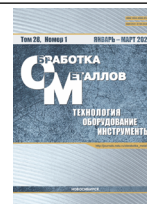




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оптимизация режимов финишного точения металл-композитной системы с металлической оболочкой толщиной 2 мм по критериям термонагруженности и износа режущего инструмента

Николай Любимый^a, Борис Четвериков^{b, *}, Михаил Герасимов^c, Андрей Польшин^d,
Ардалион Мальцев^e, Михаил Быценко^f, Александр Тихонов^g

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, 308012, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>,  nsclubim@bk.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>,  await_rescue@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0001-9073-5649>,  mail_mihail@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>,  info@polshin.ru;
^e  <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>,  ardalion_bgstu@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>,  b.michutka2005@gmail.com;
^g  <https://orcid.org/0000-0003-4450-502X>,  cherep2240@rambler.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.01

История статьи:

Поступила: 17 ноября 2025
Рецензирование: 17 декабря 2025
Принята к печати: 23 декабря 2025
Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Металл-композитные системы
Аддитивные технологии
Металлополимер
Температура резания
Межфазная граница
Модель
Оптимизация

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-10022, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Благодарности

Исследование выполнено с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается задача выбора режимов финишного точения металл-композитной системы с тонкостенной металлической оболочкой толщиной 2 мм, полученной методом селективного лазерного сплавления, и внутренним металлополимерным наполнителем. Актуальность работы связана с необходимостью обеспечения качества обработки внешней поверхности при жестком ограничении температуры на межфазной границе «металл – металлополимер» из-за низкой термостойкости наполнителя. **Цель работы:** на основе ранее разработанных регрессионных моделей температуры на межфазной границе и износа режущего инструмента сформировать и реализовать подход к многокритериальной оптимизации режимов финишного точения металл-композитной системы, обеспечивающий минимизацию износа инструмента при соблюдении температурных ограничений и требований к качеству поверхности. **Методы и методология.** В качестве методов и методологии исследования использованы ранее разработанные регрессионная модель температуры на межфазной границе типа 2Т3 и модель износа режущего инструмента по типу обобщенного уравнения Фика – Тейлора для твердосплавной пластины АН6225. На их основе сформулирована задача математического программирования с нелинейным температурным ограничением, решаемая методом последовательного квадратичного программирования в заданных диапазонах скорости резания, подачи и глубины резания. **Результаты и обсуждение.** В результате численной реализации предложенного подхода получены области допустимых и рациональных режимов финишного точения металл-композитной системы по критериям термонагруженности и износа инструмента. Показано доминирующее влияние глубины резания на температуру на межфазной границе «металл – металлополимер»; выявлено, что температурное ограничение формирует границы допустимой области режимов; определены сочетания скорости резания, подачи и глубины, обеспечивающие одновременное соблюдение температурного порога металлополимера и приемлемый уровень износа твердосплавной пластины АН6225.

Для цитирования: Оптимизация режимов финишного точения металл-композитной системы с металлической оболочкой толщиной 2 мм по критериям термонагруженности и износа режущего инструмента / Н.С. Любимый, Б.С. Четвериков, М.Д. Герасимов, А.А. Польшин, А.К. Мальцев, М.В. Быценко, А.А. Тихонов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 29–45. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-29-45.

Введение

Аддитивное производство (АП) и, в частности, технологии селективного лазерного сплавления Selective Laser Melting (SLM) активно внедряются при изготовлении ответственных деталей сложной формы и тонкостенных оболочек

*Адрес для переписки

Четвериков Борис Сергеевич, к.т.н., доцент
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
ул. Костюкова, д. 46,
308012, г. Белгород, Россия
Тел.: +7 951 134-32-43, e-mail: await_rescue@mail.ru

для машиностроения и инструментального производства. При этом для большинства металлических материалов, полученных методами Laser Powder Bed Fusion (LPBD) [1], характерна высокая остаточная шероховатость и выраженная анизотропия свойств, что требует обязательной финишной механической обработки для обеспечения требуемой точности и качества поверхностей [2]. Показано, что для титана Ti6Al4V массовая доводочная обработка позволяет существенно снизить шероховатость, однако исходно «как есть» состояние деталей остается неприемлемым для многих применений, а эффективность послепечатной обработки существенно зависит от ориентации построения и параметров процесса [2].

Отдельным классом объектов являются тонкостенные аддитивно изготовленные оболочки, в том числе со сложной пространственной геометрией. В работах А. Исаева и соавторов исследованы структура и обрабатываемость тонкостенных деталей из титанового сплава, полученных по технологиям SLM/EBM [3]. Показано, что малый радиус жесткости и наличие остаточных напряжений приводят к значительным деформациям при фрезеровании и точении, а выбор стратегии обработки и схемы закрепления критически влияет на точность геометрии [4]. Исследования В. Hintze и соавторов по финишной обработке тонкостенных SLM-компонентов Ti6Al4V с учетом удаления поддержек показали, что при неправильном подборе стратегии фрезерования и последовательности удаления поддерживающих структур возрастает прогиб стенок и риск выхода за допуски [5]. В работах по прецизионному точению тонких стенок деталей из Ti6Al4V, полученных SLM, показано, что при толщине стенки порядка 1 мм возможно обеспечить приемлемую целостность поверхности, однако необходим тщательный контроль режимов и схемы закрепления [6].

Помимо геометрической точности и прогибов тонкостенных поверхностей, важную роль в постобработке аддитивных деталей играет режим термонагружения в зоне резания. Повышенная шероховатость, пористость и структурные неоднородности SLM-деталей приводят к изменению теплоотвода и уровней контактных напряжений, что в целом ухудшает обрабатываемость по сравнению с прокатанными или кова-

ными аналогами. В частности, при сравнении обработки аддитивно изготовленной и деформированной стали 316L установлено, что для деталей, полученных SLM, требуются более высокие силы резания [7], наблюдается иная картина деформации и более интенсивный износ инструмента, особенно при сухой обработке [8]. Похожие выводы сделаны и для других аддитивно изготовленных сплавов: отмечается, что высокая твердость и низкая теплопроводность приводят к росту температур в зоне резания и ускоренному износу режущего инструмента [9].

В большинстве перечисленных работ объектом исследования являются монолитные аддитивно изготовленные заготовки. Вместе с тем для повышения технико-экономической эффективности все большее распространение получают комбинированные металл-композитные конструкции [10], в которых SLM-оболочка обеспечивает прочность и жесткость внешних поверхностей, а внутренняя полость заполняется другим материалом – например, полимером или металлополимерным композитом [11], выполняющим функции демпфирования, снижения массы и стоимости [12]. Для таких систем критически важным становится температурный режим на межфазной границе «металл – полимер»: превышение температурного предела полимерной матрицы приводит к деградации адгезионной связи, образованию дефектов и потере эксплуатационных свойств. Однако в доступной литературе исследования, посвященные финишной механической обработке именно металл-полимерных систем с тонкостенной металлической оболочкой, практически отсутствуют. Как правило, рассматриваются либо отдельно процессы резания металлов, либо технологии обработки полимерных и полимер-композитных материалов.

Температура в зоне резания традиционно считается одним из ключевых параметров процесса точения, определяющим стойкость инструмента, качество обработанной поверхности и формирование остаточных напряжений. Для классических систем «инструмент – заготовка» на основе сталей и титановых сплавов разработано большое число математических моделей, связывающих температуру с режимами резания (скоростью, подачей, глубиной), механическими свойствами материала и параметрами контакт-

ного теплообмена. В работе [13] предложена модель предсказания температуры при точении биомедицинской нержавеющей стали на основе искусственных нейронных сетей, при этом экспериментальные данные по температуре получены методом инфракрасной термографии. Аналитические и полуаналитические модели температурного поля при точении закаленных инструментальных сталей с использованием многослойных покрытых инструментов позволяют оценивать не только среднюю температуру резания, но и температуру на границе «покрытие – подложка», что важно для прогнозирования долговечности инструмента [14]. Показано, что рост скорости резания и подачи, как правило, приводит к существенному увеличению температуры, а влияние глубины резания зависит от конкретной схемы теплоотвода и геометрии инструмента.

Для тонкостенных деталей с ограниченным теплоотводом проблема становится еще более острой. В ряде работ для аддитивных тонкостенных компонентов использовались ИК-камеры и встраиваемые датчики для мониторинга температуры при фрезеровании и точении; показано, что локальные перегревы могут достигать значений, при которых существенно снижается твердость материала и ускоряется износ инструмента [15]. Однако даже в этих исследованиях внимание уделяется в основном монолитным металлическим деталям, а не системам с внутренним полимерным наполнителем и жесткими ограничениями по температуре на межфазной границе.

Не менее развита и область моделирования износа режущего инструмента. Классический подход основывается на уравнении стойкости Тейлора, связывающем скорость резания и время стойкости инструмента; в последующих модификациях в уравнение вводились также подача и глубина резания, что позволило адекватнее учитывать реальное влияние режимов на износ [16]. На основе обобщенных уравнений Тейлора строятся модели прогнозирования стойкости для различных сочетаний материала и инструмента, а также условий охлаждения, в том числе с использованием современных методов оптимизации и байесовского обновления параметров [17]. Обзор [18] показывает, что существующие модели износа можно разделить на два основных

класса: модели типа «режимы – стойкость» (на основе уравнения Тейлора и его модификаций) и модели, основанные на локальных механизмах износа и расчете контактных напряжений и температур. В последнее время активно развиваются гибридные подходы, комбинирующие классические уравнения стойкости с дополнительными информативными параметрами – например, потребляемой мощностью резания [19] или параметрами ультразвуковых колебаний при вибрационном резании [20].

Во многих работах модели температуры и износа используются для оптимизации режимов резания. Так, в работе [16] на основе расширенного уравнения Тейлора и методов экспериментального планирования проанализировано влияние скорости, подачи и глубины на стойкость при точении и получены рекомендуемые области режимов, обеспечивающие максимальный срок службы инструмента. Однако подобные исследования выполняются для однородных металлических заготовок, а в качестве ограничений, как правило, выступают лишь шероховатость поверхности, силы резания или энергетические показатели.

Таким образом, анализ современной литературы показывает, что процессы финишной механической обработки аддитивно изготовленных тонкостенных металлических деталей достаточно подробно изучены с точки зрения геометрической точности, прогибов и общих вопросов обрабатываемости [2–7]. Для традиционных и аддитивных металлических материалов также разработан широкий спектр моделей температуры резания и износа инструмента, позволяющих проводить оптимизацию режимов точения по отдельным критериям [13–20]. При этом практически отсутствуют работы, в которых бы совместно рассматривались тонкостенная SLM-оболочка и внутреннее металлополимерное заполнение с жестким ограничением температуры на межфазной границе, а критерии оптимизации включали бы одновременно термонагруженность системы и износ инструмента.

Особенностью рассматриваемой в настоящей работе металл-композитной системы (МКС) является наличие тонкостенной металлической оболочки толщиной около 2 мм, полученной методом SLM из жаропрочной стали-аналога, и наполнителя на основе металлополимерного ком-

позиционного материала, для которого известен предельно допустимый температурный уровень (170 °С). При финишном точении внешней поверхности такой оболочки необходимо, с одной стороны, обеспечить требуемую точность и шероховатость, а с другой – исключить перегрев на границе «металл – металлополимер», способный привести к деградации полимерной матрицы и нарушению адгезии. Одновременно для обеспечения экономичности процесса требуется учитывать износ твердосплавной пластины и ограничивать режимы с точки зрения стойкости инструмента.

Следует отметить, что ранее авторами на основе полного факторного эксперимента $2^3 + n_0$ была построена и верифицирована регрессионная модель температуры 2ТЗ на межфазной границе «металл – металлополимер», описывающая зависимость температуры от скорости резания, подачи и глубины резания в заданном диапазоне режимов [21]. В отдельном исследовании было проанализировано влияние отдельных параметров на термонагруженность системы, определены области допустимых режимов по температурному критерию и подтверждена адекватность модели по данным контактных измерений и тепловизионного контроля. Таким образом, в распоряжении разработчика технологии финишной обработки металл-композитной системы с оболочкой толщиной 2 мм уже имеется готовая регрессионная модель температуры, пригодная для использования в оптимизационных расчетах.

В этой связи возникает научно-практическая задача разработки подхода к выбору режимов финишного точения металл-композитной системы с SLM-оболочкой толщиной 2 мм, который бы одновременно учитывал следующее:

- 1) экспериментально построенную регрессионную модель температуры на межфазной границе «металл – металлополимер»;
- 2) модель износа режущего инструмента, зависящую от режимов резания;
- 3) технологические ограничения по температуре металлополимера и качеству обработанной поверхности.

Цель работы: разработать и верифицировать подход к многокритериальной оптимизации режимов финишного точения металл-композитной системы с металлической оболочкой

толщиной 2 мм, обеспечивающий минимизацию износа режущего инструмента при соблюдении ограничений по температуре на межфазной границе «металл – металлополимер» и требований к качеству поверхности.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие *задачи*.

1. Использовать ранее разработанную регрессионную модель 2ТЗ температуры на межфазной границе «металл – металлополимер» для определения допустимой области режимов финишного точения металл-композитной системы с оболочкой толщиной 2 мм по температурному критерию, учитывая предельно допустимую температуру металлополимерного заполнителя.

2. Аналитически определить регрессионную модель износа режущего инструмента типа Фика – Тейлора для оценки изменения износа твердосплавной пластины АН6225 в зависимости от скорости резания, подачи и глубины резания в рассматриваемой области параметров.

3. Сформулировать задачу многокритериальной оптимизации режимов финишного точения металл-композитной системы по критерию минимизации износа инструмента при наличии ограничений на температуру на межфазной границе и требований к шероховатости обработанной поверхности.

4. Реализовать выбранный метод математического программирования (метод последовательного квадратичного программирования) для решения задачи многокритериальной оптимизации с использованием регрессионных моделей температуры и износа, определить рациональные сочетания скорости резания, подачи и глубины резания в заданных интервалах.

5. Выполнить анализ полученных рациональных областей режимов, оценить влияние ограничений по температуре и износу на выбор режимов финишного точения и сформулировать практические рекомендации по нормированию режимов обработки металл-композитных систем с металлической оболочкой толщиной 2 мм.

Методика исследований

Экспериментальная база для математической модели 2ТЗ была получена на эмуляторе МКС «металлическая оболочка – металлополимер» при толщине оболочки $\delta = 2$ мм (рис. 1). Измерял-



Рис. 1. Физическая модель эмулятора МКС для измерения температурных данных на границе фаз при точении, установленная в патроне станка 16K20

Fig. 1. Physical model of the MCS emulator for temperature measurement at the interface during turning, mounted in the chuck of a 16K20 lathe

ся экстремум температуры T на межфазной границе «металл – МПКМ» в стационарном участке резания. Точение выполнялось на универсальном токарном станке 16K20 с применением системы подачи смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). В качестве рабочей жидкости использовалась водно-масляная эмульсия на минеральной основе типа И-20А с добавлением 5 % эмульгола ЭД-20. Подача эмульсии осуществлялась непрерывным потоком непосредственно в зону резания под давлением $0,25 \pm 0,05$ МПа со средним расходом $2...3$ л/мин.

По экспериментальным данным была построена регрессионная модель второго порядка (модель 2ТЗ) в кодированных переменных. Подставив кодированные значения в уравнение регрессии и проведя алгебраические преобразования, в итоге вывели уравнение модели 2ТЗ, приведенное к реальным физическим переменным:

$$\begin{aligned} 3,5TP = & 1484,16S^2 + 7,604SV - \\ & -388,75St - 915,59S + \\ & +0,0041V^2 - 0,4646Vt - 1,376V + \\ & +14,84t^2 + 85,44t + 182,57. \end{aligned} \quad (1)$$

Следует отметить, что при получении модели в эмуляторе МКС в качестве материала заменителя стали ЭП648 использовалась сталь 12X18H10T, поскольку она является близким аналогом материала ЭП648 по тепловым характеристикам, так как ее теплопроводность составляет $14...16$ Вт/(м·К), что близко к $12...15$ Вт/(м·К) у ЭП648.

По выделению тепла при точении ближе всего к ЭП648 находятся стали 12X18H10T, 08X18H10T и 10X17H13МДТ со схожими твердостью, легированием и низкой теплопроводностью.

Применение стали 12X18H10T также обусловлено тем, что она имеет наиболее близкие свойства и доступна на рынке сортамента в качестве трубы размером $\varnothing 63,5 \times 8$ мм.

В табл. 1 приведено сравнение различных моделей температуры резания.

Проведя анализ, можно сделать вывод, что для быстрой оценки в лабораторных условиях или учебных работах модель Куликова подходила лучше. Для научных исследований с анализом деформации и трения подойдет модель Oxley [22]. Для моделирования высокоскоростной обработки или с применением FEM лучше использовать модель Komanduri [23].

Для целей настоящего исследования с учетом наличия исходных данных процесса, а также рекомендаций компаний – мировых лидеров производителей металлорежущего инструмента – была выбрана модель Oxley/Komanduri (ISO/TR 18521), имеющая вид

$$T_{\text{рез}} = 0,4 \frac{F_c V}{\rho c A}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где F_c – сила резания ($F_c = k_c A$, где $A = St$); ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость; V – скорость резания.

Тогда

$$T_{\text{рез}} \approx KStV, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

На основе эмпирических данных по теории резания [24], данных лидера мирового производства режущего инструмента [25] и с учетом аппроксимации данных исследования модель температуры резания будет иметь следующий вид:

$$T_{\text{рез}} = 350 + 4,5StV, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Для цели оптимизации важно формализовать и связать температуру в зоне резания с показате-

Таблица 1

Table 1

Сравнение моделей температуры резания
Comparison of cutting temperature models

Критерий / Criterion	Модель Куликова / <i>Kulikov's model</i>	Модель Oxley / <i>Oxley's model</i>	Модель Komanduri / <i>Komanduri's model</i>
Основа модели / Model basis	Эмпирико-аналитическая / Empirical-analytical	Аналитическая (деформация + трение) / Analytical (deformation + friction)	Аналитическая (теплопередача) / Analytical (heat transfer)
Учитывает трение / Accounts for friction	Да / Yes	Да / Yes	Да / Yes
Учитывает деформацию / Accounts for deformation	Да / Yes	Да / Yes	Частично / Partially
Применение / Application	Базовые оценки / Basic estimates	Общие исследования / General research	Высокоскоростная обработка / High-speed machining
Требуется настройки / Requires calibration	Да / Yes	Нет, но требует входных данных / No, but requires input data	Требуется FEA или численные методы / Requires FEA or numerical methods
Скорость расчета / Calculation speed	Высокая / High	Средняя / Moderate	Низкая / Low

телем износа. Была использована модель Фика – Тейлора, предполагающая, что износ инструмента (например, по задней поверхности) происходит за счет комплексного влияния тепловых и механических факторов и может быть описан эмпирической зависимостью

$$Z(S, V, t) = KS^a t^b V^c e^{dT} = KS^a t^b V^c e^{\lambda StV}, \quad (5)$$

где Z – относительный или абсолютный износ (например, ширина пятна износа); K – масштабный коэффициент; T – температура в зоне контакта; a, b, c, d – эмпирические показатели степени, зависящие от материала заготовки, инструмента и условий.

С целью прогнозирования износа производители инструмента Tungaloy [26] в типичных условиях для нержавеющей сталей для пластины из сплава Tungaloy AH6225 приводят следующие параметры коэффициентов (табл. 2).

Модель износа Z использована по данным производителя и отражает усредненные результаты ресурсных испытаний в рекомендуемых условиях применения пластины. В настоящей работе условия охлаждения соответствуют штатной подаче эмульсии, поэтому модель Z рассматривается как инженерная аппроксимация для задач выбора режимов при типовой технологии финишного точения. Уточнение коэффициентов

модели Z для альтернативных технологий СОТС (МКС, крио и др.) требует отдельной экспериментальной идентификации.

Подставив в формулу (5) значения эмпирических коэффициентов из табл. 2, получим модель износа:

$$Z(S, V, t) = 0,0146S^{0,5}t^{0,3}V^{1,2}e^{0,015StV}. \quad (6)$$

Далее определимся с интерпретацией безразмерного коэффициента износа Z . Установим, что $Z = 1$ является базовым эталоном, т. е. функция $Z(S, V, t) = 1$ на режимах резания ($S = 0,1$ мм/об;

Таблица 2

Table 2

Значения коэффициентов модели Фика – Тейлора для пластины AH6225 при обработке нержавеющей сталей

Values of the Fick-Taylor model coefficients for the AH6225 insert during machining of stainless steels

Параметр / Parameter	Значение (пример) / Value (example)
a	0,5
b	0,3
c	1,2
λ	0,015
K	0,0146

$V = 80$ м/мин; $t = 1,0$ мм) будет соответствовать типовому/допустимому износу (ширине изношенной поверхности $V_B = 0,3$ мм) [27]; $Z = 0,5$ – безопасный режим, износ меньше нормы; $Z = 1,5$ – износ на 50 % выше нормы, потенциально снижение стойкости; $Z > 2$ – инструмент быстро выходит из строя.

Тогда ограничение $Z \leq 1,5$ означает, что режимы резания не должны вызывать износ более чем на 50 % выше допустимого уровня.

Модель можно записать так, чтобы Z был обратно пропорционален стойкости:

$$Z = \frac{t_{\text{рез}}}{R}, \quad (7)$$

где R – фактический ресурс инструмента; $t_{\text{рез}}$ – время одного прохода/обработки.

Тогда $Z \leq 1,5$ означает, что инструмент выдержит не менее $1/1,5 \approx 66$ % от типового ресурса. Это приемлемо для производственных условий.

Для целей оптимизации было принято интерпретировать Z как безразмерную функцию риска износа, нормированную по эталону. В этом случае $Z \leq 1$ – полностью безопасный режим; $Z = 1$ – на пределе допустимого; $Z = 1,5$ – допустимо в краткосрочной обработке, но нежелательно для больших серий; $Z > 2$ – инструмент изнашивается слишком быстро, режим недопустим.

То есть целевое ограничение оптимизации будет выглядеть как условие, когда режущая пластина не должна выйти из строя в процессе однократной чистовой обработки МКС:

$$Z(S, V, t) \leq 1. \quad (8)$$

Металлополимерный материал, применяемый в конструкции, обладает ограниченной термостойкостью: температура его деструкции составляет 170°C [28]. Превышение этой температуры в процессе точения может привести к ухудшению физико-механических свойств материала, его расслоению, деформации или даже разрушению, что сделает МКС непригодной для использования.

На рис. 2 показан участок металлополимерной втулки между первым и вторым датчиком (термопарами) из экспериментальной модели эмулятора МКС, где были намеренно превышены допустимые значения температур ($\approx 310...325^\circ\text{C}$) уже после эксперимента по точению.



Рис. 2. Дефект (разрушение) металлополимера вследствие превышения допустимых для металлополимера температур

Fig. 2. Defect (failure) of the metal-polymer composite due to exceeding the permissible temperature limit for the metal-polymer

Были проанализированы методы оптимизации заданной функции [29], краткое сравнение которых представлено в табл. 3.

С учетом четкой формулы целевой функции, наличия модели температуры (полиномиальной), явных ограничений, а также необходимости точного соблюдения ограничений (особенно температурного) в качестве оптимального метода оптимизации был выбран метод последовательного квадратичного программирования (МПКП) [29]. Данный метод был реализован в Python с использованием библиотеки `scipy.optimize.minimize`, описанной в [29].

Результаты и их обсуждение

Задача оптимизации заключалась в определении таких режимов точения МКС, при которых износ режущей пластины минимален, но при этом не превышаются допустимые технологические ограничения. В частности, на границе между металлической оболочкой и залитым металлополимером температура не должна превышать 170°C , так как это может привести к разрушению структуры материала.

Целевая функция представляет собой функцию износа при токарной обработке МКС,

Таблица 3

Table 3

Сравнение методов оптимизации
Comparison of optimization methods

Метод / Method	Краткое описание / Brief Description	Почему подходит / Why Applicable	Поддержка ограничений / Constraint Handling	Производные / Derivative Requirement
Метод последовательного квадратичного программирования (МПКП) / Sequential quadratic programming (SQP)	Классический метод ограниченной нелинейной оптимизации / Classical constrained nonlinear optimization method	Поддерживает нелинейные ограничения и границы переменных / Supports nonlinear constraints and variable bounds	Да / Yes	Желательно (но можно с автодифференцированием) / Desirable, but possible with auto-differentiation
Нелинейный симплекс / Nelder-mead (Simplex) method	Безградиентный, работает по геометрии симплекса / Gradient-free, operates via simplex geometry	Не требует производных, прост в реализации / Does not require derivatives, simple to implement	Только через штрафную функцию / Only via penalty function	Нет / No
Дифференциальная эволюция / Differential evolution (DE)	Эволюционный глобальный алгоритм / Evolutionary global optimization algorithm	Глобальная оптимизация, не требует градиентов / Global search capability, no gradient required	Через явные границы и штрафы / Through explicit bounds and penalties	Нет / No
Ограниченная оптимизация с помощью линейных приближений / Method of moving asymptotes (MMA)	Алгоритм аппроксимации ограничений / Algorithm for constraint approximation	Быстрый, поддерживает ограничения / Fast, supports constraints via approximations	Да (ограничения через аппроксимации) / Yes (constraints via approximations)	Нет / No
Байесовская оптимизация / Bayesian optimization (BO)	Для дорогих функций / For expensive black-box functions	Избыточен в данной задаче / Overkill for this specific problem	Да (через GP-модель) / Yes (through Gaussian process model)	Нет / No

выраженную через глубину резания, подачу и скорость резания, с учетом геометрических параметров детали. Температурное ограничение задается в виде эмпирической модели, полученной по результатам эксперимента с толщиной стенки 2 мм – модель $2T3(S, V, t)$. Модель учитывает нелинейное влияние подачи, скорости резания и глубины резания на температуру.

Дополнительное ограничение по шероховатости не учитывается, так как шероховатость обеспечивается на всем интервале варьирования переменных задачи, что соответствует рекомендациям производителя режущего инструмента и особенностям обработки деталей после 3D-печати.

Для решения задачи применяется численный метод последовательного квадратичного про-

граммирования (МПКП), так как он позволяет эффективно находить оптимальное решение при наличии нелинейных ограничений.

В частном случае оптимизация проводилась для модели хвостовика сверла с геометрическими характеристиками $L = 55$ мм – длина обработки (длина хвостовика), $D = 25$ мм – диаметр хвостовика.

Система оптимизации имела вид

$$\begin{cases} Z(S, V, t) < 1 \rightarrow \min; \\ 2T3(S, V, t), \text{ } ^\circ\text{C} < 170 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ S \in [0,05; 0,15], \frac{\text{мм}}{\text{об}}; \\ V \in [60; 120], \frac{\text{м}}{\text{мин}}; \\ t \in [0,5; 1,5], \text{мм}. \end{cases} \quad (9)$$

После выполнения оптимизации методом МПКП (рис. 3) были найдены оптимальные параметры режима точения, при которых минимизируется технологическое время обработки, соблюдаются ограничения по температуре и минимизируется износ режущей пластины. Результаты оптимизации представлены в табл. 4.

Эксперимент показал, что характерные уровни температур лежат в диапазоне от ~ 27 до ~ 190 °С, при этом на «экстремальном» сочетании режимов фиксировались пики до ~ 189 °С (опыт № 2), что уже выше технологического предела термостойкости МПКМ для финишной механической обработки. Это подтверждает критичность корректного выбора режимов резания для МКС с такой толщиной металлической оболочки.

На рис. 4–6 показаны изолинии температуры и износа при глубине резания 0,5 мм (рис. 4), 1 мм (рис. 5) и 1,5 мм (рис. 6).

Для сопоставимого анализа результатов на рис. 4–6 использована единая логика визуализации допустимых режимов обработки в координатах (S , V) при фиксированной глубине резания t . На всех графиках нанесены изолинии температуры, рассчитанной по регрессионной модели 2Т3 (сплошные красные линии), и изолинии износа режущей пластины по модели $Z(S, V, t)$ (пунктирные синие линии). Зеленая область соответствует области режимов, удовлетворяющих одновременно принятым ограничениям по температуре металлополимера и риску износа (область допустимых значе-

ний). Белая область отражает превышение допустимого уровня риска износа режущей пластины.

Граница критического термического воздействия на металлополимер принята по температуре 170 °С как предельно допустимая для материала. Дополнительно на рис. 4 показана изолиния 150 °С, соответствующая началу технологически значимого (существенного) нагрева металлополимера. Следует отметить, что при $t = 0,5$ мм (рис. 4) и $t = 1,0$ мм (рис. 5) значения $T > 170$ °С в пределах исследуемого диапазона (S , V) не достигаются, поэтому зона перегрева металлополимера на этих графиках отсутствует. При $t = 1,5$ мм (рис. 6) температура превышает порог 170 °С на части факторного пространства, что визуализировано красной зоной перегрева.

Цветовая дифференциация областей на рис. 4–6 отражает выполнение технологических ограничений, принятых при оптимизации режимов: зеленая область соответствует множеству режимов (S , V), для которых одновременно выполняются условия $T < 170$ °С (отсутствие перегрева металлополимера) и $Z(S, V, t) \leq Z_{\text{доп}}$ (допустимый уровень риска износа режущей пластины). Белая область соответствует режимам, не удовлетворяющим ограничению по износу ($Z > Z_{\text{доп}}$), т. е. характеризуется повышенным риском ускоренного изнашивания пластины, при этом температура в белой области может оставаться ниже 170 °С.

Таблица 4

Table 4

Результаты оптимизации методом МПКП для модели 2Т3
Optimization results using the SQP method for the 2T3 model

Глубина резания t , мм / Depth of cut, t (mm)	Подача S , мм/об / Feed rate, S (mm/rev)	Скорость V , м/мин / Cutting speed, V (m/min)	Износ Z / Wear Z	Температура, °С / Temperature, °C
0,5	0,05	60,0	0,369	153,2
0,6	0,05	60,0	0,392	148,6
0,7	0,05	60,0	0,412	146,0
0,8	0,05	60,0	0,431	145,3
0,9	0,05	60,0	0,448	146,5
1,0	0,05	60,0	0,465	149,6
1,1	0,05	60,0	0,48	154,6
1,2	0,05	60,0	0,495	161,6
1,3	0,05	60,6	0,516	170,0
1,4	0,05	72,0	0,66	170,0
1,5	0,05	87,0	0,864	170,0

```

18 + 0.0841 * V**2
19 - 0.4546 * V * t
20 - 1.376 * V
21 + 14.84 * t**2
22 + 85.44 * t
23 + 182.57
24 )
25
26 # --- Целевая функция для оптимизации ---
27 # Возвращает значение износа, если температура не превышает 170 °C
28 # В противном случае возвращает большое число, чтобы избежать недопустимых р
29 def objective(params, t):
30     S, V = params
31     T = T_model(S, V, t)
32     if T >= 170:
33         return 1000 # штраф за превышение температуры
34     return Z_model(S, V, t)
35
36 # --- Области допустимых значений параметров резания ---
37 bounds = [(0.05, 0.15), # Подача, мм/об
38           (60, 120)] # Скорость, м/мин
39
40 # --- Список глубин резания для анализа ---
41 t_values = np.round(np.arange(0.5, 1.51, 0.1), 2) # от 0.5 до 1.5 мм с шагом
42
43 # --- Выполнение оптимизации для каждого значения t ---
44 results = []
45 for t_val in t_values:
46     # Оптимизация износа при фиксированной глубине t
47     res = minimize(lambda params: objective(params, t_val),
48                   x0=[0.1, 90], # Начальное приближение
49                   bounds=bounds,
50                   method='SLSQP') # Метод оптимизации: последовательное пр
51
52 # Полученные оптимальные параметры
53 S_opt, V_opt = res.x
54 Z_opt = Z_model(S_opt, V_opt, t_val)
55 T_opt = T_model(S_opt, V_opt, t_val)
56
57 # Сохранение результата
58 results.append((t_val, S_opt, V_opt, Z_opt, T_opt))
59
60 # --- Вывод результатов в табличной форме ---
61 print("Глубина t (мм)\tПодача S (мм/об)\tСкорость V (м/мин)\tИзнос Z\tТемпер
62 for r in results:
63     print(f"{r[0]:.1f}\t{r[1]:.3f}\t{r[2]:.1f}\t{r[3]:.2f}\t{r[4]:.1
64

```

Python 3.12.7 | packaged by Anaconda, Inc. | (main, Oct 4 2024, 13:17:27)
[MSC v.1929 64 bit (AMD64)]
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.
IPython 8.27.0 -- An enhanced Interactive Python.

```

In [1]: runfile('C:/Users/NSL/Desktop/ЭКСПЕРИМЕНТ/измерение температуры/
ОПЫТЫ/! Редактируемые данные/обработка результатов мат модель/глубина 3.5/
оптимизация/оптимизация_резания_с_комментариями.py', wdir='C:/Users/NSL/
Desktop/ЭКСПЕРИМЕНТ/измерение температуры/ОПЫТЫ/! Редактируемые данные/
обработка результатов мат модель/глубина 3.5/оптимизация')
Глубина t (мм)  Подача S (мм/об)  Скорость V (м/мин)  Износ Z  Температура
T (°C)
0.5  0.050  60.0  0.37  118.3
0.6  0.050  60.0  0.39  123.7
0.7  0.050  60.0  0.41  129.5
0.8  0.050  60.0  0.43  135.5
0.9  0.050  60.0  0.45  141.8
1.0  0.050  60.0  0.46  148.5
1.1  0.050  60.0  0.48  155.4
1.2  0.050  60.0  0.50  162.6
1.3  0.050  60.1  0.51  170.0

```

Рис. 3. Оптимизация $Z(S, V, t)$ методом МПКП

Fig. 3. Optimization of tool wear $Z(S, V, t)$ by the SQP method

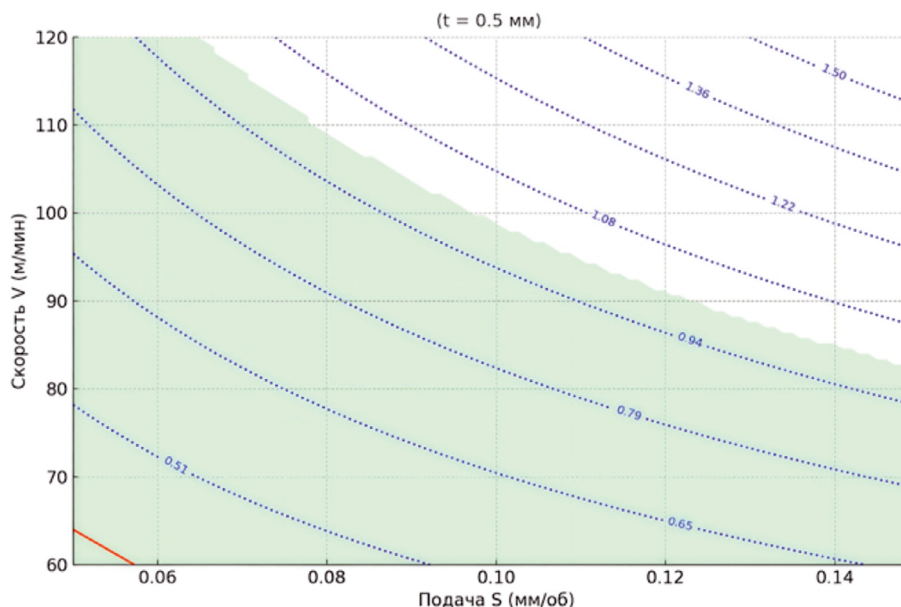


Рис. 4. Контурный график зависимостей $2T3$ и $Z(S, V, t)$ при $t = 0,5$ мм; сплошные красные линии – температура по $2T3$; пунктирные синие линии – износ по модели $Z(S, V, t)$; зеленая область – область допустимых значений; белая область – зона недопустимого риска износа режущей пластины

Fig. 4. Contour plot of the $2T3$ (temperature) and Z (wear) dependencies at $t = 0.5$ mm; solid red lines – temperature ($2T3$ model); dashed blue lines – tool wear (Z model); green area – admissible parameter domain; white area – prohibited zone with high risk of cutting insert failure

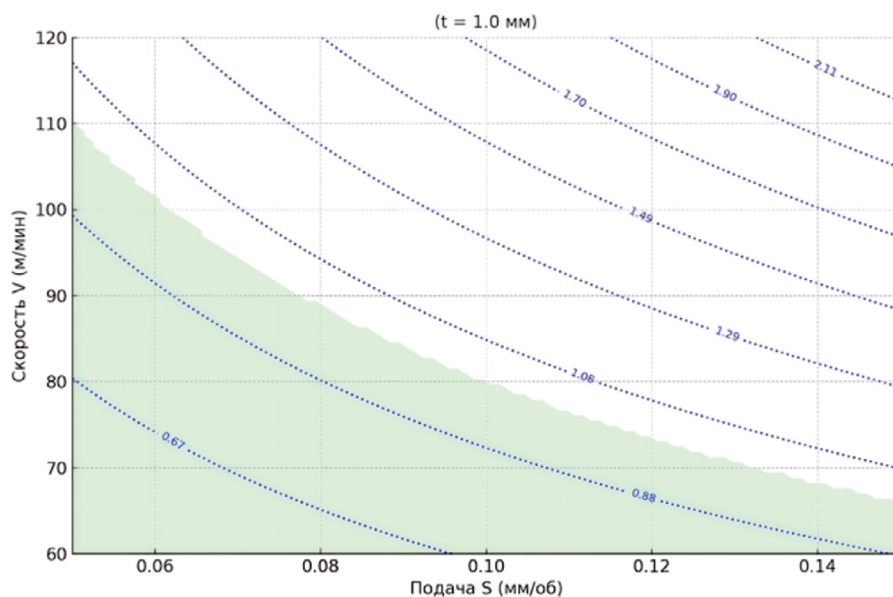


Рис. 5. Контурный график зависимостей $2T3$ и $Z(S, V, t)$ при $t = 1$ мм; сплошные красные линии – температура по $2T3$; пунктирные синие линии – износ по модели $Z(S, V, t)$; зеленая область – область допустимых значений; белая область – зона недопустимого риска износа режущей пластины

Fig. 5. Contour plot of the $2T3$ (temperature) and Z (wear) dependencies at $t = 1.0$ mm; solid red lines – temperature ($2T3$ model); dashed blue lines – tool wear (Z model); green area – admissible parameter domain; white area – prohibited zone with high risk of cutting insert failure

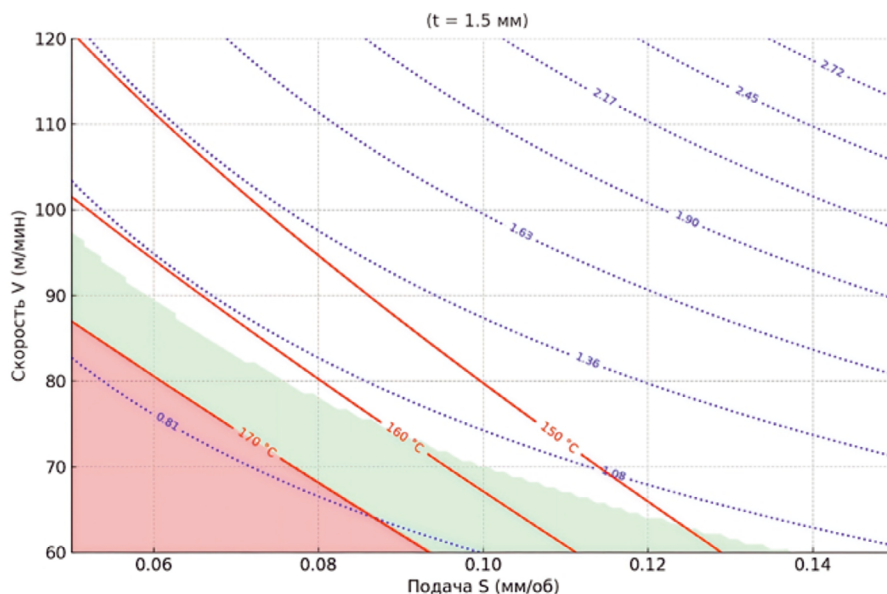


Рис. 6. Контурный график зависимостей $2T3$ и $Z(S, V, t)$ при $t = 1,5$ мм; сплошные красные линии – температура по $2T3$; пунктирные синие линии – износ по модели $Z(S, V, t)$; зеленая область – область допустимых значений; белая область – зона недопустимого риска износа режущей пластины

Fig. 6. Contour plot of the $2T3$ (temperature) and Z (wear) dependencies at $t = 1$ mm; solid red lines – temperature ($2T3$ model); dashed blue lines – tool wear (Z model); green area – admissible parameter domain; white area – prohibited zone with high risk of cutting insert failure

Физическая интерпретация наблюдаемых зависимостей показывает рост температуры на межфазной границе, что обусловлено суммарным тепловыделением в зоне стружкообразования и трения на контактных поверхностях «инструмент – заготовка» с последующим теплопереносом через металлическую оболочку к металлополимеру. В общем случае увеличение скорости резания V , подачи S и глубины резания t ведет к росту температурных уровней, что согласуется с известными закономерностями теории резания и современными экспериментальными исследованиями по точению.

Для рассматриваемой металл-композитной системы анализ коэффициентов модели 2ТЗ показывает, что в выбранных диапазонах параметров наибольшее влияние на рост температуры оказывает глубина резания t , далее следует подача S , а влияние скорости V является наименьшим. Такое распределение влияний физически объясняется тем, что увеличение t напрямую повышает объем снимаемого материала и удельную мощность резания, а также усиливает тепловой поток в систему, тогда как в исследованных пределах по V вклад скорости частично «сглаживается» за счет устойчивого теплоотвода и фиксированных условий контакта.

Контурные карты на рис. 4–6 иллюстрируют эволюцию допустимой области при увеличении глубины резания.

1. $T = 0,5$ мм (рис. 4): температурное ограничение $T < 170$ °С в пределах рассматриваемых S и V не активируется (перегрев отсутствует), поэтому граница допустимости в основном определяется критерием износа инструмента. Практически это означает, что при малой глубине резания температурный риск для металлополимера минимален, а оптимизация сводится к компромиссу по стойкости при обеспечении качества поверхности.

2. $T = 1,0$ мм (рис. 5): сохраняется отсутствие зоны перегрева $T > 170$ °С в выбранном диапазоне S и V , однако общие температурные уровни повышаются по сравнению с $t = 0,5$ мм; область допустимости по-прежнему во многом лимитируется износом, при этом запас по температуре сокращается.

3. $T = 1,5$ мм (рис. 6): температурное ограничение становится определяющим – появляется область перегрева, и граница допустимых режи-

мов начинает формироваться уже двумя механизмами: (1) перегревом металлополимера при $T > 170$ °С и (2) ростом риска износа инструмента. Таким образом, именно при больших t температурный критерий задает «жесткую» отсечку факторного пространства, что подчеркивает доминирующее влияние глубины резания на тепловую нагруженность системы.

Выводы

Применение ранее разработанной регрессионной модели 2ТЗ для 2-миллиметровой SLM-оболочки позволило количественно описать температурный отклик металл-композитной системы на изменение глубины резания, подачи и скорости. Показано, что в исследованном диапазоне режимов характерные уровни температуры на межфазной границе лежат примерно в пределах 27...190 °С, при этом на «экстремальных» сочетаниях режимов температура достигает ~189 °С, что превышает порог термостойкости металлополимера (≈ 170 °С). Это подтверждает необходимость жесткого температурного ограничения при выборе режимов и демонстрирует пригодность модели 2ТЗ для априорного выделения области допустимых режимов по температурному критерию.

На основе эмпирической зависимости Фика – Тейлора и параметров, рекомендованных производителем твердосплавной пластины АН6225 для обработки нержавеющей сталей, получена регрессионная модель износа $Z(S, V, t) = 0,0146S^{0,5}t^{0,3}V^{1,2}e^{0,015StV}$. Введена безразмерная интерпретация коэффициента износа Z , где значение $Z = 1$ соответствует типовому (допустимому) уровню износа, а ограничение $Z \leq 1,5$ означает, что ресурс инструмента составляет не менее ~66 % от базового. Такое задание критерия позволяет напрямую связать режимы резания с эксплуатационной стойкостью инструмента и использовать модель износа в задачах инженерной оптимизации.

На основе связи «температурная модель 2ТЗ + модель износа Фика – Тейлора» сформулирована задача многокритериальной оптимизации режимов финишного точения МКС, сведенная к минимизации функции износа $Z(S, V, t)$ при наличии нелинейного температурного ограничения $2ТЗ(S, V, t) \leq 170$ °С и технологических



ограничений по диапазонам подачи, скорости и глубины резания. Дополнительное ограничение по шероховатости не вводилось, поскольку заданный диапазон режимов обеспечивает требуемое качество поверхности. Такая постановка отражает реальный конфликт между стремлением к снижению износа и необходимостью предотвращения перегрева металлополимерного заполнителя.

Реализация метода последовательного квадратичного программирования (МПКП) в среде Python для построенной модели показала его работоспособность при наличии нелинейных ограничений. В частном случае для хвостовика сверла ($L = 55$ мм, $D = 25$ мм) получен набор рациональных режимов, при которых одновременно соблюдается температурное ограничение и обеспечивается экономичный уровень износа инструмента. Оптимальные решения лежат в области умеренных глубин резания ($t \approx 0,5 \dots 1,0$ мм) при минимальной подаче ($S \approx 0,05$ мм/об) и скорости, близкой к нижней границе диапазона ($V \approx 60$ м/мин), что обеспечивает значения $Z < 1$ и температуру существенно ниже 170°C .

Анализ изолиний температуры и износа показал, что глубина резания является доминирующим фактором роста температуры на межфазной границе, тогда как влияние скорости резания менее выражено. Во всех рассмотренных случаях именно температурное ограничение формирует границы допустимой области режимов и сдерживает увеличение скорости и подачи; при $t \geq 1,0 \dots 1,2$ мм запас по температуре быстро исчерпывается и риск превышения порога термостойкости металлополимера становится недопустимым. На практике это означает, что для финишной обработки МКС с оболочкой толщиной 2 мм рационально использовать глубины резания примерно $0,5 \dots 1,0$ мм при согласованном выборе подачи и скорости. Предложенный подход может быть распространен на другие толщины оболочек и конфигурации МКС после калибровки температурной модели по экспериментальным данным.

Список литературы

1. Huber F., Rasch M., Schmidt M. Laser powder bed fusion (PBF-LB/M) process strategies for in-situ alloy formation with high-melting elements // *Metals*. – 2021. – Vol. 11 (2) – P. 336. – DOI: 10.3390/met11020336.
2. Fan F., Jalui S., Manogharan G. Mass finishing of additively manufactured Ti6Al4V parts: An investigation of surface finish dependency on build orientation and processing conditions // *Manufacturing Letters*. – 2023. – Vol. 35. – P. 439–449. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.08.095.
3. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, M. Kozochkin, Y. Ilyuhin, A. Vorotnikov // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 1023–1026. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
4. Structure and machinability of thin-walled parts made of titanium alloy powder using electron beam melting technology / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, Y. Ilyukhin, M. Kozochkin, P. Peretyagin // *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. – 2016. – Vol. 68. – P. 46–50. – DOI: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.8.
5. Finish machining of Ti6Al4V SLM components under consideration of thin walls and support structure removal / W. Hintze, R. Wenserski, R. Junghans, S. Carsten // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 48. – P. 485–491. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.072.
6. Micro cutting of Ti-6Al-4V parts produced by SLM process / G. Le Coz, M. Fischer, R. Piquard, A. D'Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 58. – P. 228–232. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.326.
7. Kitay O., Kaynak Y. Machining and deformation response of wrought and additively manufactured 316L stainless steel under cryogenic cooling and dry condition // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 137. – P. 1791–1809. – DOI: 10.1007/s00170-025-15152-3.
8. Polishetty A., Nomani J., Littlefair G. Evaluating and comparing secondary machining characteristics of wrought and additive manufactured 316L stainless steel // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.404.
9. Machinability study of polymeric parts fabricated by additive manufacturing under a dry milling process / P. Arnés-Urgellés, J. Bayas, E.R. Salazar, F. Maldonado, C. Helguero, J. Amaya // *Advanced Structured Materials*. – 2021. – Vol. 149. – P. 139–148. – DOI: 10.1007/978-3-030-68277-4_10.
10. Justification of the use of composite metal-metal-polymer parts for functional structures / N.S. Lubimyi, A.A. Polshin, M.D. Gerasimov, A.A. Tikhonov, S.I. Antsiferov, B.S. Chetverikov, V.G. Ryazantsev, J. Brazhnik, I. Ridvanov // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (2). – P. 352. – DOI: 10.3390/polym14020352.
11. Reducing the cost of 3D metal printing using selective laser melting (SLM) technology in the manufacture of a drill body by reinforcing thin-walled shell forms with metal-polymers / N.S. Lubimyi,

- M. Chepchurov, A.A. Polshin, M.D. Gerasimov, B.S. Chetverikov, A. Chetverikova, A.A. Tikhonov, A. Maltsev // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 44. – DOI: 10.3390/jmmp8020044.
12. What is the economic feasibility of manufacturing a metal-metal-polymer composite part compared to other technologies? / N. Lubimyi, V. Voronenko, A. Polshin, M. Gerasimov, S. Antsiferov, O.K. Öztürk, B. Chetverikov, A. Tikhonov, V. Ryazantsev, V. Shumyacher, N. Melentiev // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 22 (2). – P. 314–325. – DOI: 10.1080/14484846.2022.2094533.
13. Modeling of cutting temperature in the biomedical stainless steel turning process / D. Petkovic, M. Madić, M. Radovanović, P. Janković, G. Radenkovic // Thermal Science. – 2016. – Vol. 20. – P. 1345–1354. – DOI: 10.2298/TSCI16S5345P.
14. Modelling and prediction of cutting temperature in the machining of H13 hard steel of multi-layer coated cutting tools / J. Zhang, L. Zhanqiang, C. Xu, D. Jin, S. Guosheng, P. Zhang, X. Meng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 115 (11–12). – P. 3731–3739. – DOI: 10.1007/s00170-021-07417-4.
15. Exploring post-machining alternatives under dry conditions for thin-walled additive manufacturing components aided by infrared thermography / E. Garcia-Llomas, G. Sandoval, M. Fuentes, E. Vidales, J. Pujante // Processes. – 2025. – Vol. 13. – P. 717. – DOI: 10.3390/pr13030717.
16. Rao C.J., Sreeamulu D., Mathew A. Analysis of tool life during turning operation by determining optimal process parameters // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 241–250. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.247.
17. Taylor's model based analysis of turning inserts tool-life in the dry turning of UNS R56400 alloy / M. Batista, P. Davim, J. Salguero, A. Gomez-Parra, M. Marcos // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Proceedings (IMECE). Vol. 1. Montreal, Quebec, Canada, 2014. – DOI: 10.1115/IMECE2014-38710.
18. Salvatore F., Sofiane S., Hamdi H. Modeling and simulation of tool wear during the cutting process // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 8. – P. 305–310. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.107.
19. Lee Y.J., Yoon H.-S. Modeling of cutting tool life with power consumption using Taylor's equation // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37 (6). – P. 3077–3085. – DOI: 10.1007/s12206-023-0531-5.
20. A tool life prediction model based on Taylor's equation for high-speed ultrasonic vibration cutting Ti and Ni alloys / X. Zhang, Z. Peng, L. Liu, X. Zhang // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 1553. – DOI: 10.3390/coatings12101553.
21. Польшин А.А. Разработка технологии изготовления металл-композитных корпусов сборных свёрл в условиях импортозамещения // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 10 (46). – С. 27–35. – DOI: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35.
22. Oxley P.L. The mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability. – Sydney: Halsted Press Publisher, 1989. – 242 p.
23. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process: Part I – Temperature rise distribution due to shear plane heat source // International Journal of Mechanical Sciences. – 2000. – Vol. 42 (9). – P. 1715–1752. – DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00070-3.
24. Калпакджян С., Шмид С. Производственная инженерия и технологии (SI-единицы): пер. с англ. – М.: Логос, 2022. – 1360 с.
25. Tungaloy Corporation. A new generation of PVD grade for stainless steel turning: AH6225. – URL: https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/540-u_AH6225.pdf (accessed: 14.01.2026).
26. Tungaloy Corporation. Latest grade series for stainless steel turning with AH6200. – URL: <https://tungaloy-rus.ru/upload/iblock/ae2/ae25807696423260679c5e78743e3f79.pdf> (accessed: 14.01.2026).
27. Разработка методики диагностирования состояния режущего инструмента в режиме реального времени при сверлении отверстий в хрупких материалах / В.А. Гречишников, А.В. Тарасов, В.К. Ганьшин, О.Г. Живодров // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 4 (7). – С. 45–51.
28. Synergistic integration of digital twins and neural networks for advancing optimization in the construction industry: A comprehensive review / A.I. Borovkov, K.M. Vafaeva, N.I. Vatin, I. Ponyaeva // Construction Materials and Products. – 2024. – Vol. 7 (4). – DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-4-7.
29. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. – 2020. – Vol. 17. – P. 1–12. – DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Optimization of finishing turning parameters for a metal–composite system with a 2-mm-thick metal external layer based on criteria of thermal load and cutting tool wear

Nikolay Lubimyi ^{a, *}, Boris Chetverikov ^b, Mikhail Gerasimov ^c, Andrey Polshin ^d, Ardalion Maltsev ^e,
 Mikhail Bytsenko ^f, Alexander Tikhonov ^g

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>,  nsclubim@bk.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>,  await_rescue@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-9073-5649>,  mail_mihail@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>,  info@polshin.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>,  ardalion_bgtn@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>,  b.michutka2005@gmail.com;

^g  <https://orcid.org/0000-0003-4450-502X>,  cherep2240@rambler.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 November 2025

Revised: 17 December 2025

Accepted: 23 December 2025

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Metal-composite systems

Additive manufacturing

Metal-polymer composites

Cutting temperature

Interface

Modeling

Optimization

Funding

This study was supported by grant No. 23-79-10022 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Acknowledgements

The study was performed using the facilities of the High Technologies Center of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

ABSTRACT

Introduction. The study addresses the challenge of selecting finishing turning parameters for a metal-composite system comprising a thin metal external layer (2 mm thick) produced by selective laser melting and containing an internal metal-polymer filler. The relevance of the work is driven by the need to ensure the machining quality of the outer surface while adhering to strict temperature constraints at the metal-polymer interface, imposed by the low thermal resistance of the filler material. **Purpose of the work** is to develop and implement a multi-criteria optimization approach for the finishing turning parameters of the metal-composite system. This approach is based on previously developed regression models for the interface temperature and cutting tool wear, and aims to minimize tool wear while satisfying temperature constraints and surface quality requirements. **Methodology.** The methodology is based on a previously developed 2T3-type regression model for predicting temperature at the metal-metal-polymer interface and a cutting tool wear model formulated as a generalized *Fick-Taylor* equation for a cemented carbide insert (grade AH6225). Using these models, a mathematical programming problem with a nonlinear temperature constraint is formulated and solved via the sequential quadratic programming (SQP) method within specified ranges of cutting speed, feed rate, and depth of cut. **Results and discussion.** The numerical implementation of the proposed approach yielded the domains of admissible and optimal finishing turning parameters for the metal-composite system, based on criteria of thermal load and tool wear. The depth of cut was identified as the dominant factor influencing the temperature at the metal-metal-polymer interface. It was shown that the temperature constraint defines the boundaries of the admissible parameter domain. Specific combinations of cutting speed, feed rate, and depth of cut were determined that simultaneously satisfy the polymer's temperature limit and ensure an acceptable wear level for the AH6225 carbide inserts.

For citation: Lubimyi N.S., Chetverikov B.S., Gerasimov M.D., Polshin A.A., Maltsev A.K., Bytsenko M.V., Tikhonov A.A. Optimization of finishing turning parameters for a metal–composite system with a 2-mm-thick metal external layer based on criteria of thermal load and cutting tool wear. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 29–45. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-29-45. (In Russian).

* Corresponding author

Chetverikov Boris S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
 46 Kostyukova St.,
 308012, Belgorod, Russian Federation
 Tel.: +7 951 134-32-43, e-mail: await_rescue@mail.ru

References

1. Huber F., Rasch M., Schmidt M. Laser powder bed fusion (PBF-LB/M) process strategies for in-situ alloy formation with high-melting elements. *Metals*, 2021, vol. 11 (2), p. 336. DOI: 10.3390/met11020336.
2. Fan F., Jalui S., Manogharan G. Mass finishing of additively manufactured Ti6Al4V parts: An investigation of surface finish dependency on build orientation and processing conditions. *Manufacturing Letters*, 2023, vol. 35, pp. 439–449. DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.08.095.
3. Isaev A., Grechishnikov V., Pivkin P., Kozochkin M., Ilyuhin Y., Vorotnikov A. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 1023–1026. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
4. Isaev A., Grechishnikov V., Pivkin P., Ilyukhin Y., Kozochkin M., Peretyagin P. Structure and machinability of thin-walled parts made of titanium alloy powder using electron beam melting technology. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2016, vol. 68, pp. 46–50. DOI: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.8.
5. Hintze W., Wenserski R., Junghans R., Carsten S. Finish machining of Ti6Al4V SLM components under consideration of thin walls and support structure removal. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 48, pp. 485–491. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.072.
6. Le Coz G., Fischer M., Piquard R., D'Acunto A., Laheurte P., Dudzinski D. Micro cutting of Ti-6Al-4V parts produced by SLM process. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 228–232. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.326.
7. Kitay O., Kaynak Y. Machining and deformation response of wrought and additively manufactured 316L stainless steel under cryogenic cooling and dry condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 137, pp. 1791–1809. DOI: 10.1007/s00170-025-15152-3.
8. Polishetty A., Nomani J., Littlefair G. Evaluating and comparing secondary machining characteristics of wrought and additive manufactured 316L stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.404.
9. Arnés-Urgellés P., Bayas J., Salazar E.R., Maldonado F., Helguero C., Amaya J. Machinability study of polymeric parts fabricated by additive manufacturing under a dry milling process. *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 149, pp. 139–148. DOI: 10.1007/978-3-030-68277-4_10.
10. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the use of composite metal-metal-polymer parts for functional structures. *Polymers*, 2022, vol. 14 (2), p. 352. DOI: 10.3390/polym14020352.
11. Lubimyi N.S., Chepchurov M., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Chetverikov B.S., Chetverikova A., Tikhonov A.A., Maltsev A. Reducing the cost of 3D metal printing using selective laser melting (SLM) technology in the manufacture of a drill body by reinforcing thin-walled shell forms with metal-polymers. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (2), p. 44. DOI: 10.3390/jmmp8020044.
12. Lubimyi N., Voronenko V., Polshin A., Gerasimov M., Antsiferov S., Öztürk O.K., Chetverikov B., Tikhonov A., Ryazantsev V., Shumyacher V., Melentiev N. What is the economic feasibility of manufacturing a metal-metal-polymer composite part compared to other technologies? *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2022, vol. 22 (2), pp. 314–325. DOI: 10.1080/14484846.2022.2094533.
13. Petkovic D., Madić M., Radovanović M., Janković P., Radenkovic G. Modeling of cutting temperature in the biomedical stainless steel turning process. *Thermal Science*, 2016, vol. 20, pp. 1345–1354. DOI: 10.2298/TSCI16S5345P.
14. Zhang J., Zhanqiang L., Xu C., Jin D., Guosheng S., Zhang P., Meng X. Modelling and prediction of cutting temperature in the machining of H13 hard steel of multi-layer coated cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 115 (11–12), pp. 3731–3739. DOI: 10.1007/s00170-021-07417-4.
15. Garcia-Llamas E., Sandoval G., Fuentes M., Vidales E., Pujante J. Exploring post-machining alternatives under dry conditions for thin-walled additive manufacturing components aided by infrared thermography. *Processes*, 2025, vol. 13, p. 717. DOI: 10.3390/pr13030717.
16. Rao C.J., Sreemulu D., Mathew A. Analysis of tool life during turning operation by determining optimal process parameters. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, p. 241–250. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.247.
17. Batista M., Davim P., Salguero J., Gomez-Parra A., Marcos M. Taylor's model based analysis of turning inserts tool-life in the dry turning of UNS R56400 alloy. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Proceedings (IMECE)*. Vol. 1, Montreal, Quebec, Canada, 2014. DOI: 10.1115/IMECE2014-38710.
18. Salvatore F., Sofiane S., Hamdi H. Modeling and simulation of tool wear during the cutting process. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 8, pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.107.

19. Lee Y.J., Yoon H.-S. Modeling of cutting tool life with power consumption using Taylor's equation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, vol. 37 (6), pp. 3077–3085. DOI: 10.1007/s12206-023-0531-5.
20. Zhang X., Peng Z., Liu L., Zhang X. A tool life prediction model based on Taylor's equation for high-speed ultrasonic vibration cutting Ti and Ni alloys. *Coatings*, 2022, vol. 12, p. 1553. DOI: 10.3390/coatings12101553.
21. Pol'shin A.A. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya metall-kompozitnykh korpusov sbornykh sverl v usloviyakh importozameshcheniya [Development of technology for manufacturing metal-composite bodies of prefabricated drills in the conditions of import substitution]. *Transportnoe mashinostroenie = Transport Engineering*, 2025, no. 10 (46), pp. 27–35. DOI: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35.
22. Oxley P.L. *The mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability*. Sydney, Halsted Press Publ., 1989. 242 p.
23. Komanduri R., Hou Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process: Part I – Temperature rise distribution due to shear plane heat source. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2000, vol. 42 (9), pp. 1715–1752. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00070-3.
24. Kalpakjian S., Schmid S. *Proizvodstvennaya inzheneriya i tekhnologii (SI-edinitsy)* [Manufacturing engineering and technology (SI Units)]. Moscow, Logos Publ., 2022. 1360 p.
25. Tungaloy Corporation. *A new generation of PVD grade for stainless steel turning: AH6225*. Available at: https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/540-u_AH6225.pdf (accessed 14.01.2026).
26. Tungaloy Corporation. *Latest grade series for stainless steel turning with AH6200*. Available at: <https://tungaloy-rus.ru/upload/iblock/ae2/ae25807696423260679c5e78743e3f79.pdf> (accessed 14.01.2026).
27. Grechishnikov V.A., Tarasov A.V., Ganshin V.K., Zhivodrov O.G. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya sostoyaniya rezhushchego instrumenta v rezhime real'nogo vremeni pri sverlenii otverstii v khrupkikh materialakh [Development of methods of diagnosis state of cutting tool real-time in drilling brittle materials]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern Materials, Equipment and Technology*, 2016, no. 4 (7), pp. 45–51.
28. Borovkov A.I., Vafaeva K.M., Vatin N.I., Ponyaeva I. Synergistic integration of digital twins and neural networks for advancing optimization in the construction industry: A comprehensive review. *Construction Materials and Products*, 2024, vol. 7 (4). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-4-7.
29. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 2020, vol. 17, p. 1–12. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).