



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Исследование термоагруженности процесса точения металл-композитной системы в зависимости от скорости, подачи и глубины резания при обработке тонкостенной металлической оболочки толщиной 2 мм

Николай Любимый<sup>a,\*</sup>, Борис Четвериков<sup>b,\*</sup>, Сергей Клюев<sup>c</sup>, Николай Загородний<sup>d</sup>,  
 Андрей Польшин<sup>e</sup>, Ардалион Мальцев<sup>f</sup>, Михаил Быченко<sup>g</sup>

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>, nslubim@bk.ru; <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>, await\_rescue@mail.ru;  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, klyuyev@yandex.ru; <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>, n.zagorodnj@yandex.ru;  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>, info@polshin.ru; <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>, ardalion\_bgtu@mail.ru;  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>, b.michutka2005@gmail.com

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.01

#### История статьи:

Поступила: 06 октября 2025  
 Рецензирование: 14 октября 2025  
 Принята к печати: 07 ноября 2025  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2025

#### Ключевые слова:

Металл-композитные системы  
 Аддитивные технологии  
 Температура резания  
 Металлополимер  
 Точение

#### 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.

**Для цитирования:** Исследование термоагруженности процесса точения металл-композитной системы в зависимости от скорости, подачи и глубины резания при обработке тонкостенной металлической оболочки толщиной 2 мм / Н.С. Любимый, Б.С. Четвериков, С.В. Клюев, Н.А. Загородний, А.А. Польшин, А.К. Мальцев, М.В. Быченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 131–147. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-131-147.

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена исследованию термоагруженности процесса точения металл-композитных систем (МКС), состоящих из тонкостенной аддитивно полученной металлической оболочки и металлополимерного заполнителя. **Цель работы:** исследовать влияние технологических параметров точения на температуру в зоне резания МКС с металлической оболочкой толщиной 2 мм и определить допустимые режимы механической обработки, исключающие термодеструкцию металлополимерного заполнителя. **Метод и методология.** Для экспериментального моделирования МКС разработан программно-аппаратный комплекс, включающий в себя смешную металлическую втулку из стали 12Х18Н10Т, металлополимер «Ферропхром» (ГУ 2257-002-48460567-00), три термопары с аналогово-цифровым преобразователем MAX6675 и модуль беспроводной передачи данных на базе ESP32. Температура на межфазной границе «металл – металлополимер» регистрировалась в реальном времени. Верификация результатов проводилась бесконтактным методом с использованием тепловизора FLUKE Ti400 (погрешность 3...5 °C). Эксперимент выполнен по плану полного факторного эксперимента  $2^3 + n_0$  с варьированием скорости резания  $V$  (м/мин), подачи  $S$  (мм/об) и глубины резания  $t$  (мм), включая центральные точки для оценки кривизны поверхности отклика. **Результаты и обсуждение.** На основе полученных экспериментальных данных для оболочки толщиной 2 мм построена регрессионная модель второго порядка (« $2T3$ »), демонстрирующая высокую адекватность. Анализ коэффициентов модели показал, что наибольшее влияние на рост температуры оказывает глубина резания  $t$ , за ней следует подача  $S$ , тогда как скорость резания  $V$  в исследованных диапазонах оказывает наименьшее воздействие. С использованием модели построены поверхности отклика и контурные карты, позволяющие визуализировать «безопасные» области режимов обработки, удовлетворяющие ограничению  $T \leq 170$  °C – порогу термостойкости металлополимера. Полученные зависимости обеспечивают основу для нормирования финишных режимов точения изделий инструментального назначения с аддитивно сформированной оболочкой и металлополимерным заполнителем.

### Введение

Создание изделий с интенсивным теплообменом, таких как пресс-формы (ПФ) для литья термопластов и корпусной режущий инструмент, в последние годы всё чаще опирается на металл-композитные системы (МКС) [1], объединяющие металлическую тонкостенную оболочку и заполнитель из металлополимерного

\*Адрес для переписки

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

композиционного материала (МПКМ). Такой подход позволяет совместить высокую прочность и жёсткость металлического каркаса с демпфирующими и технологическими преимуществами МПКМ, одновременно снижая массу и стоимость изготовления.

Ключевым драйвером развития МКС выступают возможности аддитивного производства (АП) [2], в частности селективного лазерного сплавления (SLM), формировать криволинейные (конформные) каналы охлаждения внутри металлических оболочек [3]. Для ПФ это обеспечивает целенаправленный отвод тепла из зон максимальной тепловой нагрузки формообразующей, выравнивание температурного поля, сокращение цикла литья/штамповки и повышение стабильности размеров. Технологическая схема выглядит так: на металлической плите ПФ выполняется «колодец» (карман) под сменную формообразующую; сама формообразующая печатается как тонкостенная металлическая оболочка с интегрированными криволинейными каналами; после сборки зазор между оболочкой и плитой заполняется МПКМ, что фиксирует формообразующую, улучшает контакт и обеспечивает передачу нагрузок при работе формы.

Аналогичная конструктивно-технологическая логика реализуема в режущем инструменте [3], например в композитном сверле: металлическая SLM-оболочка корпуса со спроектированными эквидистантными каналами подводит смазочно-охлаждающее технологическое средство (СOTC) непосредственно к зоне резания, а внутреннее пространство, образованное вследствие топологической оптимизации (ТО) [4], заполняется МПКМ, воспринимающим объёмные нагрузки и повышающим виброустойчивость изделия. Это дает прирост стойкости твердосплавной головки за счёт улучшения отвода тепла.

В последние годы АП становится серьезным технологическим решением при создании сложных тонкостенных оболочек и полых деталей с интегрированными каналами охлаждения. К примеру, в обзоре [5] подчеркивается, что при обработке деталей, полученных АП, особое значение имеет постобработка, включая точение, поскольку исходная структура слоя, остаточные напряжения и теплопроводность материала влияют на съём стружки, точность и термонаруженнность. Для тонкостенной металлической

оболочки с металлополимерным заполнителем это означает, что при точении необходимо учитывать не только режимы резания, но и геометрию оболочки, особенности аддитивной структуры и межфазные тепловые границы.

На рис. 1, *a* показана цифровая модель корпусного сверла с выполненной ТО корпуса, позволившей обеспечить снижение металлоёмкости на 40 %, что является ключевым фактором для обеспечения экономической эффективности применения SLM-технологии АП в реальном секторе экономики [6]. На рис. 1, *б* показан физический образец ТО металл-композитного корпусного сверла с заполнением внутренних полостей МПКМ, образующим МКС.

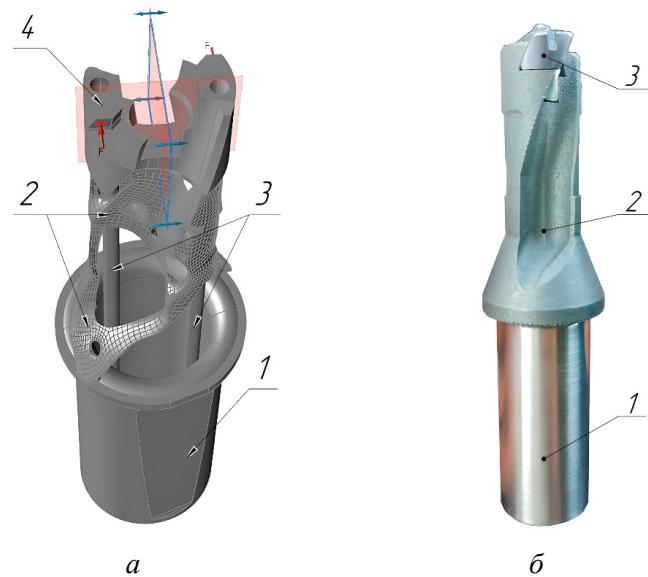


Рис. 1. Цифровая модель корпусного сверла (*а*) с выполненной ТО корпуса (средняя часть стружечных канавок условно не показана); физический образец ТО металл-композитного корпусного сверла (*б*), полученный по технологии SLM:

(*а*) 1 – зона хвостовика (металл); 2 – силовые структурные элементы, образованные ТО (металл); 3 – каналы охлаждения (металл); 4 – посадочная головка под установку сменной твердосплавной режущей головки; (*б*) 1 – токарно-обработанный металл-композитный хвостовик; 2 – стружечные канавки; 3 – режущая головка корпусного сверла

*Fig. 1. Digital model of the drill body (a) with topology optimization applied (the middle part of the chip grooves is conventionally omitted); physical sample of the topology-optimized metal-composite drill body (b) manufactured using SLM technology:*

(*а*) 1 – shank area (metal); 2 – load-bearing structural elements formed by topology optimization (metal); 3 – cooling channels (metal); 4 – mounting seat for a replaceable carbide cutting head; (*б*) 1 – turned metal–composite shank; 2 – chip grooves; 3 – cutting head of the drill body

При этом у МКС появляется критический технологический этап – механическая доводка (в том числе точение) наружных и посадочных поверхностей уже после заполнения полостей МПКМ. В отличие от однородных металлических заготовок, здесь тепловой поток замыкается на межфазную границу «металл – МПКМ», а сам МПКМ имеет более низкую теплопроводность и ограниченную термостойкость. Пере-грев при точении способен вызвать локальную термодеструкцию полимерной матрицы, раз-упрочнение и потерю адгезии на границе, что ведёт к деградации геометрической точности и ресурса изделия. При этом инженерные рекомендации по выбору режимов точения для таких гибридных оболочек с заполнителем пока фрагментарны [7]. Большинство известных данных [8, 9] относится либо к монолитным металлическим деталям, либо к полимерным композициям без металлической оболочки.

Одной из ключевых проблем при механической обработке тонкостенных и металл-компо-зитных систем является повышение температур в зоне резания и возникновение термонагруженности, что приводит к термодеформациям, ухудшению качества поверхности и снижению геометрической точности заготовок. Так, ис-следование [10] показало, что при сухом точе-нии алюминиевых композитов с дисперсными упрочняющими фазами термонагруженность значительно возрастает по сравнению с моно-литным сплавом: высокие скорости и подачи приводят к скачкам температуры в зоне резания. В контексте обработки металлических оболочек с заполнителем, особенно тонкостенных (тол-щина 2 мм и менее), эффект теплового нагру-жения усугубляется из-за сниженной жесткости и ухудшенного отвода тепла через заготовку.

Особенности конструкции тонкостенной оболочки и ее взаимодействие с металлополи-мерным заполнителем являются важным аспек-том при проектировании МКС. В обзоре [11] подчёркивается, что тонкостенные части обла-дают низкой жёсткостью, а также нестабильной тепловой и механической характеристики, это накладывает серьёзные ограничения на режи-мы резания и требования к инструменту и кре-плению. При добавлении металлополимерного наполнителя внутрь оболочки появляется до-полнительный тепловой и фазовый интерфейс

«металл – металлополимер», который требует анализа температурного режима именно на этой границе, чтобы избежать термодеструкции за-полнителя и обеспечить соблюдение требований к качеству поверхности.

Существуют также исследования, сосредото-ченные на влиянии инструмента и технологии обработки на тепловую нагрузку и качество ре-зания. Например, в работе [12] демонстрируется, как изменение материала режущей пластины и её покрытия снижает температуру инструмента и заготовки в процессе точения. Всё чаще отме-чается, что не только режимы (скорость, подача, глубина), но и конструкция инструмента, мате-риал пластины, а также система охлаждения или смазки играют ключевую роль в управлении тер-монагруженностью.

Проблема охлаждения и смазки при механи-ческой обработке в последние годы рассматри-вается как один из ключевых факторов, опре-деляющих температурное состояние системы «инструмент – заготовка». В обзоре [13] отме-чено, что выбор стратегии подачи охлаждающе-смазывающих средств, таких как традиционная подача эмульсии, методы минимального количе-ства СОТС и применение нанофлюидов, суще-ственно влияет на температуру резания, стабиль-ность стружкообразования и износ инструмента. Для обработки тонкостенных конструкций и композитов, где тепловой поток ограничен из-за низкой теплопроводности материала и малой массы заготовки, эффективность охлаждения становится критически важной. Таким образом, корректный выбор состава, давления и расхода СОТС является неотъемлемым условием досто-верности температурных измерений и позволяет сформировать объективную базу для построе-ния регрессионных моделей термонагруженно-сти, описывающих процесс точения МКС.

Стоит также отметить исследования влияния защищных и антифрикционных покрытий ре-жущего инструмента на распределение тепла и температуру резания. Так, в статье [14] показано, что использование PVD-покрытий значительно снижает температуру инструмента и заготовки, улучшает качество поверхности и уменьшает износ при обработке тонких деталей. Это под-тверждает необходимость включения в исследо-вание не только режимов скорости резания, про-дольной подачи и глубины резания, но и свойств

инструмента (материала пластины, покрытия) и условий охлаждения.

Следовательно, для надёжного внедрения МКС в производство необходима количественная оценка термоагруженности процесса точения с учётом реальной геометрии и толщины металлической оболочки, свойств МПКМ и режимов резания (скорости резания  $V$ , продольной подачи  $S$ , глубины резания  $t$ ). Такая оценка должна привести к инженерно применимым моделям и допустимым областям режимов, обеспечивающим требуемое качество поверхности и сохранность структуры МПКМ [15, 16].

**Целью настоящей работы** являлась количественная оценка термоагруженности процесса точения металл-композитных систем, состоящих из тонкостенной аддитивно полученной металлической оболочки и металлополимерного заполнителя; построение модели зависимости температуры на границе «металл – МПКМ» от режимов резания ( $V, S, t$ ); обоснование области безопасных режимов, гарантирующих требуемое качество поверхности и отсутствие термодеструкции МПКМ для прикладных задач. Для достижения данной цели в процессе исследования решались следующие задачи:

- разработка программно-аппаратного устройства, имитирующего металл-композитную систему «металлическая оболочка + металлополимерный заполнитель» и позволяющего производить регистрацию температуры на границе фаз «металл – МПКМ» при наружном точении металлической тонкостенной оболочки толщиной 2 мм;

- проведение экспериментального исследования по точению имитационной модели металл-композитной системы по плану полного факторного эксперимента типа  $2^3 + n_0$ ;

- на основе результатов экспериментальных данных построение регрессионной модели с оценкой значимости коэффициентов и адекватности полученной модели;

- для полученной регрессионной модели построение графических зависимостей температуры на границе фаз и режимов резания в виде графиков поверхностей отклика и контурных карт с целью анализа термоагруженности процесса резания.

## Методика исследований

Для исследования термоагруженности точения применялось разработанное программно-аппаратное устройство, имитирующее металл-композитную систему «металлическая оболочка + металлополимерный заполнитель». Узел состоит из стального корпуса с батарейным блоком, сменной металлической втулки, металлополимерной вставки и трёх измерительных каналов на базе модулей MAX6675 (термопары с преобразователями) с выводом данных в реальном времени по Wi-Fi (ESP32 → ПК). Цифровая модель экспериментального узла представлена на рис. 2.

Конструкция предусматривает быструю замену втулок для варьирования толщины метал-

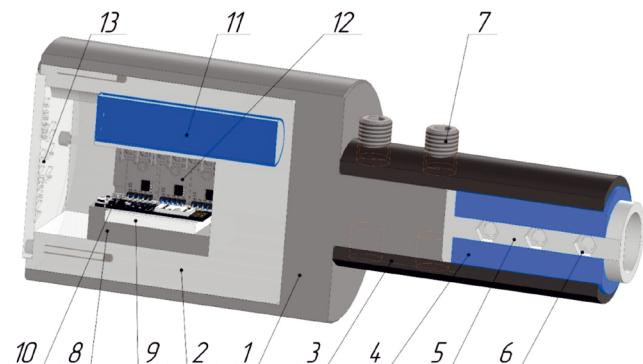


Рис. 2. 3D-модель программно-аппаратного устройства для измерения температуры при точении МКС, имитирующего металлическую оболочку, заполненную МПКМ:

1 – корпус (сталь 40); 2 – пластиковая обойма для крепления электрических компонентов в корпусе; 3 – сменная втулка (12Х18Н10Т); 4 – вставка из МПКМ; 5 – пластиковая обойма для крепления термопар; 6 – отверстия для закладки гаек M8; 7 – крепёжные винты для крепления сменной втулки; 8 – корпус микропроцессора; 9 – макетная плата; 10 – микропроцессор ESP32; 11 – аккумуляторная батарея ёмкостью 2600, мА·ч; 12 – термопары MAX6675; 13 – крышка

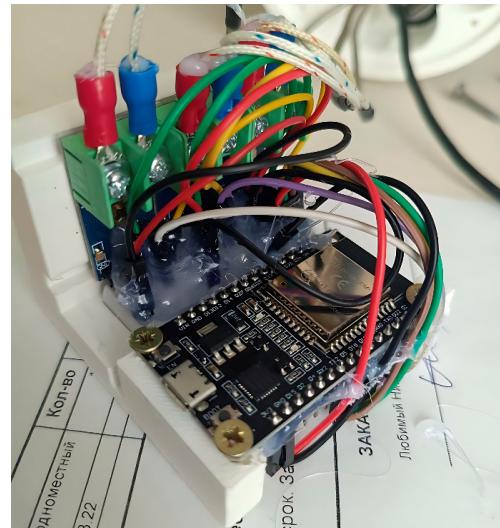
Fig. 2. 3D model of the hardware-software device for measuring temperature during turning of the metal-composite system (MCS), simulating a metal shell filled with MPCM:

1 – housing (0.4C steel); 2 – plastic holder for fastening electrical components inside the housing; 3 – replaceable sleeve (0.12C18Cr-10Ni-Ti); 4 – MPCM insert; 5 – plastic holder for mounting thermocouples; 6 – holes for M8 nuts; 7 – fastening screws for securing the replaceable sleeve; 8 – microprocessor enclosure; 9 – prototyping board; 10 – ESP32 microcontroller; 11 – 2,600 mAh rechargeable battery; 12 – MAX6675 thermocouples; 13 – cover

лической стенки и установку заготовки в патрон токарного станка (16К20). Согласование показаний контактных датчиков проверялось тепловизором FLUKE Ti400; расхождения составляли ~3...5 °C. Для обеспечения теплового контакта

применялась термопаста КПТ-8 в зонах прилегания датчиков.

На рис. 3 показана физическая модель разработанного программно-аппаратного устройства для проведения эксперимента.

*a**б*

*Рис. 3. Физическая модель устройства для замера температурных данных при точении:*  
*а – корпус устройства в сборе; б – сборка микропроцессорной части устройства*

*Fig. 3. Physical model of a device for measuring temperature data during turning Physical model  
of a device for measuring temperature data during turning:  
a – assembled device body; б – assembly of the microprocessor unit*

Металлические сменные втулки (рис. 4) изготавливались из стальной трубы марки 12Х18Н10Т (аналог AISI 304), выбранной как доступный материал-аналог для высоколегированной стали с низкой теплопроводностью [17].



*Рис. 4. Обработанные в ходе эксперимента сменные втулки*

*Fig. 4. Replacement sleeves processed during the experiment*

Теплопроводность 12Х18Н10Т составляет примерно 15...16 Вт/(м·К), что близко к значению для сплава ЭП648 (12...15 Вт/(м·К)), используемого для АП. Таким образом, обеспечивались сходные условия нагрева при резании МКС.

В качестве МПКМ как заполнителя применялся металлополимер «Ферро-хром» (ТУ 2257-002-48460567-00) [18]. Материал обладает пониженной теплопроводностью по сравнению со сталью и ограниченной термостойкостью, что обуславливает необходимость контроля температурного режима при финишной мехобработке. Формование вставки выполнялось заливкой в обойму с последующим точением под внутренний диаметр втулки.

Для проведения эксперимента с целью построения модели температуры на границе фаз МКС для токарной обработки использовались токарные пластины Tungaloy DNMG150408-TF AH6225, предназначенные для финишной обработки. Схема размеров токарной пластины пред-

ставлена на рис. 5, а геометрические характеристики – в табл. 1.

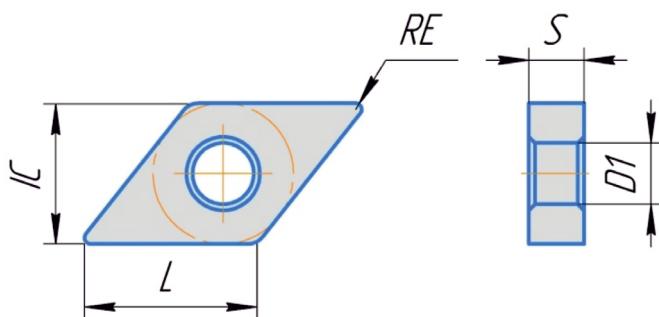


Рис. 5. Схема геометрии режущей пластины Tungaloy DNMG150408-TF AH6225

Fig. 5. Tungaloy DNMG150408-TF AH6225 cutting insert geometry diagram

Инструментальный материал – твердый сплав AH6225 ( $WC-Co-TiC-Al_2O_3$ ) с PVD-покрытием TiAlN+TiN, обеспечивающим повышенную термостойкость и износостойкость при обработке сталей.

Державка – DCLNR 2020K12-M (medium, negative rake angle).

Сводные максимальные значения по каждому опыту приведены в (табл. 1).

Обработка выполнялась на универсальном токарном станке 16К20 с применением системы подачи охлаждающе-смазывающей жидкости (СОС). В качестве рабочей жидкости использовалась водно-масляная эмульсия на минеральной основе типа И-20А с добавлением 5 % эмульгола ЭД-20, обеспечивающая эффективное

охлаждение и снижение сил трения в зоне контакта «инструмент – заготовка». Подача эмульсии осуществлялась непрерывным потоком под давлением  $0,25 \pm 0,05$  МПа непосредственно в зону резания со средним расходом 2...3 л/мин. Выбранный состав и режим подачи охлаждающей жидкости соответствуют рекомендациям по финишной токарной обработке конструкционных сталей.

Схема измерения состояла в расположении трех датчиков вблизи межфазной границы «металл – металлополимер» вдоль оси образца. Частота опроса в 200 мс обеспечивала регистрацию температурного отклика в ходе установившегося резания. Передача данных осуществлялась по UDP на ПК. Визуализация и запись обеспечивалась в специализированном Python-приложении (рис. 6).

Верификация температурной карты поверхности выполнялась тепловизионным методом [19], для анализа использовались максимальные значения температуры резания [20]. На рис. 7 показана верификация показаний измерения тепловизором.

Эксперимент был выполнен по плану полного факторного типа  $2^3 + n_0$ . В качестве варьируемых факторов выступали следующие: скорость резания  $V$  (м/мин), подача на оборот  $S$  (мм/об) и глубина резания  $t$  (мм) [21]. Матрица включала в себя 8 факторных точек (уровни  $-1/+1$  в коде) и  $n_0 = 5$  центральных опытов (0, 0, 0) для оценки дисперсии воспроизводимости и проверки кривизны отклика.

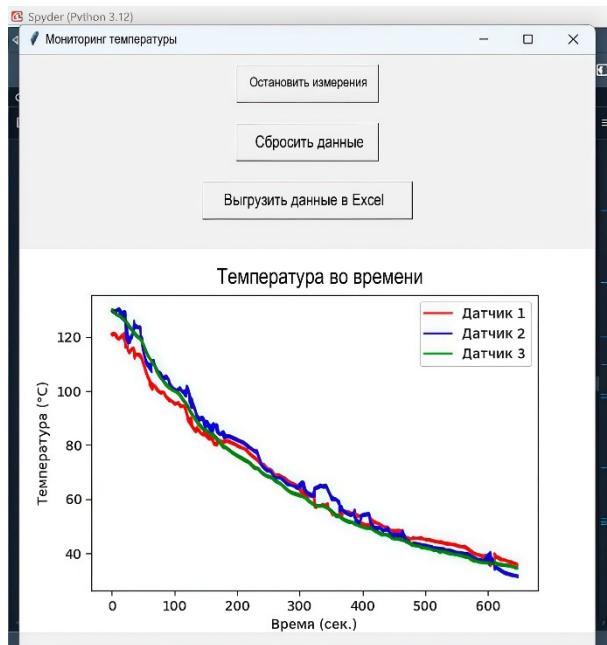
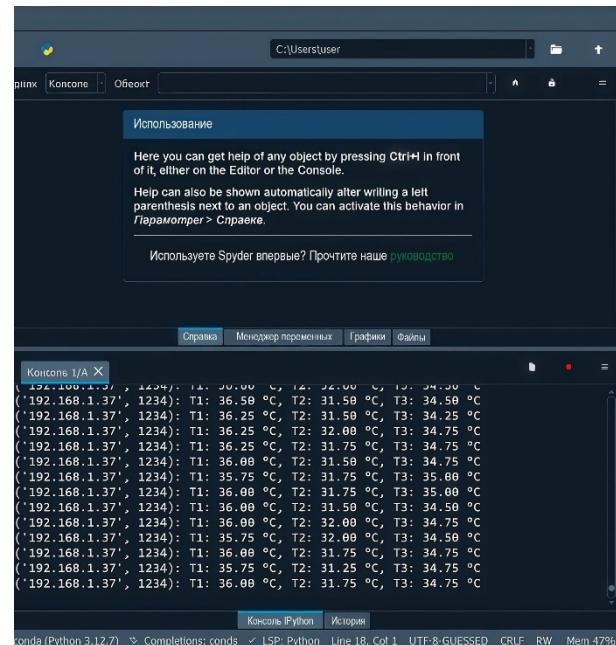
Таблица 1

Table 1

#### Геометрические и режимные параметры режущей пластины Tungaloy DNMG150408-TF AH6225

#### Geometrical and operational parameters of the cutting insert Tungaloy DNMG150408-TF AH6225

Обозначение / Designation	Параметр / Parameter	Значение / Meaning
$RE$	Радиус при вершине / Radius at the apex	0,80 мм / 0.80 mm
$IC$	Вписанный круг / Inscribed circle	12,7 мм / 12.7 mm
$S$	Толщина пластины / Plate thickness	4,76 мм / 4.76 mm
$D1$	Отверстие в центре / Hole in the center	5,16 мм / 5.16 mm
–	Угол формы / Angle of the shape	55° ромбовидная / 55° (rhombic)
–	Тип режущей кромки / Cutting edge type	<i>TF</i> (тонкая, финишная) / <i>TF</i> (thin, finishing)
–	Класс / Class	<i>M</i> (средний негативный угол) / <i>M</i> (medium negative rake angle)

*a**b*

*Рис. 6.* Диалоговое окно программы «Мониторинг температуры», реализованной в Python 3.12 для регистрации температуры резания МКС (*а*). Консоль системного монитора с отображением передаваемых данных о значениях температур в режиме реального времени (*б*)

*Fig. 6.* Dialog box of the Temperature Monitoring program implemented in Python 3.12 for recording the cutting temperature of the MCS (*a*). System monitor console displaying transmitted temperature data in real time (*b*)

*a**b*

*Рис. 7.* Верификация показаний температуры, получаемых с термопар по тепловизору FLUKE Ti400:

*а* – измерение тепловизором; *б* – диаграмма температур

*Fig. 7.* Verification of temperature readings obtained from thermocouples using the FLUKE Ti400 thermal imager:

*а* – thermal imager measurement; *б* – temperature diagram

Выбор диапазона варьирования глубины резания  $t = 0,5 \dots 1,5$  мм обусловлен назначением припуска на сторону. Рекомендуется устанавливать припуск в 0,5 мм. Глубина резания в этом случае составит в один проход также 0,5 мм, если обеспечить малую подачу и хороший

отвод тепла. Можно обработать и в два прохода: 0,3 мм черновой + 0,2 мм чистовой, но это противоречит принципу минимизации технологического времени обработки. Однако с учетом необходимости удаления поддержек и связанных с их наличием дефектов на поверхности детали,

полученной аддитивным методом производства, глубина дефектного слоя, а следовательно, и припуск могут быть увеличены до 2 мм. Таким образом, максимальный диапазон варьирования глубины резания должен быть установлен в 1,5 мм. Большие значения глубины резания не рекомендуются, так как дальнейшее увеличение глубины резания будет приводить к ухудшению шероховатости поверхности.

Диапазоны варьирования скорости резания  $V$  и подачи на оборот  $S$  были выбраны из условия обеспечения требуемой шероховатости поверхности  $Ra \leq 2,5$  мкм. Выбранные диапазоны позволяют считать, что ограничение по шероховатости учитывается имплицитно на всём диапазоне варьирования параметров.

Для каждого параметра были выбраны три уровня варьирования — минимальный, максимальный и центральный (табл. 2).

В табл. 3 представлена рабочая матрица планирования эксперимента ( $\text{ПФЭ } 2^3 + n_0$ ). Матрица планирования эксперимента включает в себя восемь факторных точек с кодированными уровнями ( $-1, +1$ ) и пять центральных опытов  $(0, 0, 0)$ , что обеспечивает возможность оценки кривизны отклика и проверки адекватности регрессионной модели.

По итогам каждого опыта были получены массивы данных о температуре резания во времени, для каждого опыта фиксировалась максимальная температура  $T$  на границе фаз «металл – МПКМ» по трем датчикам.

Базовая регрессия строилась в кодированных переменных  $x_1, x_2, x_3$  [22]. Рассматривалась модель второго порядка с парными взаимодействиями:

$$\begin{aligned} T = b_0 n + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \\ + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 + b_6 x_3^2 + b_7 x_1 x_2 + \\ + b_8 x_1 x_3 + b_9 x_2 x_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Таблица 2  
Table 2

**Уровни варьирования факторов эксперимента**  
**Levels of variation of experimental factors**

Фактор / Factor	Обозначение / Designation	-1	0	+1
Подача $S$ , мм/об / Feed rate, $S$ (mm/rev)	$x_1$	0,05	0,10	0,15
Скорость резания $V$ , м/мин / Cutting speed, $V$ (m/min)	$x_2$	60	90	120
Глубина резания $t$ , мм / Depth of cut, $t$ (mm)	$x_3$	0,5	1,0	1,5

Таблица 3  
Table 3

**Уровни варьирования факторов эксперимента**  
**Levels of variation of experimental factors**

№ опыта / No	$x_1, (S, \text{мм/рев}) / x_1, (S, \text{мм/рев})$	$x_2, (V, \text{м/мин}) / x_2, (V, \text{м/min})$	$x_3, (t, \text{мм}) / x_3, (t, \text{мм})$	Режим (код) / Mode (code)
1	0,5	60	0,05	(-1, -1, -1)
2	0,5	60	0,15	(-1, -1, +1)
3	0,5	120	0,05	(-1, +1, -1)
4	0,5	120	0,15	(-1, +1, +1)
5	0,15	60	0,05	(+1, -1, -1)
6	0,15	60	0,15	(+1, -1, +1)
7	0,15	120	0,05	(+1, +1, -1)
8	0,15	120	0,15	(+1, +1, +1)
9–11	0,10	90	0,10	(0, 0, 0)

Оценка коэффициентов производилась по методу наименьших квадратов. Значимость коэффициентов проверялась по  $t$ -критерию ( $\alpha = 0,05$ ), а адекватность – по  $F$ -критерию с расчетом коэффициента детерминации  $R^2$ . Для инженерной визуализации [23] строились поверхности отклика  $T(V, S)$  при фиксированном значении  $t$ .

## Результаты и их обсуждение

По результатам проведения серии опытов для толщины металлической части МКС в  $\delta = 2$  мм с одновременной регистрацией температуры тремя датчиками ( $T_1, T_2, T_3$ ) были сформированы 39 наблюдений (по три экстремума температуры на опыт). На рис. 8 показан график температур для опыта № 2.

Сводные максимальные значения по каждому опыту приведены в табл. 4.

Эксперимент показал, что характерные уровни температур лежат от  $\sim 27$  до  $\sim 190$  °C, при этом на «экстремальном» сочетании режимов фиксировались пики до  $\sim 189$  °C (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.

При построении модели по экспериментальным данным с закладкой термопар на глубине 2 мм использовались данные, полученные только термопарой № 3. Такая модель была обозначена

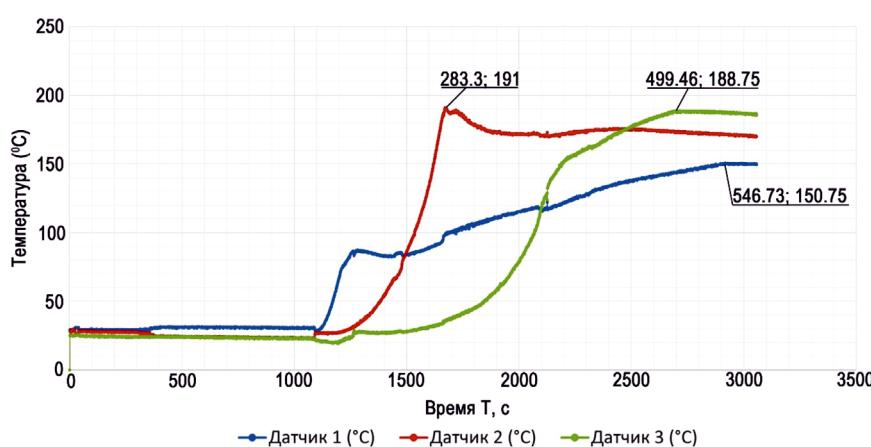
как «2Т3», где 2 – толщина металлической части, а Т3 – термопара, по которой были получены данные. Это связано с тем, что термопары № 1 и № 2 в отдельных экспериментах показывали очевидно неадекватные значения. Например, в опыте № 8 с первой термопарой на компьютер приходили значения температур с максимальным значением 27,3 градуса, что явно не соответствовало действительности. Термопара № 2 также показывала неадекватные значения на опытах 1, 4, 6 и 8.

В табл. 5 приведены значения рассчитанных коэффициентов полинома, обученных на реальных физических значениях. Использовался метод наименьших квадратов, который оценивает коэффициенты через более точные статистические процедуры и учитывает вероятностные эффекты (например, корреляции признаков и точность вычислений).

Для модели «2Т3»  $R^2 = 0,98534$ ,  $F = 22,4$ ,  $p = 0,01336 < 0,05$ . Расчетная модель «2Т3» выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} 2T3 = & 292,497 - 509,117S - 1,433V - \\ & - 134,602t - 98,166S^2 + 0,005V^2 + 96,488t^2 + \\ & + 2,104SV - 106,205St - 0,202Vt. \end{aligned} \quad (2)$$

Интерпретация оценённых коэффициентов в кодированных переменных показывает согласованный физический смысл основных эффектов; линейные члены при подаче, скорости и глубине резания отрицательные (т. е. увели-



*Rис. 8. График изменения температуры при точении, опыт № 2  
( $\delta = 2$  мм)*

*Fig. 8. Graph of temperature change during turning, experiment No. 2  
( $\delta = 2$  mm)*

Таблица 4

Table 4

**Максимальные значения температур для термопар с толщиной металлической части МКС 2 мм****Maximum temperature values from thermocouples for the 2 mm MCS metal shell**

№ опыта / No	Термопара 1 / Thermocouple 1, °C	Термопара 2 / Thermocouple 2, °C	Термопара 3 / Thermocouple 3, °C	Средняя / Average, °C
1	96,8 / 96.8	75	155,75 / 155.75	109,2 / 109.2
2	150,8 / 150.8	191	188,75 / 188.75	176,8 / 176.8
3	112,0 / 112.0	113	111,75 / 111.75	112,3 / 112.3
4	153,3 / 153.3	106,25 / 106.25	148,5 / 148.5	136,0 / 136.0
5	108,5 / 108.5	106,5 / 106.5	102,25 / 102.25	105,8 / 105.8
6	100,5 / 100.5	77,5 / 77.5	140,5 / 140.5	106,2 / 106.2
7	96,5 / 96.5	90,25 / 90.25	86,75 / 86.75	91,2 / 91.2
8	27,3 / 27.3	70	97	64,8 / 64.8
9	105,8 / 105.8	112	103	106,9 / 106.9
10	108,5 / 108.5	109,25 / 109.25	104	107,3 / 107.3
11	80,0 / 80.0	68,75 / 68.75	96,25 / 96.25	81,7 / 81.7
12	84,8 / 84.8	73,58 / 73.58	101,1 / 101.1	86,5 / 86.5
13	83,9 / 83.9	72,63 / 72.63	100,1 / 100.1	85,5 / 85.5

Таблица 5

Table 5

**Оценка значимости коэффициентов математической модели 2T3****Evaluation of the significance of the coefficients of the 2T3 mathematical model**

Обоз- название / Symbol	Коэффициент / Coefficient	Стандартная ошибка $SE_i$ / Stan- dard error $SE_i$	t-статистика / t-statistic	p-значение / p-value	Интерпретация / Interpretation
$b_0$	292,49651	29,17582	10,02530	0,00017	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_1$	-509,11672	144,98610	-3,51149	0,01707	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_2$	-1,43312	0,44609	-3,21259	0,02366	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_3$	-134,60192	16,56281	-8,12676	0,00046	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_4$	-98,16642	28,83137	-3,40485	0,01915	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_5$	0,00460	0,00233	1,97237	0,10560	Коэффициент незначим
$b_6$	96,48846	6,11772	15,77196	0,00002	Коэффициент статистически значим ( $p < 0,05$ )
$b_7$	2,10417	1,34301	1,56676	0,17795	Коэффициент имеет низкую значимость
$b_8$	-106,25000	80,58035	-1,31856	0,24448	Коэффициент незначим
$b_9$	-0,20208	0,13430	-1,50471	0,19273	Коэффициент незначим

чение  $S$ ,  $V$  и  $t$  в исследованных пределах снижает  $T$ ). Нелинейность выражена квадратичными членами: один из квадратичных коэффициентов значим отрицательно, два других – положительно. Еще один квадратичный член ( $V^2$ ) находится на границе значимости. Парные взаимодействия имеют пограничную значимость, что указывает на умеренную, но заметную связь факторов – в первую очередь комбинации скорости и глубины, а также подачи и скорости. В совокупности это означает, что для  $\delta = 2$  мм температура наиболее чувствительна к изменению глубины резания, затем к подаче, и в меньшей степени к скорости, что согласуется с наблюдаемой картиной нагрева в экспериментах.

Построенная модель «2Т3» дана в реальных физических единицах для инженерного применения. Проверка модели по полной матрице наблюдений показывает хорошую сходимость [24]. Максимальные отклонения расчётных температур не превышают 5°C от экспериментальных значений, что соответствует установленным допустимым значениям. В целом уровень несоответствий признан приемлемым для задач прогнозирования достижения порога 170 °C и построения температурных карт [25, 26].

Визуализация поверхности отклика  $T(V, S)$  при фиксированных  $t$  демонстрирует монотонное понижение  $T$  при росте  $V$  и  $S$  и смещение

изотерм в сторону более жестких ограничений при увеличении  $t$  (рис. 9).

На контурной карте для глубины резания  $t = 1,5$  мм (рис. 10), как режима наиболее термоагруженного, можно выделить «безопасную зону» режимов и области потенциального превышения 170 °C.

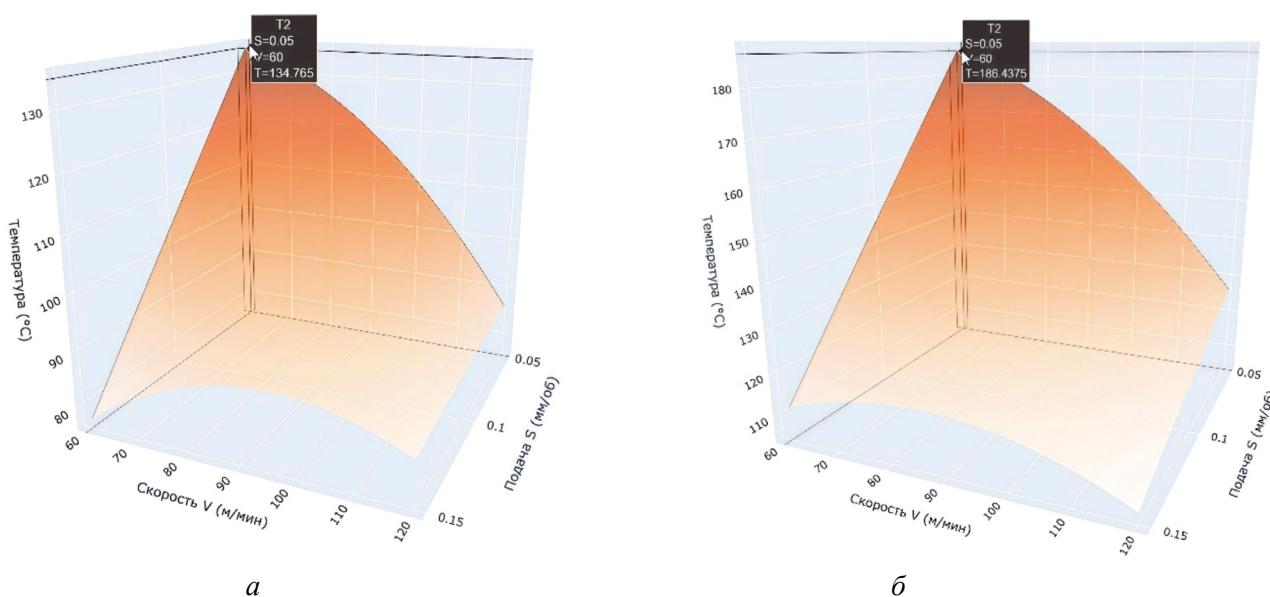
Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение области применимости полученных результатов.

1. Параметрическое изучение влияния толщины оболочки  $\delta$  на тепловой отклик при течении.

2. Валидация моделей на альтернативных марках металлополимеров с различной теплопроводностью и предельной температурой, а также на других конструкционных сталях.

3. Сопряженный анализ «температура – шероховатость – износ» с регистрацией сил резания и вибраакустики для построения интегральных карт допустимых режимов.

4. Хотя эксперимент проводился с подачей смазочно-охлаждающих технологических средств СОТС в зону резания, целесообразно исследовать роли смазочно-охлаждающих технологий (минимально-количественная смазка, криоохлаждение) и их влияние на снижение экстремальных температур.



*Rис. 9. Графики поверхностей температур для модели «2Т3»:*

*а – глубина резания 1 мм; б – глубина резания 1,5 мм*

*Fig. 9. Temperature surface graphs for model 2T3:*

*a – cutting depth of 1 mm; б – cutting depth of 1.5 mm*

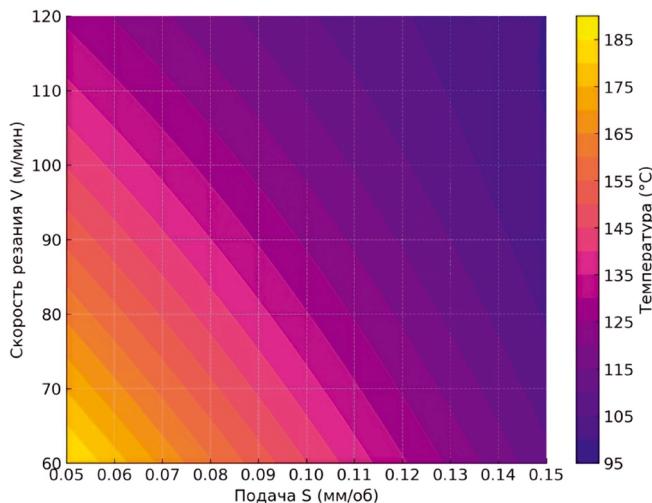


Рис. 10. Контурный график температур для модели «2T3» с глубиной резания 1,5 мм

Fig. 10. Temperature contour graph for model 2T3, with a cutting depth of 1.5 mm

5. Идентификация и мониторинг теплопередачи на межфазной границе, включая эффект деградации адгезии при циклических термомеханических нагрузках.

6. Развитие численных термомеханических 3D-моделей и «цифровых двойников» с калибровкой по экспериментальным данным для быстрого прогнозирования режимов в производственных условиях.

Реализация этих направлений позволит трансформировать предложенный подход в нормативно применимую методику назначения режимов механической обработки МКС в изделиях инструментального назначения.

## Выводы

Разработано и экспериментально опробовано программно-аппаратное устройство, корректно имитирующее металл-композитную систему с тонкостенной металлической оболочкой и металлополимерным заполнителем, что позволило регистрировать температурный отклик на межфазной границе «металл – МПКМ» в процессе точения.

Реализованный план полного факторного эксперимента  $2^3 + n_0$  обеспечил получение статистически достоверных данных и выявление основных эффектов и взаимодействий факторов режима резания ( $V, S, t$ ), а также учет не-

линейных зависимостей за счёт центральных точек.

Построенная регрессионная модель второго порядка для варианта с толщиной оболочки  $\delta = 2$  мм (модель «2T3») адекватно описывает температурный отклик на межфазной границе и согласуется с результатами тепловизионной верификации.

Установлено, что глубина резания  $t$  оказывает наибольшее влияние на повышение температуры, подача  $S$  – умеренное, а скорость резания  $V$  – наименьшее в исследованных диапазонах.

На основе модели построены поверхности отклика и контурные карты, позволившие выделить области безопасных режимов обработки, которые удовлетворяют условию  $T \leq 170$  °C – порогу термостойкости металлополимера.

Установлено, что достижение технологического ограничения  $T \leq 170$  °C возможно при рациональном сочетании параметров  $V, S$  и  $t$ , что подтверждает возможность финишной токарной обработки металл-композитных систем без повреждения металлополимерного заполнителя.

Полученные результаты формируют научно обоснованную базу для нормирования режимов механической обработки изделий инструментального назначения, в том числе формообразующих пресс-форм с конформными каналами охлаждения и композитных корпусов свёрл, снижая риск брака и повышая воспроизводимость качества.

## Список литературы

1. 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.
2. Zhang K., Cheng G. Three-dimensional high resolution topology optimization considering additive manufacturing constraints // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 35. – P. 101224. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101224.
3. 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.

4. Adaptive variable design algorithm for improving topology optimization in additive manufacturing guided design / A.V. Morillas, J.M. Alonso, A.B. Caballero, C.C. Sisamón, A. Ceruti // Inventions. – 2024. – Vol. 9 (70). – P. 9040070. – DOI: 10.3390/inventions9040070.

5. Sambo A.M., Younas M., Njuguna J. Insights into machining techniques for additively manufactured Ti6Al4V alloy: A comprehensive review // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14 (22). – P. 10340. – DOI: 10.3390/app142210340.

6. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges / J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, W. Zhang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – Vol. 65. – P. 91–110. – DOI: 10.1016/j.cja.2020.09.020.

7. 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.

8. Малышев В.Ф., Дьяченко С.В. Резание труднообрабатываемых сталей. – М.: Машиностроение, 2010. – 248 с.

9. Трент Э.М., Райт П.К. Резание металлов. – М.: Машиностроение, 2001. – 385 с.

10. Effect of the cutting condition and the reinforcement phase on the thermal load of the workpiece when dry turning aluminum metal matrix composites / J.C. Aurich, M. Zimmermann, S. Schindler, P. Steinmann // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 82. – P. 1317–1334. – DOI: 10.1007/s00170-015-7444-0.

11. 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. – 2023. – Vol. 17 (4). – P. 55. – DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.

12. Park J.-K., Lee C.-M., Kim D.-H. Investigation on the thermal effects of WC-Co turning inserts deposited by additive manufacturing of titanium alloy powder // Metals. – 2021. – Vol. 11 (11). – P. 1705. – DOI: 10.3390/met11111705.

13. Sultana M.N., Dhar N.R., Zaman P.B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal cutting // American Journal of Mechanics and Applications. – 2019. – Vol. 7. – P. 71–87. – DOI: 10.11648/j.ajma.20190704.11.

14. Machining technology and PVD coatings for milling thin structural parts of Inconel 718 / M. Schiffler,

T. Maul, F. Welzel, H. Frank, T. Cselle, A. Lümkemann // SSRN Electronic Journal. – 2020. – Vol. 7. – P. 55–63. – DOI: 10.2139/ssrn.3724144.

15. Taufik M., Jain P.K. A study of build edge profile for prediction of surface roughness in fused deposition modeling // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138 (6). – P. 061002. – DOI: 10.1115/1.4032193.

16. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process / D. Wang, Y. Yang, Z. Yi, X. Su // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 65. – P. 1471–1484. – DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4.

17. Хоанг В.Ч. Практические вопросы исследования температуры резания при точении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 7-1. – С. 78–84.

18. ЗАО «Металлополимерные материалы ЛЕО». Технические условия ТУ 2257-002-48460567-00. Металлополимер «Ферро-хром». – М., 2009. – URL: <http://www.leopolimer.ru/> (дата обращения: 10.11.2025).

19. Целиков П.В., Кисель А.Г. Исследование изнашивания режущего инструмента при точении сплава TH1 // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 2 (66). – С. 43–49. – DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-43-49.

20. Бордачев Е.В., Лапшин В.П. Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – № 2. – С. 130–137. – DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-2-130-137.

21. Jones T., Cao Y. Tool wear prediction based on multisensor data fusion and machine learning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 137. – P. 5213–5225. – DOI: 10.1007/s00170-025-15472-4.

22. Digital twin-driven tool wear monitoring and predicting method for the turning process / K. Zhuang, Z. Shi, Y. Sun, Z. Gao, L. Wang // Symmetry. – 2021. – Vol. 13. – P. 1438. – DOI: 10.3390/sym13081438.

23. Topology optimization methods for additive manufacturing: a review / I.E. Khadiri, M. Zemzami, N. Hmina, M. Lagache, S. Belhouideg // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. – 2023. – Vol. 14. – P. 12. – DOI: 10.1051/smdo/2023015.

24. Analysis of the effect of porosity on thermal conductivity with consideration of the internal structure of arbolite / N. Zhangabay, D. Chepela, T. Tursunkululy, A. Zhang-abay, A. Kolesnikov // Construction Materials and Products. – 2024. – Vol. 7 (3). – P. 1–12. – DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-4.

25. 3D-printed metals: Process parameters effects on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel / F.R. Andreacola, I. Capasso, A. Langella, G. Brando // Heliyon. – 2023. – Vol. 9 (7). – P. 17698. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17698.

26. Mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resins with silicon carbide / M.S. Lisyatnikov, D.A. Chibrikin, E.S. Prusov, S.I. Roshchina // Construction Materials and Products. – 2024. – Vol. 7 (5). – DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-3.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Investigation of the thermal loading during turning of a metal-composite system as a function of cutting speed, feed rate, and depth when machining a thin-walled 2 mm metal shell

Nikolay Lubimyi<sup>a</sup>, Boris Chetverikov<sup>b,\*</sup>, Sergey Klyuyev<sup>c</sup>, Nikolay Zagorodnyi<sup>d</sup>,  
 Andrey Polshin<sup>e</sup>, Ardalion Mal'tsev<sup>f</sup>, Mikhail Bytsenko<sup>g</sup>

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6131-3217>, nslubim@bk.ru; <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>, await\_rescue@mail.ru;  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, klyuyev@yandex.ru; <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>, n.zagorodnj@yandex.ru;  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>, info@polshin.ru; <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>, ardalion\_bgtu@mail.ru;  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>, b.michutka2005@gmail.com

### ARTICLE INFO

Article history:  
 Received: 06 October 2025  
 Revised: 14 October 2025  
 Accepted: 07 November 2025  
 Available online: 15 December 2025

### Keywords:

Metal-composite systems  
 Additive manufacturing  
 Cutting temperature  
 Metal-polymer  
 Turning

### 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 equipment from the High Technologies Center of BSTU named after V.G. Shukhov.

**For citation:** Lyubimyi N.S., Chetverikov B.S., Klyuev S.V., Zagorodnyi N.A., Polshin A.A., Maltsev A.K., Bytsenko M.V. Investigation of the thermal loading during turning of a metal-composite system as a function of cutting speed, feed rate, and depth when machining a thin-walled 2 mm metal shell. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 131–147. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-131-147. (In Russian).

### ABSTRACT

**Introduction.** This paper is devoted to the study of the thermal loading of the turning process for metal-composite systems (MCS) consisting of a thin-walled, additively manufactured metal shell and a metal-polymer filler. The purpose of this study is to investigate the influence of technological turning parameters on the temperature in the cutting zone of metal-composite systems (MCS) with a 2 mm thick metal shell and to determine the permissible machining conditions that prevent thermal degradation of the metal-polymer filler. **Methodology.** For experimental modeling of the MCS, a hardware-software complex was developed, including a replaceable metal sleeve made of 0.12C18Cr-10Ni-Ti steel, ferrochrome metal-polymer (TU 2257-002-48460567-00), three thermocouples with MAX6675 analog-to-digital converters, and a wireless data transmission module based on an ESP32. The temperature at the metal-metal-polymer interface was recorded in real time. The results were verified using a non-contact method with a FLUKE Ti400 thermal imager (error of 3–5 °C). The experiment was conducted according to a full factorial design  $2^3 + n_0$  with variation of cutting speed  $V$  (m/min), feed rate  $S$  (mm/rev), and depth of cut  $t$  (mm), including central points for assessing the curvature of the response surface. **Results and discussion.** Based on the experimental data obtained for the 2 mm shell, a second-order regression model (2T3) was constructed, demonstrating high adequacy. Analysis of the model coefficients showed that the depth of cut  $t$  has the greatest influence on the temperature increase, followed by the feed rate  $S$ , while the cutting speed  $V$  has the least effect within the studied range. Using the model, response surfaces and contour maps were constructed, allowing visualization of safe machining regions that satisfy the constraint  $T \leq 170$  °C — the heat resistance limit of the metal-polymer. The obtained dependencies provide a basis for standardizing finishing turning parameters for tooling components with additively formed shells and metal-polymer fillers.

### References

- 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.

### \* 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

2. Zhang K., Cheng G. Three-dimensional high resolution topology optimization considering additive manufacturing constraints. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, p. 101224. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101224.
3. 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.
4. Morillas A.V., Alonso J.M., Caballero A.B., Sisamón C.C., Ceruti A. Adaptive variable design algorithm for improving topology optimization in additive manufacturing guided design. *Inventions*, 2024, vol. 9 (70), p. 9040070. DOI: 10.3390/inventions9040070.
5. Sambo A.M., Younas M., Njuguna J. Insights into machining techniques for additively manufactured Ti6Al4V alloy: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (22), p. 10340. DOI: 10.3390/app142210340.
6. Zhu J., Zhou H., Wang C., Zhou L., Yuan S., Zhang W. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 65, pp. 91–110. DOI: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
7. 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.
8. Malyshev V.F., D'yachenko S.V. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh stalei* [Cutting of hard-to-machine steels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 248 p.
9. Trent E.M., Wright P.K. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 385 p. (In Russian).
10. Aurich J.C., Zimmermann M., Schindler S., Steinmann P. Effect of the cutting condition and the reinforcement phase on the thermal load of the workpiece when dry turning aluminum metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 82, pp. 1317–1334. DOI: 10.1007/s00170-015-7444-0.
11. 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*, 2023, vol. 17 (4), p. 55. DOI: 10.1007/s11465-022-0711-5.
12. Park J.-K., Lee C.-M., Kim D.-H. Investigation on the thermal effects of WC-Co turning inserts deposited by additive manufacturing of titanium alloy powder. *Metals*, 2021, vol. 11 (11), p. 1705. DOI: 10.3390/met11111705.
13. Sultana M.N., Dhar N.R., Zaman P.B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal cutting. *American Journal of Mechanics and Applications*, 2019, vol. 7, pp. 71–87. DOI: 10.11648/j.ajma.20190704.11.
14. Schiffner M., Maul T., Welzel F., Frank H., Cselle T., Lümkemann A. Machining technology and PVD coatings for milling thin structural parts of Inconel 718. *SSRN Electronic Journal*, 2020, vol. 7, pp. 55–63. DOI: 10.2139/ssrn.3724144.
15. Taufik M., Jain P.K. A study of build edge profile for prediction of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, vol. 138 (6), p. 061002. DOI: 10.1115/1.4032193.
16. Wang D., Yang Y., Yi Z., Su X. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, pp. 1471–1484. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4.
17. Hoang V.Ch. Prakticheskie voprosy issledovaniya temperatury rezaniya pri tochenii [Practical research cutting of temperature in turning]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2015, no. 7-1, pp. 78–84.
18. CJSC Metal-Polymer Materials LEO. *Tekhnicheskie usloviya TU 2257-002-48460567-00. Metallopolymer «Ferro-khrom»* [Technical conditions TU 2257-002-48460567-00. Metal-Polymer “Ferro-Chrom”]. Moscow, 2009. Available at: <http://www.leopolimer.ru> (accessed 10.11.2025).
19. Tselikov P.V., Kisiel A.G. Issledovanie iznashivaniya rezhushchego instrumenta pri tochenii splava TN1 [Investigation of the dependence of the wear intensity of the cutting tool during turning of TN1 alloy]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2025, no. 2 (66), pp. 43–49. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-43-49.
20. Bordachev E.V., Lapshin V.P. Matematicheskoe modelirovanie temperatury v zone kontakta instrumenta i izdelya pri tokarnoi obrabotke metallov [Mathematical temperature simulation in tool-to-work contact zone during metal turning]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 130–137. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-2-130-137.

21. Jones T., Cao Y. Tool wear prediction based on multisensor data fusion and machine learning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 137, pp. 5213–5225. DOI: 10.1007/s00170-025-15472-4.
22. Zhuang K., Shi Z., Sun Y., Gao Z., Wang L. Digital twin-driven tool wear monitoring and predicting method for the turning process. *Symmetry*, 2021, vol. 13, p. 1438. DOI: 10.3390/sym13081438.
23. Khadiri I.E., Zemzami M., Hmina N., Lagache M., Belhouideg S. Topology optimization methods for additive manufacturing: a review. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2023, vol. 14, p. 12. DOI: 10.1051/smdo/2023015.
24. Zhangabay N., Chepela D., Tursunkululy T., Zhangabay A., Kolesnikov A. Analysis of the effect of porosity on thermal conductivity with consideration of the internal structure of arbolite. *Construction Materials and Products*, 2024, vol. 7 (3), pp. 1–12. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-4.
25. Andreacola F.R., Capasso I., Langella A., Brando G. 3D-printed metals: Process parameters effects on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel. *Heliyon*, 2023, vol. 9 (7), p. 17698. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17698.
26. Lisyatnikov M.S., Chibrikin D.A., Prusov E.S., Roshchina S.I. Mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resins with silicon carbide. *Construction Materials and Products*, 2024, vol. 7 (5). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-3.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 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/>).