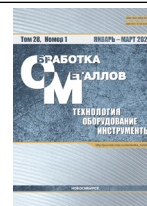




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка окупаемости металл-композитной технологии корпусов сборных сверл на основе экспериментально подтвержденного повышения стойкости режущей головки

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

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/0000-0001-5809-4458>, info@polshin.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>, await_rescue@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>, n.zagorodnij@yandex.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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.01

История статьи:

Поступила: 26 января 2026
Рецензирование: 02 февраля 2026
Принята к печати: 14 февраля 2026
Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Металл-композитные системы
Аддитивные технологии
Стойкость
Металлополимер
Сверление

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. Металл-композитная технология (МКТ) изготовления корпусов сборных сверл на основе аддитивно сформированной тонкостенной металлической оболочки с внутренними каналами подачи СОТС и последующего заполнения металлополимером позволяет повысить функциональность охлаждения, однако требует технико-экономического обоснования применимости в производстве. **Цель работы:** оценить окупаемость МКТ-корпусов сборных сверл на основе экспериментально подтвержденного повышения стойкости сменной твердосплавной режущей головки. **Метод и методология.** Сравнивались два маршрута изготовления корпуса: базовый субтрактивный и МКТ (SLM-оболочка + вибровакuumное заполнение + финишная мехобработка). Окупаемость оценивалась интегральной моделью, объединяющей себестоимость изготовления корпуса как сумму переменных затрат и разовых затрат на партию, а также эксплуатационную экономику через снижение потребности в сменных режущих головках при заданной программе сверления. Экспериментальные входные данные по стойкости получены при промышленных испытаниях сверления; критерий предельного состояния инструмента – износ по задней поверхности $VB = 0,3$ мм. **Результаты и обсуждение.** Показано, что топологическая оптимизация конструкции МКТ-корпуса снижает объем SLM-печати металлической части и соответствующие затраты на аддитивное формообразование. В промышленных испытаниях получен прирост стойкости режущей головки до 618 отверстий против 541 отверстия для базового исполнения, что соответствует увеличению стойкости на 14,2 %. На примере производственной программы 235 000 отверстий показано уменьшение потребности в режущих головках и положительный экономический эффект, формируемый преимущественно за счет эксплуатационной составляющей. **Выводы.** Предложенная методика позволяет определять границы экономически эффективного применения МКТ-корпусов в зависимости от серийности изготовления, объема сверления и стоимости сменной режущей головки.

Для цитирования: Оценка окупаемости металл-композитной технологии корпусов сборных сверл на основе экспериментально подтвержденного повышения стойкости режущей головки / Н.С. Любимый, А.А. Польшин, Б.С. Четвериков, Н.А. Загородний, А.К. Мальцев, М.В. Быценко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 233–252. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-233-252.

Введение

Сверление остается одной из ключевых операций в машиностроении и энергетическом оборудовании, поскольку именно отверстия задают конструкторские базы, обеспечивают проточные и крепежные функции, а также формируют значительную долю времени механической обработки

*Адрес для переписки

Любимый Николай Сергеевич, к.т.н., доцент
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46,
308012, г. Белгород, Россия
Тел.: +7 951 136-40-17, e-mail: nsclubim@bk.ru

в серийных производственных программах. На практике рост производительности сверления ограничивается не только мощностными возможностями оборудования, но и ресурсом инструмента, стабильностью качества отверстий и предсказуемостью эксплуатационных затрат. В этих условиях особую роль играют модульные (сборные) сверла со сменной режущей головкой (РГ) (рис. 1), где дорогой твердосплавный узел (РГ) может заменяться отдельно от корпуса. Такая конструкция снижает стоимость восстановления работоспособности инструмента, однако переносит «точку экономической чувствительности» на совокупность следующих факторов: стойкость РГ, надежность отвода тепла из зоны резания, стабильность подачи СОТС и ресурс/себестоимость корпуса как несущего элемента.

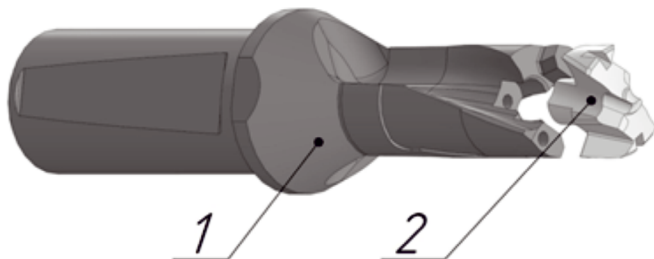


Рис. 1. Модель корпусного сверла:

1 – корпус сверла (сталь 40Х); 2 – твердосплавная режущая головка

Fig. 1. Model of a modular drill:

1 – drill body (0.40C-Cr steel); 2 – carbide cutting head

Традиционно технологические режимы резания выбирались на основе эмпирических или аналитических моделей стойкости (включая классическую зависимость Тейлора), но в современном производстве этого недостаточно: оптимизация «по периоду стойкости» должна быть связана с оптимизацией «по стоимости изделия», где учитываются затраты на станочное время, замены инструмента, простои, контроль, а также риски брака и отклонений от параметров качества. В работах по оценке режущих инструментов подчеркивается, что корректная экономическая интерпретация периода стойкости требует перехода от частной метрики «минут стойкости» к метрикам «стоимости на единицу результата» (например, стоимость на деталь/операцию/отверстие) и к моделям, учитывающим производственную систему в целом [1]. На этой логике

строятся подходы, где инструмент рассматривается как элемент производственной цепочки, а не как «расходник» в отрыве от затрат оборудования и времени, и где сравнение вариантов инструмента проводится через соотношение «затраты – эффект» при заданных критериях качества.

Для операции сверления данная постановка особенно важна: отверстие является дискретным результатом, и экономический эффект устойчиво выражается через «цену отверстия», зависящую от числа отверстий до предельного состояния режущей части и стоимости ее замены. В этом смысле даже умеренный прирост стойкости сменной РГ при больших программах сверления может давать значимый эффект, потому что снижает число замен, время на переналадку и риск выхода за допуски на заключительной стадии износа.

Основным физическим фактором, ускоряющим изнашивание при сверлении, остается тепло, выделяемое в зоне резания и в контактах «стружка – инструмент – заготовка». При использовании модульных сверл критична не только геометрия и материал головки, но и способность корпуса обеспечить эффективную подачу СОТС и теплоотвод. Современные обзоры по аддитивному производству режущего инструмента [2, 3] фиксируют, что одним из наиболее перспективных направлений является интегрированное охлаждение и оптимизированная подача СОТС, поскольку именно это оказывает прямое влияние на температуру, износ и, как следствие, на стойкость [4]. При этом подчеркивается, что потенциал аддитивного подхода проявляется не в «замене технологии изготовления корпуса», а в изменении функциональности корпуса инструмента – через каналы охлаждения (КО) сложной формы (рис. 2), улучшение гидродинамики, интеграцию сопел, снижение локальных потерь давления и точную ориентацию потоков к зоне резания.

Публикации, где рассматривается оптимизация внутренних каналов в аддитивно изготовленных инструментальных корпусах, показывают, что совершенствование геометрии каналов (в том числе устранение резких переходов и оптимизация пространственной траектории) способно заметно увеличить расход и скорости потока, а также улучшить охлаждающий эффект. Напри-

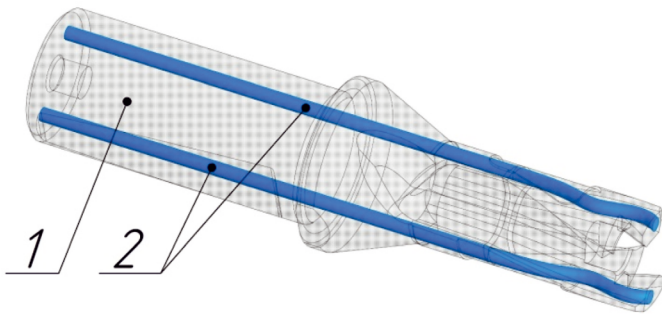


Рис. 2. Проектирование пространственно искривленных КО:

1 – корпус сверла (сталь 40X); 2 – поверхности КО сложной формы

Fig. 2. Design of spatially curved coolant channels (CC):

1 – drill body (0.40C-Cr steel); 2 – complex-shaped CC surfaces

мер, в работе по CFD-оптимизации внутренних каналов охлаждения для аддитивно изготовленного фрезерного инструмента показано увеличение объемного расхода на уровне десятков процентов, что прямо связывается с потенциальным ростом стойкости за счет улучшенного охлаждения [5]. В исследованиях внутренних структур охлаждающих каналов также демонстрируется связь геометрии каналов с силами резания и стойкостью при обработке стали, где «качество охлаждения» становится параметром, сопоставимым по значимости с режимами резания и материалом инструмента [6].

Эти результаты формируют важную предпосылку: прирост стойкости режущей головки может быть достигнут через конструктивные изменения корпуса, если эти изменения обеспечивают более эффективную подачу СОТС и стабилизацию теплового режима.

Если рассматривать корпус модульного сверла как функциональную деталь с внутренними КО, то классические субтрактивные маршруты ограничены: криволинейные каналы, переменное/профилированное сечение, эквидистантность стенок и интегрированные сопла либо недоступны, либо требуют дорогих и технологически рискованных операций [7]. Именно поэтому аддитивные процессы (в особенности лазерное порошковое сплавление – LPBF/SLM) стали рассматриваться как инструментальная технология, позволяющая создавать внутренние каналы сложной геометрии. Однако рост функциональности почти всегда сопровождается ростом себесто-

имости аддитивного изготовления – из-за высокой доли машинного времени, стоимости оборудования, порошка, постобработки и контроля.

В отечественной литературе вопросы экономической целесообразности внедрения аддитивных технологий также рассматриваются в контексте оценки окупаемости инноваций в металлообработке. Так, в работе [8] подчеркивается, что экономический эффект от цифровизации и аддитивного производства должен подтверждаться расчетами на основе классических инвестиционных метрик (ROI, NPV, IRR) и сопоставлением с традиционными маршрутами, поскольку высокие первоначальные вложения и организационные изменения делают «инновационность» недостаточным аргументом без финансовой верификации результата.

Отдельное направление отечественных исследований связано с построением методических подходов к оценке экономической эффективности аддитивного производства, учитывающих специфику структуры затрат. В статье [9] предложена модельная рамка, в которой экономическая эффективность АП трактуется не только как прямое снижение себестоимости, но и как результат влияния факторов масштаба, сложности изделия и повторного использования разработок. Показано, что значимая часть неопределенности связана со скрытыми и косвенными затратами на подготовку, технологическую поддержку и организацию процесса. Такой подход усиливает тезис о необходимости прозрачной декомпозиции затрат и корректного выбора показателей сравнения при принятии решения о целесообразности аддитивного маршрута.

Наконец, применительно к SLM/LPBF для металлических деталей в отечественной практике представлены примеры технико-экономического обоснования на уровне конкретного изделия и производственной цепочки. В работе [10] на примере титанового кронштейна для космической техники показано, что корректное сравнение традиционного и аддитивного вариантов требует пооперационного учета составляющих технологической себестоимости, включая затраты на материалы, трудоемкость, оснастку и режущий инструмент, а также учета влияния партии на себестоимость и длительность производственного цикла. Этот результат методически близок к задаче экономической оценки режуще-

го инструмента: помимо стоимости изготовления объекта применения технологии, необходимо учитывать влияние выбранного маршрута на состав и стоимость вспомогательных средств производства и на параметры производственного цикла.

Проблема дороговизны аддитивного инструмента является не умозрительной, а системной: исследования по стоимости аддитивного производства подчеркивают, что основным драйвером затрат часто выступает машинное время и загрузка оборудования, а значимую долю также составляют постпроцессы (термообработка, удаление поддержек, механическая обработка баз и посадок) [11–13]. В работах по моделированию и оценке стоимости SLM/LPBF-технологии предлагаются подходы, позволяющие разложить стоимость по стадиям (предварительная обработка, сборка, постобработка) и корректно распределять затраты даже для «смешанных» построений на платформе [14]. В обзорах моделей стоимости аддитивного производства показано, что существующие модели различаются точностью и трудоемкостью внедрения, но сходятся в главном: экономическая эффективность аддитивного маршрута редко доказывается одной лишь «возможностью напечатать деталь»; ее необходимо доказывать либо серийностью/загрузкой, либо эффектом на этапе эксплуатации [12].

Именно здесь возникает принципиальный критический выбор при производстве режущего инструмента: если аддитивный корпус дороже классического, то окупаемость должна обеспечиваться эксплуатационным эффектом – например, ростом стойкости режущей части, ростом производительности, снижением брака, снижением простоев и (или) расширением технологических возможностей (обработка материалов или использование режимов, недоступных ранее). Современные обзоры по аддитивным режущим инструментам прямо фиксируют необходимость целостной экономической оценки по жизненному циклу: дополнительные затраты на изготовление могут компенсироваться в фазе применения за счет улучшенной функциональности и производительности, но такие оценки остаются сложными и методически неоднозначными [4].

Если корпус инструмента изготавливать цельнометаллическим аддитивным способом, то

стоимость быстро растет с увеличением объема печати. Поэтому рациональным направлением становится поиск гибридных/композитных решений, где аддитивная часть выполняет роль тонкостенной оболочки-носителя функциональных поверхностей и КО, а внутренний объем заполняется материалом, обеспечивающим несущую способность при меньшей цене и меньшем «аддитивном объеме». В рамках металл-композитной технологии (МКТ) [2] данная логика реализуется через конструкцию «металлическая оболочка + металлополимерный наполнитель», где металлическая часть обеспечивает геометрию наружных поверхностей, посадок и внутренних каналов, а наполнитель – поддержку тонкостенных зон, демпфирование и восприятие сопутствующих нагрузок (в том числе в хвостовике при зажиме).

Несмотря на активное развитие аддитивного инструмента и внутреннего охлаждения, в прикладной плоскости остается методический разрыв. Исследования часто доказывают улучшение охлаждения/стойкости как технологический эффект (температура, износ, качество поверхности), но экономическое обоснование дается либо очень обобщенно, либо через абстрактные модели стоимости, недостаточно привязанные к конкретной производственной программе и конкретной номенклатуре сменных РГ.

Между тем для модульных сверл со сменной головкой экономический эффект наиболее прозрачен и верифицируем: стоимость сменной головки и количество замен на программу напрямую конвертируются в деньги и время. Поэтому корректная оценка окупаемости МКТ должна опираться не только на снижение/рост себестоимости корпуса, но и на экспериментально подтвержденный прирост стойкости режущей головки, поскольку именно этот параметр определяет переменную компоненту затрат «на отверстие» при фиксированной производственной программе.

Суммируя, можно выделить несколько устойчивых положений, подтвержденных современной литературой:

– во-первых, аддитивное производство режущего инструмента дает новые конструкторские возможности (внутренние каналы, интеграция функций, оптимизация массы и жесткости), и одним из главных направлений является улучшение охлаждения и подачи СОТС [4];



– во-вторых, геометрия внутренних каналов действительно способна влиять на параметры потока и потенциал стойкости, что подтверждается как численными, так и экспериментальными ориентированными исследованиями [5, 6];

– в-третьих, стоимость аддитивного изготовления и постобработки является критическим ограничителем внедрения, поэтому применимость аддитивных решений должна подтверждаться технико-экономически, часто с учетом «фазы применения» [12–14].

– в-четвертых, экономическая оценка режущего инструмента корректнее всего выполняется через показатели «стоимость – результат» и через учет производственной системы (станочное время, простои, замены), а не только через сравнение стойкости [1].

Ранее авторским коллективом были последовательно рассмотрены ключевые аспекты создания и обоснования металл-металлополимерных конструкций. В работе [2] показана технологическая возможность снижения затрат на изготовление корпуса сверла за счет SLM-формирования тонкостенной металлической оболочки с последующим армированием/заполнением металлополимером, т. е. фокус сделан на конструктивно-технологическом принципе «тонкая оболочка + металлополимер» и его потенциале экономии материала и машинного времени. В исследовании [7] предложена и апробирована экономическая схема сравнения металл-металлополимерного изделия с альтернативными технологиями изготовления, где эффективность трактуется как результат соотношения затрат на производство и получаемых эксплуатационных преимуществ. В работе [8] детализированы технологические решения по изготовлению металлокомпозитных корпусов модульных сверл в условиях импортозамещения, включая вопросы организации процесса и технологичности изготовления.

Настоящая работа позиционируется как следующий шаг, устраняющий разрыв между конструктивно-технологической реализуемостью металлокомпозитного корпуса и корректной количественной оценкой его эффективности с учетом инструментально-эксплуатационных факторов: в отличие от [2, 7, 8], где акцент был сделан на выборе принципа изготовления и на общем технико-экономическом сравнении тех-

нологий, в данной статье в единой постановке выстроена связка «технология изготовления корпуса, эксплуатационные характеристики режущего узла, экономический эффект»; введен и обоснован показатель эффективности, позволяющий принимать решение о целесообразности МКТ-варианта с учетом стоимости и ресурса режущей части, а не только производственных затрат корпуса; выполнена экспериментальная верификация выводов по критерию износа режущих элементов с демонстрацией влияния исполнения в МКТ на итоговую эффективность. Проведен также анализ чувствительности итогового эффекта к ключевым входным параметрам (затраты АП (SLM), стоимость режущей части, цены), что повышает воспроизводимость выводов и задает границы применимости предложенного подхода.

Целью настоящей работы является оценка окупаемости металл-композитной технологии корпусов сборных сверл на основе экспериментально подтвержденного повышения стойкости режущей головки с построением расчетной схемы, позволяющей определить границы экономически эффективного применения МКТ при заданных исходных данных производства. Для достижения поставленной цели в процессе исследования требовалось решить следующие **задачи**:

– выполнить обзор подходов к экономической оценке режущего инструмента и показать применимость метрики «стоимость отверстия» / «удельные затраты на результат» для модульных сверл со сменной РГ;

– обосновать роль внутреннего охлаждения и геометрии каналов как фактора стойкости и источника эксплуатационного эффекта, учитываемого в экономике, опираясь на результаты исследований по аддитивным инструментам и оптимизации каналов;

– проанализировать структуру затрат аддитивного изготовления (SLM/LPBF) и показать, почему для корпусов инструмента ключевыми являются машинное время, загрузка оборудования и постобработка;

– сформировать расчетную модель окупаемости МКТ, учитывающую разницу себестоимости корпусов по базовому и МКТ-маршрутам и эксплуатационную компоненту через стойкость сменной РГ;

– на основе экспериментальных данных стойкости и параметров производственной программы выполнить оценку экономического эффекта и определить область эффективного применения технологии.

Методика исследований

Объектом исследования является корпус сборного сверла (КС) диаметром примерно 20 мм (исполнение 1,5D) как несущий элемент инструмента со сменной твердосплавной РГ и внутренней системой подачи СОТС. Сравнение выполнялось для двух технологических альтернатив изготовления корпуса, описанных в [11].

Альтернатива А – это базовый технологический маршрут (субтрактивный маршрут), который представлен как последовательность механических операций, характерных для инструментальных корпусных деталей: отрезка заготовки из прутка, комплексное точение, глубокое пушечное сверление осевого канала Ø6 мм с внутренней подачей СОТС, 5-осевое фрезерование винтовых стружечных канавок, сверление радиальных каналов СОТС, последующая термообработка (закалка и отпуск до HRC 32–38), финишное точение/шлифование и заключительный контроль. Для партии 100 шт. и более суммарное основное машинное время механической обработки без термообработки оценено на уровне примерно 33,6 мин/шт [11]; существенную роль играют переналадка (20...45 мин на первую деталь комплексной операции) и пакетная термообработка (≈ 5 ч).

Альтернатива В – это маршрут по МКТ. В МКТ корпус формируется как тонкостенная SLM-оболочка (сплав ЭП648) с интегрированными криволинейными эквидистантными КО для СОТС, после чего внутренние полости заполняются металлополимерным композиционным материалом (МПКМ) с применением вибровакuumного режима. Завершающими стадиями являются удаление поддержек, очистка каналов и финишное точение рабочих поверхностей, затем контроль. В качестве параметров вибровакuumного процесса приняты остаточное давление 400 Па и низкочастотная вибрация 40...60 Гц (амплитуда 0,2...0,6 мм, длительность 3...7 мин), обеспечивающие дегазацию и снижение пористости наполнителя.

Для изготовления исходных металлических заготовок применяли порошок никелевого жаропрочного сплава ХН55В5МБТЮ (ЭП648) для SLM. Согласно спецификации гранулометрический диапазон порошка составлял 20...63 мкм, форма частиц – сферическая, насыпная плотность 4,19 г/см³, текучесть – 20 с; химический состав (масс. %) включает Ni (основа), Cr 32.2, Mo 2.3, W 5.2, Ti 0.91, Al 0.70, Nb 0.80, а также примеси C 0.047, Si 0.20, Mn 0.04, S 0.007, P 0.003, O 0.019, Fe 0.5. Печать выполняли на установке SLM 280HL в среде аргона при толщине слоя 30 мкм. Подробные параметры режима (мощность лазера, скорость сканирования и стратегия) приведены в работе [2].

К МПКМ относится обширный ряд различных холоднотвердеющих реактопластов. МПКМ – это компаунд, на 20 % состоящий из модифицированной полимерной матрицы, которая на 80 % заполнена различными мелкодисперсными наполнителями (сталь, керамика). Наполнитель (металл или керамика) придает уникальные свойства отвержденному материалу, а полимерная матрица обеспечивает равномерное распределение частиц в компаунде. Исходя из опыта применения МПКМ для нужд армирования пустотелых тонкостенных оболочковых форм, выращенных методом SLM 3D-печати металлом, наиболее рационально использовать металлополимер ЛЕО Ферро-Хром, характеристики которого представлены в табл. 1.

Сравнение альтернатив организовано так, чтобы «развести» два источника экономического результата: разницу в себестоимости изготовления корпуса (как функции переменных и разовых затрат по маршруту), и эксплуатационную экономику, проявляющуюся через изменение периода стойкости режущей головки при одинаковой номенклатуре головки и одинаковых режимах сверления.

Методика экономической оценки изготовления КС

Экономическая оценка изготовления корпуса выполнена в логике «переменные затраты на единицу + разовые затраты на партию», что позволяет корректно сравнивать маршруты при различных размерах партии, включая пилотные внедрения.

Физико-механические и технологические характеристики металлополимера LEO Ферро-Хром

Physical, mechanical and technological characteristics of the metal-polymer LEO Ferro-Chromium

Характеристика / Characteristic	Значение параметра / Parameter value
Удельная масса композиции, г/см ³ / Specific gravity of the composition, g/cm ³	2,5
Жизнеспособность приготовленной композиции, мин (при 18...20 °С) / Viability of the prepared composition, min (at 18...20 °С)	45
Температуростойкость, °С (по Вика) (по ГОСТ 15088) / Vicat softening temperature, °С (according to GOST 15088)	300
Рабочая температура, °С / Operating temperature, °С	от -120 до + 170
Время отверждения, час (при 20 °С) / Curing time, hour (at 20 °С): – до возможности механообработки / up to the possibility of machining – полная прочность / full strength	3,5...4 24
Твердость по Бринеллю, МПа (по ГОСТ 4670) / Brinell hardness, MPa (according to GOST 4670)	310
Предел прочности, МПа / Ultimate strength, MPa: – при сжатии (по ГОСТ 4651) / in compression (according to GOST 4651) – при изгибе (по ГОСТ 4648) / in bending (according to GOST 4648) – при нормальном отрыве от стали (по ОСТ 921476–78) / in normal separation from steel (according to OST 921476–78)	230 76 45

Для каждой альтернативы введены следующие обозначения: $C_{\text{пер}}^{\text{МКТ}}$ – переменные затраты по МКТ (печать SLM, порошок, снятие напряжений, удаление поддержек или очистка каналов, вакуум-заливка МПКМ, финишная мехобработка, контроль, накладные расходы); $C_{\text{пер}}^{\text{Баз}}$ – переменные затраты на один корпус по базовому маршруту (материал прутка, токарные/фрезерные переходы, глубокое сверление, 5-осевые канавки, шлифование, термообработка, контроль); $C_{\text{раз}}^{\text{МКТ}}$, $C_{\text{раз}}^{\text{Баз}}$ – разовые затраты на партию (подготовка, наладки, оснастка/УП, разработка поддержек и др.) соответственно для МКТ и базового маршрутов; $K_{\text{парт}}$ – размер партии корпусов.

Тогда средняя себестоимость корпуса в партии задается следующими выражениями, где разовые затраты распределяются на $K_{\text{парт}}$ изделий:

$$\overline{C^{\text{МКТ}}} = C_{\text{пер}}^{\text{МКТ}} + \frac{C_{\text{раз}}^{\text{МКТ}}}{K_{\text{парт}}}; \quad (1)$$

$$\overline{C^{\text{Баз}}} = C_{\text{пер}}^{\text{Баз}} + \frac{C_{\text{раз}}^{\text{Баз}}}{K_{\text{парт}}}. \quad (2)$$

Для определения границы, где «чистая себестоимость корпуса» (без эксплуатации) становится одинаковой для двух маршрутов, используется условие равенства средних себестоимостей. Это дает пороговый размер партии $K_{\text{порог}}$, который интерпретируется так: при $K_{\text{парт}} < K_{\text{порог}}$ экономически предпочтительнее МКТ уже по себестоимости корпуса (типично для мелких партий); при $K_{\text{парт}} > K_{\text{порог}}$ базовый маршрут становится дешевле по корпусу, и целесообразность МКТ должна подтверждаться эксплуатационными эффектами (стойкость, устойчивость процесса, качество).

В качестве понятной входной переменной по аддитивной части использованы расчетные данные по объему детали и поддержек, ставке стоимости печати за 1 см³ и трудоемкости, сведенные в табл. 2. Она фиксирует различие между полным и топологически оптимизированным исполнением корпуса (объемы, поддержка, трудоемкость и итоговая стоимость), демонстрируя снижение стоимости изготовления при уменьшении объема печатаемого металла.

Для маршрутной (операционной) части приняты сводные составы операций базового и

Таблица 2

Table 2

Расчет стоимости 3D-печати металлом корпуса сверла методом SLM в различных исполнениях
Calculation of the cost of SLM metal 3D printing of the modular drill body in various design variants

Исполнение / Design variant	Объем детали, см ³ / Part volume (cm ³)	Объем поддержки, см ³ / Support volume (cm ³)	Стоимость 1 см ³ печати (изделие + поддержка), долл. / Printing cost per 1 cm ³ (part + support) (\$)	Трудоемкость изготовления, ч / Manufac- turing time (h)	Стоимость изготовления, долл. / Manufacturing cost (\$)
Полнотелое / Solid	40,16	2	2,9	12	122,26
Оптимизированное / Optimized	12,8	5	2,9	7,2	51,62

МКТ-маршрутов, включая контроль и термо-обработку. Отдельно подчеркнуты операции, определяющие различие маршрутов, – глубокое сверление и 5-осевая обработка как «дорогие» и переналаживаемые стадии базового маршрута против «формообразования за одну операцию печати», последующего заполнения и финишной обработки в МКТ.

Подход к декомпозиции себестоимости аддитивного производства на машинное время, расход материала и блоки постобработки соответствует современным моделям затрат для LPBF/SLM, в которых показано, что ключевыми драйверами стоимости являются коэффициент загрузки оборудования, параметры построения и объем постобработки. Дополнительно отмечается, что для корректного сравнения по партиям необходимо учитывать распределение затрат по сборке на платформе и затраты на подготовительно-заключительные операции [15–17].

Методика расчета эксплуатационной экономики (через стойкость)

Эксплуатационная экономика построена вокруг идеи «цены результата» – стоимости получения заданного числа отверстий при одинаковой номенклатуре сменной РГ, но различной стойкости головки в составе сравниваемых корпусов. Методика включает в себя (а) фиксацию экспериментального прироста стойкости как входа, (б) расчет потребности в головках и экономии на них, (в) проверку условия окупаемости дополнительных затрат на корпус.

Вводятся следующие параметры: $N_{\text{отв}}$ – требуемое число отверстий по программе изготовления; $L_{\text{баз}}$ – базовый период стойкости одной

режущей головки (отверстий/головка); $C_{\text{гол}}$ – цена одной режущей головки (или комплекта пластин); γ – относительный прирост стойкости головки при применении МКТ (долями: $\gamma = 0,2$ означает + 20 %).

Тогда потребность в головках в базовом и МКТ-вариантах задается зависимостями

$$N_{\text{гол}}^{\text{Баз}} = \frac{N_{\text{отв}}}{L_{\text{Баз}}}, \quad (3)$$

$$N_{\text{гол}}^{\text{МКТ}} = \frac{N_{\text{отв}}}{L_{\text{Баз}}(1 + \gamma)}. \quad (4)$$

Экономия на головках определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta C_{\text{гол}} &= C_{\text{гол}} \left(N_{\text{гол}}^{\text{Баз}} - N_{\text{гол}}^{\text{МКТ}} \right) = \\ &= N_{\text{отв}} C_{\text{гол}} \frac{\gamma}{L_{\text{Баз}}(1 + \gamma)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Представление эффективности инструмента через метрики «стоимость результата» (например, стоимость на отверстие/операцию) и учет производственных потерь (замены, простои, качество) согласуются с подходами к экономической оценке режущего инструмента и стоимости операций сверления, где показано, что экономический оптимум определяется не только стойкостью, но и затратами системы в целом [1, 18, 9].

Разница затрат на корпус учитывается как разность средних себестоимостей:

$$\Delta C_{\text{корп}} = \overline{C}^{\text{МКТ}} - \overline{C}^{\text{Баз}}. \quad (6)$$

Условие окупаемости МКТ «только за счет головок»:

$$\Delta C_{\text{гол}} \geq \Delta C_{\text{корп}}. \quad (7)$$

Из него выводится пороговый прирост стойкости γ^* :

$$\frac{\gamma^*}{1 + \gamma^*} = \frac{\Delta C_{\text{корп}} L_{\text{Баз}}}{N_{\text{отв}} C_{\text{гол}}}, \quad (8)$$

а также эквивалентные формы, позволяющие оценивать требуемый прирост стойкости для заданной программы отверстий и разницы в стоимости корпуса:

$$\gamma^* = \frac{r}{1 - r}; \quad (9)$$

$$r = \frac{\Delta C_{\text{корп}} L_{\text{Баз}}}{N_{\text{отв}} C_{\text{гол}}}. \quad (10)$$

Практический смысл этого блока следующий: если экспериментально установленный γ превышает γ^* , то дополнительные расходы на корпус по МКТ компенсируются уменьшением потребности в головках даже без учета прочих эффектов (простой, качество, стабильность).

Промышленные испытания и статистическая обработка

Экспериментальная часть (рис. 3), обеспечивающая вход γ , выполнена в виде промышлен-

ных испытаний сверления на реальной детали SR869921-2024 Dn800мм с помощью портально-фрезерного станка Vision Wide Tech VB-3016 с подачей СОТС через шпиндель (до 25 бар) при температуре СОТС 22...30 °С. Использовалась твердосплавная режущая головка FENGYI QD-203-S1/A F7058, сверление выполнялось без отвода инструмента; режимы: $V = 51$ м/мин, $n = 800$ об/мин, $S = 0,1625$ мм/об, глубина 30 мм, диаметр 20,3 мм.

Критерии предельного состояния инструмента сформированы по ГОСТ 19265–73: износ по задней поверхности $VB = 0,3$; превышение шероховатости $Ra > 12,5$ мкм; отклонения формы отверстий сверх допуска; достижение крутящего момента, соответствующего 50 % номинальной мощности шпинделя (контроль по датчику ЧПУ).

Критерий предельного состояния инструмента по износу задней поверхности был принят равным $VB = 0,3$ мм как нормативно закрепленный и широко применяемый в практике металлообработки порог для оценки стойкости сверл и сопоставления результатов испытаний. Выбор указанного значения соответствует требованиям ГОСТ 19265–73, регламентирующего методы



a



б

Рис. 3. Экспериментальная установка и закрепление инструмента при испытаниях на стойкость:

a – сборное сверло в оправке (закрепление инструмента): 1 – оправка; 2 – КС, изготовленный по МКТ; 3 – сменная твердосплавная РГ; *б* – портально-фрезерный станок Vision Wide Tech VB-3016

Fig. 3. Experimental setup and tool clamping during tool-life tests:

a – modular drill mounted in the holder (tool clamping): 1 – holder; 2 – drill body manufactured using the MCT; 3 – modular carbide cutting head; *б* – Vision Wide Tech VB-3016 portal milling machine

испытаний режущего инструмента и допускающего использование износа по задней поверхности как основного критерия окончания периода стойкости. Величина $VB = 0,3$ мм при сверлении относится к области перехода от нормального (стабильного) изнашивания к ускоренному, при котором существенно возрастают силы резания и крутящий момент, ухудшается стабильность процесса и повышается риск выхода параметров отверстия за допуск. В условиях рассматриваемого производства достижение уровня $VB \approx 0,3$ мм сопровождалось ростом нагрузки на шпиндель и ухудшением качества обработанной поверхности, поэтому данный порог дополнительно подтверждался технологическими критериями пригодности результата (шероховатость, соблюдение геометрии и допусков), что обеспечивает корректность и воспроизводимость сравнения стойкости базового и МКТ-вариантов.

Испытания выполнялись сериями, при этом для каждого сверла проводилось по пять экспериментов (пять головок использованы до предельного состояния). Контроль: каждые 50 отверстий – визуальный контроль и измерение износа; каждые 100 отверстий – измерение шероховатости и геометрии; параллельно велось сравнение с серийным базовым сверлом.

В результате был получен измеренный период стойкости: для композитного (МКТ) корпуса – 618 отверстий до $VB = 0,3$ мм, для стандартного – 541 отверстие, что соответствует относительному приросту стойкости $\gamma \approx 14,2$ %. Этот период стойкости γ далее использовался как входной параметр в расчете окупаемости по формулам (3–10).

Статистическую обработку результатов выполняли по выборке $N = 5$ значений периода стойкости для каждого варианта (число отверстий до достижения $VB = 0,3$ мм). Для каждой группы рассчитывали среднее значение $\bar{T}$ и стандартное отклонение s , а также 95%-й доверительный интервал для среднего $\bar{T} \pm t_{0,975, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}$, ($n = 5$). Проверку достовер-

ности различий между вариантами проводили с применением двустороннего t -критерия Уэлча для независимых выборок с неравными дисперсиями при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Помимо p -значения оценивали величину эффекта, стан-

дартизированную разность средних, что позволяло интерпретировать практическую значимость повышения стойкости. Для построения усредненных кривых « $VB - N$ » и «нагрузка – N » на контрольных точках (каждые 50 отверстий) вычисляли средние значения и стандартные отклонения по пяти повторам, что обеспечивало представление воспроизводимости динамики износа и изменения нагрузки.

Результаты и их обсуждение

Экономический эффект на стадии изготовления корпуса по МКТ формируется прежде всего за счет сокращения аддитивного объема металла при сохранении функциональности (внешние рабочие поверхности, посадки, траектория и сечение каналов СОТС). В рамках разработанного исполнения корпуса переход от полнотелой модели к топологически оптимизированной привел к снижению объема печатаемой металлической части с 42,16 до 17,8 см³. При этом объем поддержек увеличился с 2 до 5 см³, что типично для облегченных оболочечных конструкций, где требуется удержание геометрии в процессе построения.

Такой эффект согласуется с исследованиями по DfAM, в которых топологическая оптимизация и интеграция внутренних каналов рассматриваются как способ снизить материалоемкость инструмента при сохранении функции подачи СОТС и заданных посадочных поверхностей. [20]

Интерпретация результата заключается в том, что для корпуса инструмента аддитивное формообразование выгодно использовать как способ «создать функцию» (каналы сложной геометрии и оболочку с заданными поверхностями), а не как способ «напечатать весь объем металла». Топологическая оптимизация в МКТ фактически переносит часть объема из «дорогого» металла SLM в «дешевую» и технологичную фазу заполнения, сохраняя при этом конструктивную пригодность корпуса к финишной мехобработке и сборке (табл. 1).

Эксплуатационный эффект МКТ для рассматриваемого инструмента оценивался через стойкость сменной твердосплавной режущей головки при сверлении в промышленных условиях (рис. 4, 5). В качестве критерия предельного

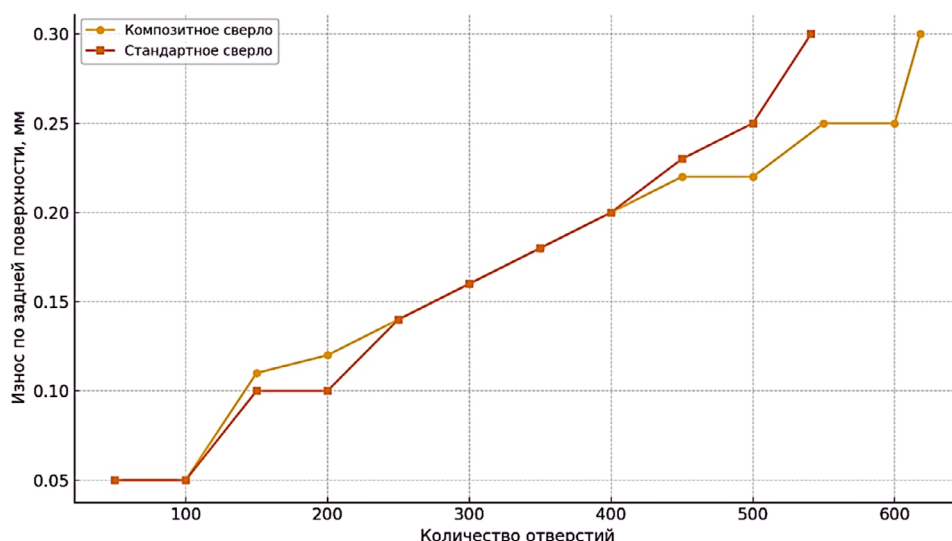


Рис. 4. Сравнение динамики износа режущей головки для базового корпуса и корпуса по МКТ (VB)

Fig. 4. Comparison of cutting head wear progression for the baseline and MCT drill bodies (VB)

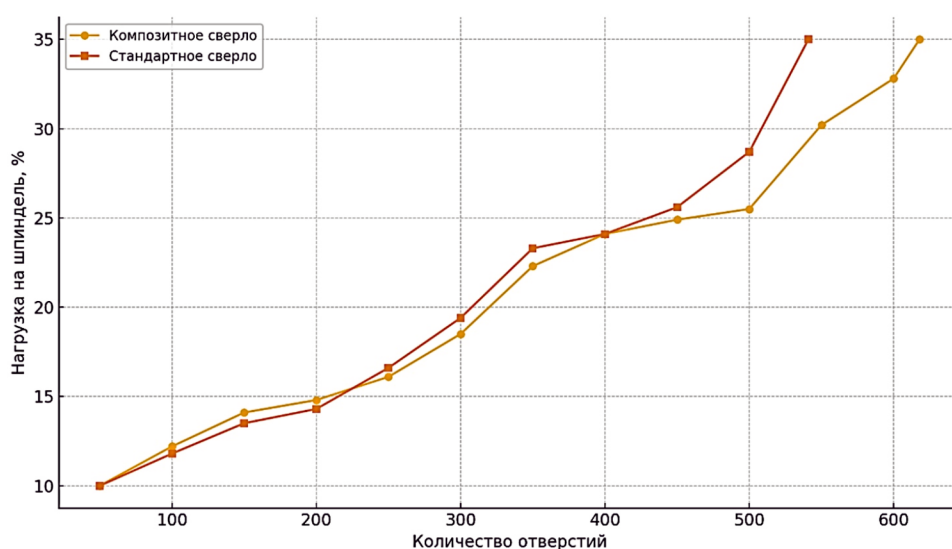


Рис. 5. Сравнение изменения крутящего момента (нагрузки) при сверлении для базового корпуса и корпуса по МКТ

Fig. 5. Comparison of spindle torque (load) evolution during drilling for the baseline and MCT drill bodies

состояния использовался износ по задней поверхности $VB = 0,3$ мм (в сочетании с контролем шероховатости и геометрии, а также ограничением по нагрузке).

В промышленных испытаниях со статистическими повторениями ($n = 5$ для каждого варианта изготовления корпуса сверла, по отдельной режущей головке на повтор) получено, что базовое сверло обеспечило среднюю стойкость $\bar{T} = 541$ отверстие при стандартном отклонении

$s = 22,37$ отверстия, при этом 95%-й доверительный интервал среднего составил $[513,22; 568,78]$ отверстий. Для сверла с корпусом, изготовленным по МКТ, средняя стойкость оказалась выше и составила $\bar{T} = 618$ отверстий при $s = 23,95$ отверстия и 95%-м доверительном интервале $[588,26; 647,74]$ отверстий. Таким образом, наблюдаемое увеличение ресурса на 77 отверстий (около 14 %) подтверждается статистически: различие средних между вариантами является

достоверным по двустороннему t -критерию Уэлча ($t = 5,254, p = 0,00078, \alpha = 0,05$), что позволяет сделать вывод о статистически значимом росте стойкости инструмента при использовании МКТ-корпуса сверла.

Полученный результат имеет прикладной характер: при одинаковой номенклатуре режущей головки и сопоставимых условиях сверления период стойкости составил 618 отверстий для сверла с корпусом, изготовленным по МКТ, и 541 отверстие для стандартного (базового) исполнения. Таким образом, прирост стойкости достиг 14,2 %.

Наличие внутренних каналов подачи СОТС, реализованных аддитивно, рассматривается в литературе как один из наиболее результативных способов снижения износа за счет направленной подачи жидкости и повышения эффективности охлаждения в зоне резания. Экспериментальные сопоставления аддитивно изготовленных инструментов при улучшенной подаче СОТС с традиционными аналогами показывают снижение изнашивания и улучшение стабильности процесса, что в дальнейшем конвертируется в эксплуатационную экономику [21–23].

Содержательно этот прирост важен по двум причинам. Во-первых, он относится не к «идеальным лабораторным» условиям, а к производственной операции на реальной детали, т. е. отражает совокупное влияние факторов подачи СОТС, теплового режима и устойчивости процесса. Во-вторых, именно стойкость сменной головки в модульном инструменте напрямую преобразуется в экономику: меньшее число замен означает снижение прямых затрат на закупку головок и уменьшение времени на обслуживание или простои при сохранении выпуска.

Оценка окупаемости построена на объединении двух компонентов эффекта: эффект на стадии изготовления корпуса (разница средних себестоимостей в партии с учетом разовых и переменных затрат) и эффект на стадии эксплуатации (экономия на режущих головках за счет увеличения стойкости).

При оценке эффективности применения корпуса сверла, изготовленного по МКТ для мелкосерийного производства, предполагается, что $\overline{C}^{\text{МКТ}}$ лежит в интервале, задаваемом временем печати и массой оболочки (SLM), объемом постобработки, стоимостью металлополимера

и долей накладных расходов. Для КС, изготовленного по базовой технологии, $\overline{C}^{\text{Баз}}$ чувствительна к затратам на подготовку производства (наладки, оснастка, сложные 5-осевые траектории, глубокое сверление). Для оценки стоимости эксплуатации полного сверла, состоящего из КС и РГ, себестоимость головки не зависит от выбранного маршрута корпуса и экономический эффект МКТ проявляется через уменьшение числа смен головок (формулы (8–10)).

МКТ целесообразна, если выполняется хотя бы одно из условий:

1) партия и номенклатура: $K_{\text{парт}} \leq K_{\text{порог}}$ – МКТ имеет преимущество по номинальной себестоимости корпуса за счет низких затрат на подготовку производства и высокой автоматизации (типично для пилотных партий, частых изменений конструкции, кастомизации каналов);

2) эксплуатационный эффект: $\gamma \geq \gamma^*$ – прирост стойкости головки компенсирует разницу в цене корпуса. При больших объемах отверстий ($N_{\text{отв}}$) и высокой цене головки ($C_{\text{гол}}$) порог γ^* становится очень низким;

3) технологические ограничения базового маршрута: требуются криволинейные/эквилибрные каналы охлаждения, недостижимые субтрактивно без компромиссов; важны стабильность отвода тепла, качество отверстия, повторяемость;

4) инфраструктурные ограничения: дефицит глубокого сверления и 5-осевых мощностей, высокая стоимость оснастки и наладок. При наличии доступа к SLM и вакуум-заливке МКТ резко снижает входной порог.

Предложенная схема прямо объединяет технологию с экономикой. Во-первых, для мелкосерийного импортозамещающего производства (типичный кейс КС) МКТ дает низкие стартовые издержки (малые $C_{\text{раз}}^{\text{МКТ}}$), а сложность геометрии переносится в машинное время. Во-вторых, за счет каналов сложной формы и композитного хвостовика обеспечивается прирост стойкости (γ), который легко сравнивается с γ^* по формулам (8–10). Этим определяется область эффективного применения.

В рассматриваемой программе изготовления трубной решетки SR869921-2024, DN 800 объем

работ составляет $N_{\text{отв}} = 500 \cdot 470 = 235\,000$ отверстий длиной 30 мм. В качестве базового периода стойкости режущей головки принимается $L_{\text{баз}} = 541$ отверстие (по данным эксплуатации на аналогичной оснастке).

Ставки и прайс-уровни выбраны по открытым российским источникам: 3D-печать металлом SLM – от 230 руб/см³ (ЦАТ г. Воронеж); глубокое сверление как услуга «от 900 руб/нормо-час» (биржа производств) COMETAL; фрезерование/токарная ЧПУ – 1300...2000 руб/ч по прайс-листам цехов (токарная обработка от 1100...1600 руб., фрезерование до HRC 40 – 1800...2175 руб.); термообработка мелких партий – 65...85 руб/кг. Диапазон цен на сменные головки: для FENGYI встречаются позиции за 88 долл. (малые диаметры, розница), для ISCAR SUMOCHAM – 186 долл. (средние диаметры); для расчетов берем среднюю цену, пересчитанную по текущему курсу (сентябрь 2025 г.). Дополнительно зафиксирована сама линейка FENGYI и линейка SUMOCHAM для подтверждения сопоставимости изделий.

Базовый маршрут [11] включает в себя токарную подготовку заготовки (0,50 ч), глубокое сверление внутренних каналов СОТС (0,70 ч), 5-осевую обработку винтовых канавок (0,80 ч), финишное шлифование (0,30 ч), контроль (0,20 ч). При ставках токарной обработки 1300 руб/ч, глубокое сверление 1000 руб/ч, 5-осевая обработка 2000 руб/ч, контроль 1200 руб/ч получаем переменную себестоимость корпуса:

$$C_{\text{пер}}^{\text{Баз}} = 3580 \text{ руб/корпус.} \quad (11)$$

Маршрут МКТ включает в себя печать SLM тонкостенной оболочки (объем печати 17,8 см³ с учетом переходных зон; стоимость печати 17,8 · 230 = 4100 руб.), снятие поддержек и очистку (0,30 ч), вакуум-дегазацию и заливку металлополимера (0,50 ч. + материал 1500 руб.), низкотемпературный отпуск / снятие напряжений (20 руб. для массы 0,25 кг), финишную токарную обработку (0,50 ч) и контроль (0,20 ч). Итого:

$$C_{\text{пер}}^{\text{МКТ}} = 7496 \text{ руб/корпус.} \quad (12)$$

Единовременные затраты приняты по данным ООО «МИГ» г. Воронеж: $C_{\text{раз}}^{\text{Баз}} = 80\,000$ руб. (оснастка/УП/наладки), $C_{\text{раз}}^{\text{МКТ}} = 30\,000$ руб. (техкарты).

Пороговый размер партии КС для партии К:

$$K_{\text{порог}} = \frac{50\,000}{7496 - 3580} \approx 12,8 \text{ шт.} \quad (13)$$

Для пилотного внедрения «НАТЭК» удобно принять $K = 15$ корпусов: в этой точке $\overline{C}^{\text{МКТ}} = 12\,496$ руб/шт, $\overline{C}^{\text{Баз}} = 16\,913$ руб/шт, т. е. МКТ дешевле на 4418 руб/корпус (суммарно 66,255 тыс. руб. на партию из 15 корпусов).

Отталкиваемся от факта испытаний: при одинаковой оснастке и режимах базовая головка обеспечила период стойкости $L_{\text{баз}} = 541$ отверстие; а в составе КС, изготовленного по МКТ, та же номенклатура головки дала $L_{\text{МКТ}} = 618$ отверстий. Относительный прирост стойкости составил $\gamma = (618 - 541) / 541 \approx 14,2\%$. Для производственной программы по трубной решетке SR869921-2024, DN 800 суммарное число отверстий $N_{\text{отв}} = 500 \cdot 470 = 235\,000$ шт.

Экономический эффект формально выражается через «цену отверстия» на головках. Обозначим цену сменной головки как $C_{\text{гол}}$ (руб.).

Тогда удельные затраты на одно отверстие равны $C_{\text{гол}} / L$, где L – период стойкости данной головки в отверстиях. При переходе с базового КС на МКТ экономия на РГ в пересчете на всю программу:

$$\Delta Z_{\text{гол}} = N_{\text{отв}} C_{\text{гол}} \left(\frac{1}{L_{\text{Баз}}} - \frac{1}{L_{\text{МКТ}}} \right). \quad (14)$$

Для рынка РФ возьмем реальные цены на сменные головки премиального уровня: FENGYI QD-203-S1/A F7058 – 88 долл. за штуку, SUMOCHAM (ISCAR) – 186 долл. за штуку; в рубли переведем по текущему курсу (сентябрь 2025 г.). Тогда «вилка» экономии только по головкам составляет:

– при $C_{\text{гол}} = 7,35$ тыс. руб. FENGYI: $\Delta Z_{\text{гол}} = 0,40$ млн руб.;

– при $C_{\text{гол}} = 15,6$ тыс. руб. ISCAR: $\Delta Z_{\text{гол}} = 0,84$ млн руб.;

– при средней цене 11,46 тыс. руб.: $\Delta Z_{\text{гол}} = 0,62$ млн руб.

Те же самые величины удобно увидеть через «количество РГ». Для $N_{\text{отв}} = 235\,000$ потребуются $235\,000 / 541 = 435$ головок в базовом вариан-

те и $235\,000 / 618 = 381$ головка на МКТ, т. е. минус 54 смены РГ. Даже если вообще не учитывать разницу в цене корпуса, то одни только РГ дают экономию примерно 0,40...0,84 млн руб. в зависимости от фактической цены головки на снабжении (в среднем реалистичный ориентир 0,62 млн руб.).

Разница по корпусу дополнительно смещает баланс в пользу МКТ. Средняя себестоимость МКТ-корпуса сверла при пилотной партии $K = 15$ шт. получается ниже, чем у базового субтрактивного КС, примерно на 4,4 тыс. руб/шт (за счет отсутствия трудоемкого глубокого сверления и 5-осевой доводки). Для пилотного внедрения это дает еще 397,5 тыс. руб. экономии на партии корпусов. В пересчете на «цену отверстия» вклад корпуса незначителен (около 0,11 руб/отверстие) на фоне эффекта по головкам, но он стабильно положителен.

Наконец, меньшая частота смены головок – это сокращение простоев. Разница в 54 смены при типовом времени замены 3...5 минут на каждой единице оборудования и ставке машинного времени примерно 2000 руб/час даст еще 5...10 тыс. руб. экономии. Это добавка небольшая относительно экономии на самих головках, но она усиливает общий положительный итог.

По результатам испытаний прирост стойкости головки на композитном КС +14,2 % уже дает положительный экономический эффект. В рамках программы из 235 000 отверстий только за счет меньшего расхода головок экономия составит 0,62 млн руб. С учетом меньшей себестоимости пилотной партии МКТ-КС (примерно 397,5 тыс. руб.) и небольшого снижения простоев общий экономический результат остается положительным. При наблюдаемом периоде стойкости $L_{\text{МКТ}} = 618$ отверстий условие окупаемости выполняется с большим запасом: пороговый прирост стойкости РГ γ^* для объемов программы выпуска «НАТЕК» близок к нулю, а достигнутые +14,2 % кратно его превосходят.

Если произвести расчет от обратного и оценить размер партии КС, изготовленных по МКТ, имеющей экономическую эффективность за счет прироста стойкости, то размер максимальной партии МКТ-КС будет равен

$$K_{\text{макс}} = \frac{\Delta Z_{\text{гол}} - \Delta C_{\text{раз}}}{\Delta C_{\text{пер}}} = \frac{0,62 \text{ млн руб.} + 50\,000}{3,916} = 114 \text{ корпусов.} \quad (15)$$

По выведенным зависимостям и экспериментальным данным о стойкости была построена интерактивная модель (рис. 6), позволяющая оценить экономическую выгоду от прироста стойкости и серийности выпуска КС по МКТ (чтение интерактивного графика рекомендуется осуществлять с использованием актуальной версии приложения Google Chrome).

Таким образом, при обеспечении стойкости РГ в 618 отверстий на единицу прирост стойкости РГ покрывает экономически обоснованный выпуск порядка сотен КС по МКТ. Программа выпуска КС по МКТ ниже значения $K_{\text{макс}}$ окупается с запасом. Программа выпуска КС по МКТ выше $K_{\text{макс}}$ потребует дополнять аргументацию экономической целесообразности другими эффектами. На практике программа выпуска КС будет ограничена единицами или десятками штук. Поэтому в реальном проекте «НАТЕК», пилотная партия составила $K = 15$ шт.

Полученные результаты (как по стойкости режущей головки, так и по экономической оценке окупаемости) отражают условия конкретного производственного участка и выбранной производственной программы. На обобщаемость выводов влияют характеристики оборудования и системы подачи СОТС (тип станка, фактическое давление, расход, температурный диапазон СОТС), стабильность закрепления, организационные особенности обслуживания инструмента, а также принятые на предприятии ставки машинного времени и закупочные цены. В связи с этим численные значения экономического эффекта следует интерпретировать как сценарный расчет для заданного набора входных данных, тогда как предложенная методика предназначена для пересчета под условия конкретного производства при подстановке актуальных параметров.

Экспериментальная верификация выполнена для одного типоразмера модульного сверла (20 мм, 1,5D) и одной пары «обрабатываемый материал – режимы сверления». Следовательно, перенос количественного прироста стойкости и, как следствие, окупаемости на другие диа-

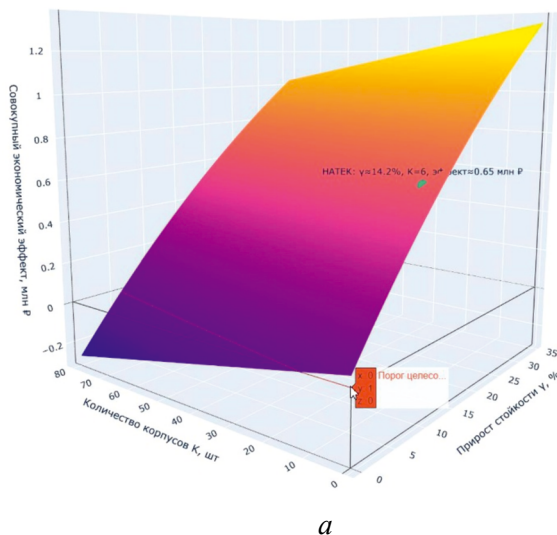


Рис. 6. Оценка экономического эффекта и доступ к интерактивной модели:

a – статичное представление графика зависимости экономического эффекта от прироста стойкости режущей головки и серийности изготовления корпусов; *б* – QR-код для доступа к интерактивному HTML-графику

Fig. 6. Economic effect assessment and access to the interactive model:

a – static plot of the economic effect as a function of cutting head tool-life increase and drill-body production batch size; *б* – QR code linking to the interactive HTML chart

метры, глубины сверления, материалы заготовок и режимы резания требует дополнительной проверки. Вместе с тем структура модели (через период стойкости и стоимость сменной головки) сохраняет применимость и позволяет использовать методику как параметрическую рамку при наличии экспериментально подтвержденного значения стойкости для других условий.

Дополнительным ограничением является потенциальная вариативность качества SLM-изготовления тонкостенной оболочки и внутренних каналов СОТС. Отклонения геометрии каналов, шероховатость внутренних поверхностей, остаточная пористость и различия в постобработке могут изменять гидродинамику подачи СОТС и тепловой режим в зоне резания, что в конечном счете способно влиять на воспроизводимость эксплуатационного эффекта по приросту стойкости. Поэтому при промышленном внедрении МКТ целесообразно сопровождать изготовление оболочек процедурами контроля качества и при необходимости проводить периодическую верификацию фактического прироста стойкости как входного параметра экономической модели.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение области применимости полученных результатов:

1) верификацию модели окупаемости на расширенной выборке производственных программ

(различные объемы сверления $N_{\text{отв}}$, цены сменных головок и условия обслуживания), включая учет времени на замену головок и связанных простоев оборудования как отдельного экономического фактора;

2) обобщение экспериментальных данных по стойкости для различных материалов заготовок и режимов сверления (скорости резания, подачи, глубины), а также для разных конструкций внутренних каналов СОТС и давления подачи с формированием эмпирических поправочных коэффициентов к расчетной модели;

3) повышение точности оценки себестоимости изготовления корпуса по МКТ за счет раздельного учета операций SLM, удаления поддержек, очистки каналов, вибровакuumного заполнения и финишной мехобработки, включая анализ влияния коэффициента загрузки оборудования и потерь материалов;

4) исследование долговечности и надежности металл-полимерного заполнения корпуса инструмента при циклических термомеханических воздействиях (температурные поля, вибрации, контактные нагрузки в зоне закрепления), а также на оценку влияния внутренних дефектов заполнения на ресурс корпуса и повторяемость эксплуатационного эффекта;

5) разработку рекомендаций по выбору области применения МКТ-корпусов в зависимости от типа производства (единичное, мелкосерийное, серийное), требуемого качества отверстий и доступности технологических мощностей с формированием типовых «карт целесообразности» для практического внедрения на предприятиях.

Реализация этих направлений позволит повысить точность прогнозирования экономического эффекта внедрения МКТ, определить устойчивые границы ее целесообразного применения для различных типов производства и производственных программ, а также сформировать практические рекомендации по выбору конструктивных параметров корпуса и режимов сверления, обеспечивающих требуемую окупаемость технологии.

Выводы

Показано, что применение топологической оптимизации в конструкции корпуса сборного сверла по МКТ снижает объем SLM-печати металлической части с 42,16 до 17,8 см³. При условиях расчетного сценария, принятого в работе (единый набор ценовых данных и параметров процесса; расчет на изготовление одного корпуса при заданном маршруте SLM-изготовления оболочки и последующего заполнения металлополимером), это приводит к снижению расчетной стоимости SLM-изготовления металлической оболочки корпуса с 122,26 до 51,62 долл.

Установлено, что указанное снижение составляет около 42,2 % именно для компонента затрат, связанного с SLM-печатью металлической части (оболочки), и не является прямой оценкой снижения полной себестоимости корпуса по МКТ-маршруту, которая дополнительно включает в себя операции заполнения МПКМ, подготовку, обработку и прочие переменные и разовые затраты согласно предложенному МКТ-маршруту.

В промышленных испытаниях сверления при критерии предельного состояния $V/B = 0,3$ мм экспериментально подтвержден прирост стойкости сменной твердосплавной режущей головки: 618 отверстий для МКТ-корпуса против 541 отверстия для базового исполнения, что соответствует увеличению стойкости на 14,2 %.

Предложена и апробирована интегральная методика оценки окупаемости, объединяющая

сравнение себестоимости изготовления корпусов (с учетом разовых и переменных затрат) и эксплуатационную экономику через снижение потребности в режущих головках при заданной производственной программе сверления.

Показано, что экономический эффект применения МКТ является двухкомпонентным: в малых партиях он может формироваться за счет снижения затрат на изготовление корпуса, а при значительных объемах сверления – за счет эксплуатационной экономии, обусловленной ростом стойкости сменной режущей головки.

Сформулированы границы применимости результатов: приведенные численные значения экономического эффекта относятся к рассмотренному в статье сценарию (конкретный типоразмер сверла 20 мм, 1,5D; один обрабатываемый материал и выбранные режимы; ценовые данные и курс валюты зафиксированы на дату их формирования). При изменении условий конкретного производства (стоимость SLM-печати, цена режущей головки, объем партии, производственная программа сверления) методика позволяет определить область, в которой МКТ-маршрут экономически целесообразен. Как правило, он становится предпочтительным при мелкосерийном или специальном производстве, а также при высокой стоимости сменной головки и больших объемах сверления, когда вклад эксплуатационной экономии становится доминирующим.

Список литературы

1. Assessment of metal cutting tools using cost performance ratio and tool life analyses / D. Johansson, R. Lindvall, C. Windmark, R. M'Saoubi, A. Can, V. Bushlya, J.E. Ståhl // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – P. 816–823. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.114.
2. 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 met-al-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.
3. Sultana N., Dhar N., Zaman 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.



4. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Potentials of additive manufacturing for cutting tools: A review of scientific and industrial applications // *Metals*. – 2024. – Vol. 14 (9). – P. 982. – DOI: 10.3390/met14090982.

5. CFD simulation to optimize the internal coolant channels of an additively manufactured milling tool / C. Zachert, H. Liu, T. Lakner, D. Schraknepper // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 102. – P. 234–239. – DOI: 10.1016/j.procir.2021.09.040.

6. Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition / C. Zhang, S. Zhang, X. Yan, Q. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83. – P. 975–984. – DOI: 10.1007/s00170-015-7644-7.

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. 20. – P. 1–12. – DOI: 10.1080/14484846.2022.2094533.

8. Кузнецова М.Н., Улитичев В.С. Экономическая оценка влияния инновационных технологий на развитие металлообрабатывающей отрасли // *Инновационное развитие экономики*. – 2025. – № 1 (83). – С. 66–72. – DOI: 10.51832/22237984_2025_1_66.

9. Оценка экономической эффективности аддитивного производства / М.Б. Ласкин, Л.А. Нефедова, И.В. Ильин, А.И. Левина // *Глобальный научный потенциал*. – 2025. – № 7 (172). – С. 421–426.

10. Кяримов Р.Р., Шапошников Н.Н., Митрянин А.В. Техничко-экономическое обоснование применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления на примере элементов космической техники из титана // *Космическая техника и технологии*. – 2022. – № 4 (39). – С. 5–21.

11. 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.

12. Cost models of additive manufacturing: A literature review / G. Costabile, M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase, D.T. Pham // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 263–282. – DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.9.001.

13. Rickenbacher L., Spierings A., Wegener K. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) //

Rapid Prototyping Journal. – 2013. – Vol. 19 (3). – P. 208–214. – DOI: 10.1108/13552541311312201.

14. Thomas D.S., Gilbert S.G. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. – Gaithersburg: NIST Publisher, 2014. – 89 p. – DOI: 10.6028/NIST.SP.1176.

15. Cost sensitivity analysis for laser powder bed fusion / M. Mandolini, M. Sartini, C. Favi, M. Germani // *Proceedings of the Design Society*. – 2022. – Vol. 2. – P. 1411–1420. – DOI: 10.1017/pds.2022.143.

16. Karas B., Shokrani A. Activity-based costing of laser powder-bed additive manufacturing incorporating discrete event simulation // *NPJ Advanced Manufacturing*. – 2025. – Vol. 2. – P. 24. – DOI: 10.1038/s44334-025-00036-x.

17. Cost modelling for powder bed fusion and direct energy deposition additive manufacturing / N. Khanna, H. Salvi, B. Karas, I. Fairoz, A. Shokrani // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (4). – P. 142. – DOI: 10.3390/jmmp8040142.

18. Kim J., Dornfeld D.A. Cost estimation of drilling operations by a drilling burr control chart and Bayesian statistics // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2001. – Vol. 2. – P. 20. – DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80032-7.

19. Experimental study of cutting-parameter and tool life reliability optimization in Inconel 625 machining based on wear map approach / E. Liu, W. An, Z. Xu, H. Zhang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 53. – P. 34–42. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.006.

20. Topology optimization of a milling cutter head for additive manufacturing / I.B. Costa, B.R. Cunha, J. Marouvo, D. Figueiredo, B.M. Guimarães, M.F. Vieira, J.M. Costa // *Metals*. – 2025. – Vol. 15 (7). – P. 729. – DOI: 10.3390/met15070729.

21. Lakner T., Bergs T., Döbbeler B. Additively manufactured milling tool with focused cutting fluid supply // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – P. 464–469. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.118.

22. Biermann D., Oezkaya E. CFD simulation for internal coolant channel design of tapping tools to reduce tool wear // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 66. – P. 109–112. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.024.

23. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Life cycle assessment of additively manufactured indexable milling tools with adapted cutting fluid supply // *Procedia CIRP*. – 2024. – Vol. 122. – P. 671–676. – DOI: 10.1016/j.procir.2024.01.094.

Конфликт интересов

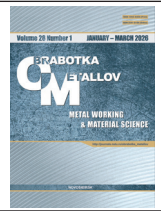
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Payback assessment of the metal–composite technology for modular drill bodies based on an experimentally confirmed increase in cutting head tool life

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

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/0000-0001-5809-4458>, info@polshin.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0003-1801-6767>, await_rescue@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-2997-3282>, n.zagorodnij@yandex.ru;
^e <https://orcid.org/0000-0002-0878-3658>, ardalion_bgutu@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0004-2133-885X>, b.michutka2005@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 January 2026
 Revised: 02 February 2026
 Accepted: 14 February 2026
 Available online: 15 March 2026

Keywords:

Metal-composite systems
 Additive manufacturing
 Tool life
 Metal–polymer
 Drilling

Funding

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

Acknowledgements

The research was carried out using the equipment from the High Technologies Center of BSTU named after V.G. Shukhov.

ABSTRACT

Introduction. Metal–composite technology (*MCT*) for modular drill bodies, based on an additively manufactured thin-walled metal shell with internal coolant channels followed by metal–polymer infill, offers a way to enhance functional coolant delivery while reducing the additive metal volume. However, industrial adoption requires a transparent techno-economic justification that links manufacturing costs with in-service outcomes under a real drilling program. **The purpose of the work** is to assess the payback of *MCT* modular drill bodies using an experimentally validated increase in the tool life of a replaceable carbide cutting head and to outline the economically feasible application domain of the technology. **Methodology.** Two manufacturing routes were compared: a baseline subtractive route for a conventional drill body and the *MCT* route combining SLM shell fabrication, vibro-vacuum polymer infill, and final machining. Payback was evaluated using an integrated model that includes (a) manufacturing cost per body represented as variable costs plus one-time batch costs, and (b) in-service economics expressed through a cost-per-hole metric driven by the consumption rate of replaceable cutting heads within a fixed drilling program. Industrial drilling trials provided the tool-life input; the end of life of the cutting head was defined by a flank wear criterion of $VB = 0.3$ mm. **Results and discussion.** Topology optimization of the *MCT* body reduced the *SLM* metal volume and, consequently, the additive manufacturing cost component. Industrial validation demonstrated an increase in cutting-head tool life from 541 holes for the baseline body to 618 holes for the *MCT* body (+14.2%). For a representative drilling program of 235,000 holes, the model predicts a reduced number of cutting heads and a positive overall economic effect dominated by the in-service component, while the manufacturing component can further shift the balance depending on batch size and one-time setup costs. **Conclusions.** The proposed framework enables mapping the economic feasibility of *MCT* drill bodies as a function of batch size, drilling volume, and cutting-head cost, providing decision-support criteria for industrial implementation.

For citation: Lubimyi N.S., Polshin A.A., Chetverikov B.S., Zagorodniy N.A., Maltsev A.K., Bytsenko M.V. Payback assessment of the metal–composite technology for modular drill bodies based on an experimentally confirmed increase in cutting head tool life. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 233–252. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-233-252. (In Russian).

References

1. Johansson D., Lindvall R., Windmark C., M'Saoubi R., Can A., Bushlya V., Ståhl J.E. Assessment of metal cutting tools using cost performance ratio and tool life analyses. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38, pp. 816–823. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.114.

* Corresponding author

Lubimyi Nikolay S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
 46 street Kostyukova,
 308012, Belgorod, Russian Federation
 Tel.: +7 951 136-40-17, e-mail: nsclubim@bk.ru



2. 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.
3. Sultana N., Dhar N., Zaman 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.
4. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Potentials of additive manufacturing for cutting tools: A review of scientific and industrial applications. *Metals*, 2024, vol. 14 (9), p. 982. DOI: 10.3390/met14090982.
5. Zachert C., Liu H., Lakner T., Schraknepper D. CFD simulation to optimize the internal coolant channels of an additively manufactured milling tool. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 102, pp. 234–239. DOI: 10.1016/j.procir.2021.09.040.
6. Zhang C., Zhang S., Yan X., Zhang Q. Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 83, pp. 975–984. DOI: 10.1007/s00170-015-7644-7.
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. 20, pp. 1–12. DOI: 10.1080/14484846.2022.2094533.
8. Kuznetsova M.N., Ulitichev V.S. Ekonomicheskaya otsenka vliyaniya innovatsionnykh tekhnologii na razvitie metalloobrabatывayushchei otrasli [Economic assessment of the impact of innovative technologies on the development of the metalworking industry]. *Innovatsionnoe razvitie ekonomiki = Innovative Development of Economy*, 2025, vol. 1 (83), pp. 66–72. DOI: 10.51832/22237984_2025_1_66.
9. Laskin M.B., Nefedova L.A., Ilyin I.V., Levina A.I. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti additivnogo proizvodstva [Evaluation of the economic efficiency of additive manufacturing]. *Global'nyi nauchnyi potentsial = Global Scientific Potential*, 2025, vol. 7 (172), pp. 421–426.
10. Kyarimov R.R., Shaposhnikov N.N., Mitryanin A.V. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya additivnoi tekhnologii selektivnogo lazernogo splavleniya na primere elementov kosmicheskoi tekhniki iz titana [Feasibility study for use of selective laser melting-based additive manufacturing technology as exemplified by titanium space hardware components]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Space Engineering and Technology*, 2022, vol. 4 (39), pp. 5–21.
11. Pol'shin A.A. Razrabotka tekhnologii izgotovleniya metall-kompozitnykh korpusov sbornykh sverl v usloviyakh importozameshcheniya [Development of a technology for manufacturing metal-composite bodies for prefabricated drills in the context of import substitution]. *Transportnoe mashinostroenie = Transport Engineering*, 2025, no. 10 (46), pp. 27–35. DOI: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35.
12. Costabile G., Fera M., Fruggiero F., Lambiase A., Pham D.T. Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2017, vol. 8 (2), pp. 263–282. DOI: 10.5267/j.ijiec.2016.9.001.
13. Rickenbacher L., Spierings A., Wegener K. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). *Rapid Prototyping Journal*, 2013, vol. 19 (3), pp. 208–214. DOI: 10.1108/13552541311312201.
14. Thomas D.S., Gilbert S.G. *Costs and cost effectiveness of additive manufacturing*. Gaithersburg, NIST Publisher, 2014. 89 p. DOI: 10.6028/NIST.SP.1176.
15. Mandolini M., Sartini M., Favi C., Germani M. Cost sensitivity analysis for laser powder bed fusion. *Proceedings of the Design Society*, 2022, vol. 2, pp. 1411–1420. DOI: 10.1017/pds.2022.143.
16. Karaş B., Shokrani A. Activity-based costing of laser powder-bed additive manufacturing incorporating discrete event simulation. *NPJ Advanced Manufacturing*, 2025, vol. 2, p. 24. DOI: 10.1038/s44334-025-00036-x.
17. Khanna N., Salvi H., Karaş B., Fairoz I., Shokrani A. Cost modelling for powder bed fusion and directed energy deposition additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (4), p. 142. DOI: 10.3390/jmmp8040142.
18. Kim J., Dornfeld D.A. Cost estimation of drilling operations by a drilling burr control chart and Bayesian statistics. *Journal of Manufacturing Systems*, 2001, vol. 2, p. 20. DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80032-7.
19. Liu E., An W., Xu Z., Zhang H. Experimental study of cutting-parameter and tool life reliability optimization in Inconel 625 machining based on wear map approach. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 53, pp. 34–42. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.006.

20. Costa I.B., Cunha B.R., Marouvo J., Figueiredo D., Guimarães B.M., Vieira M.F., Costa J.M. Topology optimization of a milling cutter head for additive manufacturing. *Metals*, 2025, vol. 15 (7), p. 729. DOI: 10.3390/met15070729.
21. Lakner T., Bergs T., Döbbeler B. Additively manufactured milling tool with focused cutting fluid supply. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 81, pp. 464–469. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.118.
22. Biermann D., Oezkaya E. CFD simulation for internal coolant channel design of tapping tools to reduce tool wear. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, pp. 109–112. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.024.
23. Kelliger T., Meurer M., Bergs T. Life cycle assessment of additively manufactured indexable milling tools with adapted cutting fluid supply. *Procedia CIRP*, 2024, vol. 122, pp. 671–676. DOI: 10.1016/j.procir.2024.01.094.

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>).