensions and shape, constituting one of the primary causes of manufacturing defects. Conventional methods of cutting parameter selection, based on reference data and operator experience, do not provide the capabilities for quantitative prediction of thin-walled workpiece deformation behavior and fail to account for the specifics of their deformation behavior. This problem is particularly relevant in the context of developing next-generation hybrid machine tools integrating mechanical and surface-thermal technological operations, where scientifically based selection of machining parameters is an essential condition for ensuring the required product quality. **The purpose of the present work** is to develop, implement in software, and comprehensively verify an intelligent decision support system (DSS) prototype designed for the scientifically based selection of optimal turning parameters to minimize elastic deformation of thin-walled parts as an integral component of a design methodology for hybrid metal-cutting systems. **Research methods.** The system is based on an analytical mathematical model establishing the functional relationship between cutting parameters, the resultant cutting force, and the elastic deflection of the workpiece, calculated using the cantilever beam model. An iterative multi-parameter optimization algorithm with the objective function of minimizing maximum deflection was implemented. Verification of system effectiveness was conducted on two representative thin-walled parts – a bushing made of *steel 45* and a ring made of *AK9ch* aluminum alloy – through comprehensive simulation that included: verification of process technological feasibility in the *SprutCAM* CAM system and evaluation of deformation fields via static finite element analysis in the *ANSYS Mechanical* CAE system. **Results and discussion.** Application of the developed DSS provided a significant reduction in force exerted on the workpiece: the tangential cutting force component decreased by a factor of 2.1 for the steel bushing and by a factor of 10.8 for the aluminum ring. Finite element analysis confirmed a reduction in maximum elastic deformation of 72.3% (from 0.0602 to 0.0167 mm) for the steel bushing and of 87.9% (from 0.0422 to 0.0051 mm) for the aluminum ring. A key technological result is that deformation values after optimization do not exceed the design tolerances for cylindricity. *SprutCAM* simulation confirmed the complete technological feasibility of the machining processes. The obtained results demonstrate the prospects of integrating intelligent decision-making systems into the design methodology of hybrid machine tools to enhance the competitiveness of the domestic machine tool industry.

For citation: Zhargalova A.D., Skeebea V.Yu., Tong Ziqi, Papko S.S., Yulusov I.S. Intelligent decision support system for the optimization of turning parameters of thin-walled parts in the context of designing hybrid metal-cutting equipment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 130–151. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-130-151. (In Russian).

* Corresponding author

Zhargalova Ayagma D., Senior Lecturer
 Bauman Moscow State Technical University,
 5, 2nd Baumanskaya St., Building 1,
 105005, Moscow, Russian Federation
 Tel.: +7 903 177-52-38, e-mail: azhargalova@bmstu.ru

** Corresponding author

Skeebea Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel.: +7 383 346-17-79, e-mail: skeebea_vadim@mail.ru

References

1. Bolsunovskiy S., Vermel V., Gubanov G., Kacharava I., Kudryashov A. Thin-walled part machining process parameters optimization based on finite-element modeling of workpiece vibrations. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 276–280. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.102.
2. Goryachkin B.S., Chernata N.S. Obzor vozmozhnykh variantov ispol'zovaniya tekhnologii i materialov 3D-pechati v aviatsionnoi promyshlennosti [Review of possible applications of 3D printing technologies and materials in the aviation industry]. *E-SCIO*, 2021, no. 5 (56), pp. 657–682. (In Russian).
3. Qi S., Yan S., Xu J., Sun Y. Predictive modeling of deformation induced by residual stress for thin-walled parts in double-sided alternating precision turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, vol. 146, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.04.085.
4. Fomenko R.N., Timofeev M.V. Optimizatsiya tekhnologicheskikh uslovii obrabotki tonkostennykh detalei iz alyuminiyevykh splavov s tsel'yu snizheniya ostatochnykh deformatsii [Technological conditions optimization for aluminum alloy thin-walled parts machining to decrease residual deformations]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2018, no. 4, pp. 4–11. DOI: 10.30987/article_5b28d1921f23d8.29887997.
5. Sun H., Zhao J., Zheng Z., Jiang Y., Jin X., Deng S., Tang Y., Zhang X. A review of the deformation mechanism and control of low stiffness thin-walled parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2025, vol. 60, pp. 322–355. DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.05.007.
6. Yadav M.H., Mohite S.S. Controlling deformations of thin-walled Al 6061-T6 components by adaptive clamping. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 509–516. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.076.
7. Liu G., Wang Y., Huang B., Ding W. The intelligent monitoring technology for machining thin-walled components: A review. *Machines*, 2024, vol. 12 (12), p. 876. DOI: 10.3390/machines12120876.
8. Markov V.V., Smetannikov A.V., Kiskeev P.I., Lebedeva L.I., Vetchinnikov D.A. *Raschet rezhimov rezaniya. Kursovoe i diplomnoe proektirovanie po tekhnologii mashinostroeniya* [Calculation of cutting modes. Course and thesis design in machine building technology]. Moscow; Vologda, Infa-Engineering Publ., 2023. 136 p. ISBN 978-5-9729-1465-4.
9. Ikhries I.I., Al-Shawabkeh A.F., Haddad J.S., Al-Najdawi N.A., Alfaqs F.A. Integrated multi-objective optimization for high-precision CNC turning of 7075 aluminum alloy. *Next Materials*, 2025, vol. 9, p. 101338. DOI: 10.1016/j.nxmte.2025.101338.
10. Serkov A.S., Masyagin V.B., Artyukh R.A., Serkova L.B., Akimov V.V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zagotovki zubchatogo koleasa s primeneniem matematicheskikh modelei v zavisimosti ot sil zazhima v trekh shestikulachkovykh samotsentriruyushchikh patronakh [Studying stress-strain state of gear billet using mathematical models depending on clamping forces in 3 and 6 cam self-centering chucks]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2020, no. 4 (172), pp. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-13-18.
11. Arbuzov E.V., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. K voprosu o deformatsii tonkostennykh detalei pri obrabotke na stankakh tokarnoi gruppy [On deformation of thin-walled parts while turning on the lathes]. *Nauka i obrazovanie = Science and education*, 2014, no. 2, pp. 36–48. DOI: 10.7463/0214.0700319.
12. Grzesik W., Ruszaj A. *Hybrid manufacturing processes – Physical fundamentals, modelling and rational applications*. Cham, Springer, 2021. 234 p. ISBN 978-3-030-77106-5. eISBN 978-3-030-77107-2. DOI: 10.1007/978-3-030-77107-2.
13. Skeeba V.Yu., Vakhrushev N.V., Titova K.A., Chernikov A.D. Ratsionalizatsiya rezhimov poverkhnostnoi zakalki VEN TVCh rabochikh poverkhnostei puansona v usloviyakh gibridnoi obrabotki [Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 63–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86.
14. Lv J., Tang R., Jia S., Liu Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112 (5), pp. 3864–3874. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
15. Skeeba V., Ivancivsky V., Chernikov A., Martyushev N., Vakhrushev N., Titova K. Design and technological aspects of integrating multi-blade machining and surface hardening on a single machine base. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (5), p. 200. DOI: 10.3390/jmmp8050200.
16. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.
17. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemyykh na edinoi stanochnoi baze

[Improving the efficiency of surfacethermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.

18. Ryzhikova T.N., Borovskii V.G. Issledovanie strategicheskikh perspektiv modernizatsii stankostroeniya [Exploring the strategic perspectives for machine tool industry modernization]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* = *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 835–850. DOI: 10.24891/ea.16.5.835.

19. Martino J.P. Technological forecasting – An overview. *Management Science*, 1980, vol. 26 (1), pp. 28–33. DOI: 10.1287/mnsc.26.1.28.

20. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*. The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, Tokyo, 2008. London, Springer-Verlag, 2008. 556 p. e-ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

21. Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 3, p. 100100. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.

22. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.

23. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

24. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57 (2), pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

25. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: Theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. e-ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

26. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

27. Skeebe V.Yu. *Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov* [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

28. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

29. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (8), pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

30. Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H. Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 3016–3027. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.

31. Lee Y.-H.; Lee C.-M. A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V. *Materials*, 2019, vol. 12, p. 2590. DOI: 10.3390/ma12162590.

32. Lee C.M., Kim D.H., Baek J.T., Kim E.-J. Laser assisted milling device: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016, vol. 3 (2), pp. 199–208. DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.

33. Wiedenmann R., Zaeh M.F. Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, vol. 8, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.08.003.

34. Rakic S., Marjanovic U., Medic N. Advancements in smart manufacturing and Industry 4.0. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (22), p. 11903. DOI: 10.3390/app152211903.

35. Lattanzi L., Raffaeli R., Peruzzini M., Pellicciari M. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, vol. 34 (6), pp. 567–597. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003.

36. Brecher C., Esser M., Witt S. Interaction of manufacturing process and machine tool. *CIRP Annals*, 2009, vol. 58 (2), pp. 588–607. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.005.

37. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18, pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

38. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
39. Wei C., Zhang Z., Cheng D., Sun Z., Zhu M., Li L. An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: from macro- to micro-scales. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, vol. 3 (1), p. 012003. DOI: 10.1088/2631-7990/abce04.
40. Koloskova A.V., Kiselev I.A., Ivanov I.I. Modelirovanie dinamiki protsessa tocheniya s uchetom podatlivosti obrabatyvaemoi detali [Modeling of the turning process dynamics, taking into the account the compliance of the workpiece]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» = Online Journal «Naukovedenie»*, 2017, vol. 9, no. 2, p. 70.
41. Ning H., Zhigang W., Chengyu J., Bing Z. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 139 (1–3), pp. 332–336. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00550-8.
42. Bolotein A.N. *Raschetnoe opredelenie tekhnologicheskikh ostatochnykh napryazhenii na osnove konechno-elementnoi modeli protsessa rezaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Computational determination of technological residual stresses based on a finite element model of the cutting process. PhD eng. sci. diss.]. Rybinsk, 2014. 183 p.
43. Bao Y., Wang B., He Z., Kang R., Guo J. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, vol. 35 (3), pp. 10–26. DOI: 10.1016/j.cja.2021.01.026.
44. Jiang X., Sun N., Ren F., Liu X., Guo W., Guo M., Fan X., Zhou J. Multi-process aerospace components: Residual stress modeling and deformation optimization. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2026, vol. 309, p. 111077. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.111077.
45. Nosiroy I.S., Belov A.M. Optimizatsiya parametrov protsessa rezaniya tokarnogo stanka s ChPU s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Optimization of parameters of a cnc lathe cutting process using a genetic algorithm]. *Izvestiya SPbGETU LETI = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*, 2020, no. 2, pp. 73–78.
46. You Q., Tang B. Efficient task offloading using particle swarm optimization algorithm in edge computing for industrial internet of things. *Journal of Cloud Computing*, 2021, vol. 10 (1), p. 41. DOI: 10.1186/s13677-021-00256-4.
47. D'Addona D.M., Teti R. Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 7, pp. 323–328. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.055.
48. Gavryushin S.S., Zhargalova A.D., Zaretskaya V.D. [Optimization of milling process calculations for thin-walled waffle-type parts using a genetic algorithm]. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktiv i sploshnykh sred* [XXVIII International Symposium «Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums» Dedicated to A.G. Gorshkov]. Kremyonki, 2022, pp. 64–65. (In Russian).
49. Martín-Mateos F.J., González Valencia L.C., Serrano Bello R. Expert system to real time control of machining processes. *Current Topics in Artificial Intelligence. CAEPIA 2009. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 5988. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 281–290. DOI: 10.1007/978-3-642-14264-2_29.
50. Wang Z., Liu S., Li H., Peng D., Cao H. A novel milling force prediction method based on the AI-empowered dynamic coupling model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, vol. 241, p. 113497. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113497.
51. Wang J., Ma Y., Zhang L., Gao R.X., Wu D. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, vol. 48, pp. 144–156. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
52. Ereimeikin P.A., Zhargalova A.D. Avtomatizatsiya vybora ratsional'nykh rezhimov tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Automation of assignment of rational thin-walled parts turning mode]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 2, p. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-2-1587.
53. Zhargalova A.D., Gavriushin S.S., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. O «myagkikh» rezhimakh rezaniya dlya obrabotki tonkostennykh detalei [About soft modes of cutting for processing thin-walled parts]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» = Online Journal «Naukovedenie»*, 2016, vol. 8, no. 6, p. 117.
54. Zaitsev V.M., Lepilin V.I. *Raschet naivygodneishego rezhima rezaniya pri tokarnoi obrabotke* [Calculation of the most advantageous cutting mode in turning operations]. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1974. 120 p.
55. Trembach E.N., Melent'ev G.A., Skhirtladze A.G. *Rezanie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Material cutting]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2012. 511 p. ISBN 978-5-94178-135-5.
56. Ereimeikin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. Raschetno-eksperimental'naya otsenka tekhnologicheskikh deformatsii pri «myagkikh» rezhimakh tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Empirical evaluation of

technological deformations for “soft” cutting modes during thin-walled parts turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 22–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.

57. Wang L., Zhao H. A short review on machining deformation control of aero-engine thin-walled casings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 121 (9–10), pp. 2971–2985. DOI: 10.1007/s00170-022-10587-9.

58. Wang Y.F., Wong Y.S., Fuh J.Y.H. Off-line modelling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39 (2), pp. 253–271. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00026-1.

59. Liu H., Wang C., Li T., Bo Q., Liu K., Wang Y. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, vol. 17 (4), p. 55. DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.

60. Zaretskaya V.D. Algoritim rascheta myagkikh rezhimov frezernoi obrabotki tonkostennykh detalei [Computation algorithm for soft modes of milling thin-walled parts]. *Politekhnicheskii molodezhnyi zhurnal = Polytechnic Youth Journal*, 2021, no. 7 (60). DOI: 10.18698/2541-8009-2021-7-715.

61. Raoufi K., Sutherland J.W., Zhao F., Clarens A.F., Rickli J.L., Fan Z., Huang H., Wang Y., Lee W.J., Mathur N., Triebe M.J., Desabathina S.S., Haapala K.R. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: process technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 135, pp. 4089–4118. DOI: 10.1007/s00170-024-14782-3.

62. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

63. Zhou W., Yu F., Zhang J., Huang K., Xu Z., Liu X., Ma Y., Feng P., Feng F. An adaptive clamp system for deformation control of aerospace thin-walled parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 107, pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.040.

64. Mal'tsev V.G., Morgunov A.P., Morozova N.S., Artyukh R.L. *Tekhnologicheskaya osnastka* [Technological equipment]. Omsk, OmSTU Publ., 2019. 134 p. ISBN 978-5-8149-2951-8.

65. Li W., Ren J., Shi K., Lu Y., Zhou J. Prediction of cutting force considering the influence of elastic deformation in ball end milling of thin-walled parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 140, pp. 4389–4403. DOI: 10.1007/s00170-025-16557-w.

66. Kurata Y., Merdol S.D., Altintas Y., Suzuki N., Shamoto E. Chatter stability in turning and milling with in process identified process damping. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2010, vol. 4 (6), pp. 1107–1118. DOI: 10.1299/jamdsm.4.1107.

67. Li Z., Zeng Z., Yang Y., Ouyang Z., Ding P., Sun J., Zhu S. Research progress in machining technology of aerospace thin-walled components. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 119, pp. 463–482. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.111.

68. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*, 2001, vol. 39 (13), pp. 2867–2894. DOI: 10.1080/00207540110054579.

69. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (11), pp. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

70. Filho P.T.J.C., Junior O.C. Digital Twin in Industry 4.0: Systematic review and content analysis and an architectural reference model. *Procedia Computer Science*, 2025, vol. 253, pp. 2919–2928. DOI: 10.1016/j.procs.2025.02.016.

71. da Silva L.R.R., Pimenov D.Y., da Silva R.B., Ercetin A., Giasin K. Review of applications of Digital Twins and Industry 4.0 for machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, vol. 9 (7), p. 211. DOI: 10.3390/jmmp9070211.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.