

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.923
doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ СБОРНЫХ СВЁРЛ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Андрей Александрович Польшин✉

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия
info@polshin.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>

Аннотация

В условиях санкционного давления и необходимости импортозамещения задача снижения затрат на запуск производства корпусов сборных свёрл приобретает особую актуальность. Цель данной работы заключается в снижении стоимости запуска производства такого корпусного инструмента за счёт внедрения новой технологии изготовления. Проведён сравнительный анализ двух производственных маршрутов: традиционного субтрактивного метода механической обработки и инновационного металл-композитного, сочетающего селективное лазерное плавление металлической оболочки с последующей вибро-вакуумной заливкой металлополимерного наполнителя. Показано, что комбинированная металл-

композитная технология обеспечивает ряд конструктивных преимуществ, недостижимых при классическом подходе, включая формирование конформных внутренних каналов охлаждения и повышение виброустойчивости инструмента благодаря демпфирующему полимерному ядру. Установлено, что новая технология позволяет существенно снизить первоначальные затраты при мелкосерийном производстве корпусов свёрл, что подтверждает целесообразность её применения в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: сверло, металлополимер, композит, импортозамещение, маршрут изготовления.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10022, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Ссылка для цитирования:

Польшин А.А. Разработка технологии изготовления металл-композитных корпусов сборных свёрл в условиях импортозамещения / А.А. Польшин // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 10. – С. 27-35. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35.

Original article
Open Access Article

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING METAL-COMPOSITE BODIES OF PREFABRICATED DRILLS IN THE CONDITIONS OF IMPORT SUBSTITUTION

Andrey Aleksandrovich Polshin✉

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia
info@polshin.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5809-4458>

Abstract

In the conditions of sanctions pressure and the need for import substitution, the task of reducing the cost of starting production of prefabricated drill bodies is becoming particularly relevant. The paper objective is to reduce the cost of starting production of such a tool by introducing a new manufacturing technology. A

comparative analysis of two production routes is carried out: a traditional subtractive method of mechanical processing and an innovative metal-composite method combining selective laser melting of a metal shell with subsequent vibro-vacuum filling of a metal polymer filler. It is shown that the combined metal-composite

technology provides a number of design advantages that are unattainable with the classical approach, including the formation of conformal internal cooling channels and increased vibration resistance of the tool due to a damping polymer core. It is found out that the new technology significantly reduces initial costs in

small-scale production of drill bodies, which confirms the expediency of its use in the conditions of import substitution.

Keywords: drill, metal polymer, composite, import substitution, manufacturing route.

Funding: this paper is funded by the grant from the Russian Science Foundation No. 23-79-10022, <https://rscf.ru/project/23-79-10022/>.

Reference for citing:

Polshin AA. Development of technology for manufacturing metal-composite bodies of prefabricated drills in the conditions of import substitution. *Transport Engineering*. 2025;10:27-35. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-27-35.

Введение

Сборные сверла со сменными режущими головками (рис. 1) востребованы в авиа- и автопроме, энергетическом машиностроении и транспортном машиностроении, где требуется стабильная осевая геометрия, жёсткость корпуса, минимальное биение посадки ($\leq 0,01$ мм), эффективный

отвод стружки и подвод СОТС через внутренние каналы. Международные рекомендации указывают, что внутренний подвод охлаждения критичен для глубин больше $3 \times D$ и вязко-стружкообразующих материалов, поскольку улучшает эвакуацию стружки и перегрев зоны резания [1].

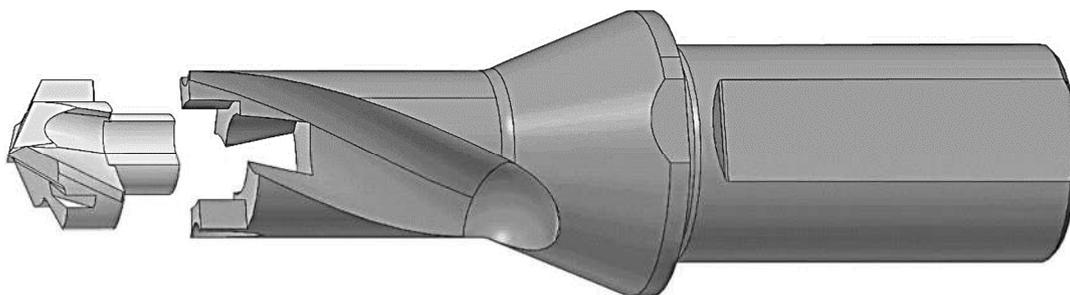


Рис.1. Корпусное сверло тунгалой TID250F32-1.5

Fig. 1. Tungaloy body drill TID250F32-1.5

К ключевым нормативным требованиям относят качества и классы точности, шероховатость рабочих поверхностей, обратную конусность и геометрию канавок; например, ГОСТ 5756-81 и ГОСТ 17277-71 регламентируют классы точности (А – повышенной, В – нормальной) и требования к геометрии спиральных сверл. Для корпусных элементов сборного инструмента эти требования транслируются в точность цилиндрических баз (хвостовик h6), соосность посадки головки и стабильность формы канавок.

Практика ведущих производителей (например, *Tungaloy*) подтверждает функциональные требования к корпусам: точная присоединительная посадка под голов-

ку, сквозные внутренние каналы СОТС и оптимизированные канавки для эвакуации стружки при глубинах сверления $3-12 \times D$. Эти каталожные данные задают ориентиры по допускам, биению и условиям эксплуатации для конструкторско-технологической подготовки [2].

В условиях санкционных ограничений и разрывов поставок проблема доступности высокосложного корпусного инструмента в РФ встала особенно остро. Отраслевые обзоры указывают: «импортозамещены» преимущественно поставщики – европейские и японские марки заменены азиатскими, тогда как доля действительно отечественных высокоточных решений растёт медленнее. Это формирует риски по

номенклатуре и срокам поставки специализированного инструмента. Для металлорезающего инструмента фиксируется смещение структуры рынка при общем дефиците технологической компетенции по ряду позиций [3].

В то же время именно для сложных корпусов сверл с внутренними каналами и жёсткими допусками наиболее критична оперативная технологическая независимость. Базовый (субтрактивный) маршрут, проработанный на площадке ООО «Русский инструмент», включает многооперационные токарные, сверлильные и фрезерные переходы для формирования осевого и радиальных каналов, винтовых стружечных канавок и высокоточных посадок. Такой маршрут технологически осуществим, но при мелкой серии имеет ряд ограничений: высокая трудоёмкость формирования винтовых канавок, необходимость спецоснастки/проводников для глубоких пересекающихся каналов, заметная металлоёмкость и наладочные потери. С учётом текущего рынка это удлиняет цикл освоения и повышает себестоимость единицы при небольших партиях, типичных для инструмента специализированного назначения. Параллельно мировой опыт [4] показывает эффективность «конформных» каналов охлаждения, формируемых аддитивно, по части тепломассопереноса и ресурса инструмента – что плохо достижимо традиционной обработкой.

Альтернативой является разработанная металл-композитная технология (МКТ): аддитивное выращивание тонкостенной металлической оболочки корпуса

на SLM-установке *SLM 280 HL* с последующим армированием внутреннего объёма металлополимерным составом. Предыдущие исследования демонстрируют, что такая конструкция снижает объём печати металлом, допускает формирование эффективных (конформных) каналов СОТС и обеспечивает быстрый запуск мелкосерийного производства без затрат на сложную оснастку, при этом сохраняет требуемую точность базовых посадок после минимальной постобработки.

Ситуация на рынке (рост зависимости от внешних поставок сложного инструмента), технологические ограничения субтрактивного маршрута в малых партиях и потенциал аддитивных методов по управлению каналами охлаждения и геометрией канавок определяют необходимость разработки альтернативного маршрута изготовления. Именно мелкосерийность характерна для корпусного инструмента специального назначения и делает критичными затраты на переналадку и оснастку – что усиливает аргументы в пользу МКТ [5].

Цель исследования заключается в разработке и обосновании металл-композитной технологии изготовления корпусов сборных сверл в условиях импортозамещения, сравнив её с базовым субтрактивным маршрутом ООО «Русский инструмент» по числу операций, трудоёмкости, срокам запуска и технологическим рискам, а также показать функциональные преимущества (конформный подвод СОТС, снижение металлоёмкости) для обеспечения серий малой мощности.

Субтрактивный технологический маршрут изготовления корпуса сверла

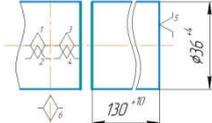
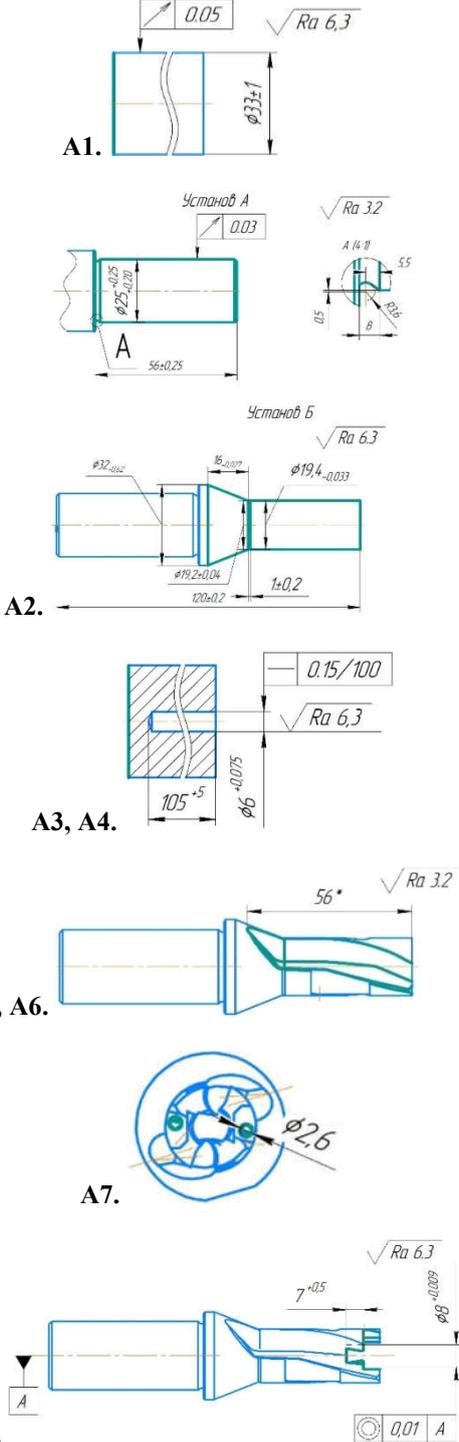
Классический субтрактивный маршрут изготовления корпуса сборного сверла основан на применении стандартного металлорезающего оборудования и методов механической обработки с ЧПУ. Данный процесс был проработан специалистами ООО «Русский инструмент» и отражает подход, который традиционно применяется при серийном производстве инструмен-

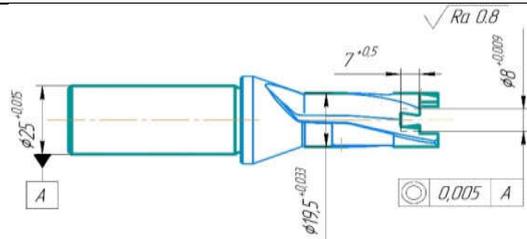
тальной оснастки. Основная идея заключается в том, что корпус сверла формируется из проката (стальной заготовки Ø36...40 мм), а все конструктивные элементы создаются последовательным удалением материала резанием. В табл. 1 приведен упрощённый базовый технологический маршрут изготовления корпуса сверла субтрактивным методом.

Упрощённый базовый технологический маршрут изготовления корпуса сверла
субтрактивным методом

Table 1

Simplified basic engineering route for manufacturing the drill body by the subtractive method

№ операции Наименование	Краткое содержание операции	Оборудование	Эскиз операции
1	2	3	4
005 Ленточно- пильная	Отрезать круглый прокат	<i>BEHRINGER</i> <i>HBE261A</i> Оснастка: штат- ные тиски, упор.	
010 Комплексная с ЧПУ	<p style="text-align: center;">Установ А</p> <p>(основной, в патроне + поддержка люнетом/ЗБ): А1. Базирование и пер- вичная обработка торца А2. Черновое точение наружного Ø А3. Пилот-сверление осе- вого канала Ø6 (5–10×D) А4. Глубокое сверление (gundrill) Ø6, L≈105–110 мм А5. Фрезерование 1-й винтовой стружечной канавки А6. Фрезерование 2-й винтовой канавки (с по- воротом C=180°) А7. Сверление радиаль- ных каналов СОТС 2×Ø2,6 (к Ø6 осевому) А8. Притупление кромок, контроль, подрезка торца А9. Точение/расточка посадки Ø8 h6</p> <p style="text-align: center;">Установ Б</p> <p>короткий пережим за технологический поясок, подрезать второй торец в размер, снять фаски.</p>	Токарный центр с ЧПУ <i>DMG</i> <i>MORI NLX 2000</i>	

№ операции Наименование	Краткое содержание операции	Оборудование	Эскиз операции
1	2	3	4
015 Термическая	Термообработка (закалка+отпуск до HRC 32–38)	печь <i>Ipsen</i>	-
020 Токарная с ЧПУ (чистовая)	Чистовое точение после ТО. Восстановление баз.	<i>Okuma LB3000 EX II</i>	-
025 Шлифовальная	Шлифование хвостовика Ø25 h6 и посадки Ø8 под головку h6	Станок: <i>STUDER S33</i>	
030 Слесарно-отделочная	Мойка, маркировка	Мойка <i>Mafac</i> , Лазер <i>Trumpf TruMark</i>	-
035 Контрольная	Заключительный контроль (КИМ)	<i>Mitutoyo Crysta-Apex</i> ; твёрдомер <i>Wilson</i> ; прибор биения <i>Mahr</i>	Геометрия: Ø32, Ø25 h6, Ø8 h6; длины; биение посадки ≤0,01 мм Каналы СОТС: проходность, герметичность Твёрдость HRC; визуальный контроль

Анализируя базовый маршрут изготовления, можно сделать вывод, что данный маршрут имеет ряд недостатков в условиях импортозамещения и мелкосерийного производства, таких как:

1. Высокая металлоёмкость, так как большая часть материала удаляется в стружку при формировании винтовых канавок и глубоких каналов охлаждения.

2. Сложность технологических операций, связанная с сверлением сквозного канала Ø6 мм на длину 120 мм и пересекающихся каналов Ø2,6 мм, что сопряжено с риском брака и требует дорогостоящего инструмента и оснастки.

3. Трудоёмкость и длительность цикла. Многооперационный маршрут с чередованием токарных, фрезерных, сверлильных и шлифовальных операций удлиняет производственный цикл.

4. Зависимость от импортного инструмента. Высокоточные удлиненные свёрла и фрезы для канавок в России прак-

тически не производятся, что делает маршрут уязвимым в условиях санкций и нарушений поставок.

5. Низкая экономическая эффективность при малых партиях. Высокая доля наладочных и подготовительных работ делает изготовление единичных и малых серий весьма дорогостоящим.

Корпуса сборных свёрл с внутренними каналами и сменными головками относятся к специализированному инструменту, который редко выпускается крупными сериями. Потребность в них формируется преимущественно в авиационно-космической, энергетической и транспортной промышленности в количестве десятков или сотен штук. В таких условиях классический субтрактивный маршрут становится экономически невыгодным [6], что и формирует предпосылки к поиску альтернативных технологий, в частности металл-композитного подхода.

Металл-композитный технологический маршрут изготовления корпуса сверла

Металл-композитная технология (МКТ) основана на комбинированном под-

ходе: формировании тонкостенной металлической оболочки корпуса аддитивным

методом (*SLM*) и последующем армировании её внутреннего объема металлополимерным композитом. Такой маршрут (табл. 2) позволяет снизить металлоём-

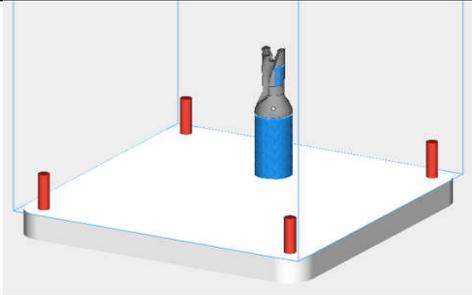
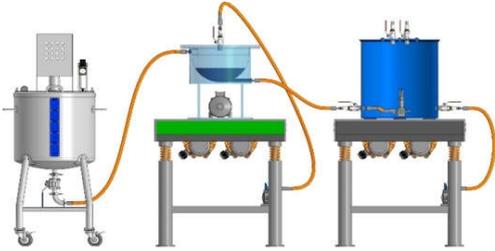
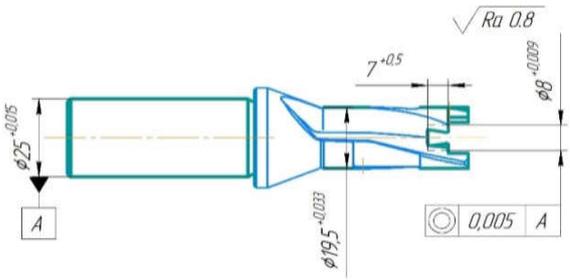
кость и трудоёмкость изготовления, при этом обеспечивая выполнение жёстких требований к геометрии, биению и внутренним каналам подачи СОТС.

Таблица 2

Упрощённый металл-композитный технологический маршрут изготовления корпуса сверла

Table 2

Simplified metal-composite engineering route for manufacturing drill body

№ операции Наименование	Краткое содержание операции	Оборудование	Эскиз операции
1	2	3	4
005 Аддитивная	SLM-печать металлической оболочки. Построение корпуса сверла из порошка (сталь ЭП648) послойным плавлением по 3D-модели.	<i>SLM Solutions 280HL</i>	
010 Термическая	Термообработка (снятие напряжений).	печь <i>Ipsen</i>	термообработка выполняется до снятия детали с платформы
015 Слесарная	Снятие детали с платформы, удаление поддержек и очистка.	Ленточнопильный станок <i>MEBA 3D Band Saw SlatPro Slag Removal Tool (SKU 66101)</i>	-
020 Слесарная	Вибро-вакуумная заливка металлополимера во внутреннюю полость оболочки.	Вибро-вакуумное устройство ПЛГ-1 (собственная разработка)	
025 Токарная с ЧПУ (чистовая)	Чистовое точение	<i>Okuma LB3000 EX II</i>	
030 Слесарно-отделочная	Мойка, маркировка	Мойка <i>Mafac</i> , Лазер <i>Trumpf Tru-Mark</i>	Читаемость маркировки
035 Контрольная	Заключительный контроль (КИМ)	<i>Mitutoyo Crysta-Apex</i> ; твёрдомер <i>Wilson</i> ; прибор биения <i>Mahr</i>	Геометрия: Ø32, Ø25 h6, Ø8 h6; длины; биение посадки ≤0,01 мм Каналы СОТС: проходность, герметичность Твёрдость HRC; визуальный контроль

Анализ конкурентоспособности МКТ по сравнению с субтрактивным технологическим процессом

Металл-композитный технологический маршрут (МКТ) принципиально отличается от классического субтрактивного подхода тем, что ключевые элементы корпуса сверла (винтовые стружечные канавки и внутренние каналы подачи СОТС), формируются на этапе аддитивной печати. Это позволяет исключить наиболее сложные переходы, связанные с пятикоординатным фрезерованием и глубоким сверлением. В результате общая трудоёмкость маршрута снижается, а вероятность брака из-за отклонения сверла при глубоких отверстиях сводится к минимуму.

Субтрактивный процесс предполагает использование массивной заготовки и удаление значительной части металла в стружку. В МКТ корпус печатается в виде облегчённой оболочки толщиной 2...4 мм, которая затем армируется металлополимерным композитом. Такой подход снижает объём печати порошком стали ЭП648 на 30...40 %, а продолжительность цикла построения на 20...25 %. Это отражается и на себестоимости: уменьшается расход порошка, снижается загрузка установки *SLM*, сокращается время чистовой обработки.

Аддитивное формирование позволяет закладывать конформные каналы охлаждения сложной геометрии, что невозможно при традиционном сверлении. Конформные каналы обеспечивают равномерное распределение потока СОТС и улучшенный теплоотвод, что повышает стойкость твердосплавной режущей головки до 20...30 % [7]. Металлополимерный наполнитель дополнительно повышает виброустойчивость конструкции [8], снижает уровень микроколебаний и улучшает качество обрабатываемой поверхности при эксплуатации.

Классический субтрактивный маршрут экономически оправдан при

Заключение

Анализ показал, что металл-композитный технологический маршрут обладает комплексными преимуществами

по сравнению с субтрактивным: он упрощает маршрут, снижает материалоемкость, улучшает функциональные ха-

выпуске крупных серий, так как требует длительной подготовки: наладки оборудования, изготовления специальной оснастки. Для мелких партий (десятки штук) стоимость такой подготовки многократно увеличивает цену единицы изделия [6]. В МКТ для запуска достаточно цифровой модели, установки *SLM* и устройства вибро-вакуумной заливки. Это позволяет без существенных затрат изготавливать партии ограниченного объёма и быстро адаптировать процесс под новые типоразмеры корпусов.

В условиях импортозамещения критично минимизировать зависимость от зарубежных поставщиков высокоточного инструмента. Субтрактивный процесс требует применения удлинённых свёрл, специальных фрез и оснастки, большая часть которых поставлялась иностранными компаниями. Металл-композитный маршрут обходится без этих компонентов: каналы и канавки формируются аддитивно, а дальнейшая обработка ограничивается токарными чистовыми операциями. Это обеспечивает технологическую автономность и снижает риски остановки производства при перебоях в поставках.

В условиях импортозамещения критично минимизировать зависимость от зарубежных поставщиков высокоточного инструмента [9]. Субтрактивный процесс требует применения удлинённых свёрл, специальных фрез и оснастки, большая часть которых поставлялась иностранными компаниями. Металл-композитный маршрут обходится без этих компонентов: каналы и канавки формируются аддитивно, а дальнейшая обработка ограничивается токарными чистовыми операциями. Это обеспечивает технологическую автономность и снижает риски остановки производства при перебоях в поставках.

ми по сравнению с субтрактивным: он упрощает маршрут, снижает материалоемкость, улучшает функциональные ха-

рактеристики и полностью согласуется с условиями мелкосерийного производства. В условиях санкционного давления и необходимости импортозамещения МКТ демонстрирует более высокую кон-

курентоспособность, создавая предпосылки для формирования отечественной базы производства высокоточных корпусных деталей сборного инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sandvik Coromant. Metal cutting technology: Drilling [Электронный ресурс]. — URL: https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/drilling/drilling-tips?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 08.09.2025).
2. Tungaloy. DrillMeister Modular Drilling System. Official Brochure. Tungaloy Corporation, 2021. — URL: https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/412-u_DrillMeister.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 08.09.2025).
3. РИТМ машиностроения. Российский рынок металлорежущего инструмента [Электронный ресурс]. — URL: https://ritm-magazine.com/ru/public/rossiyskiy-rynok-metallorezhushchego-instrumenta?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 08.09.2025).
4. Kanbur B.B., Zhou Y., Shen S., Wong K.H., Chen C., Shocket A., Duan F. Metal Additive Manufacturing of Plastic Injection Molds with Conformal Cooling Channels. *Polymers*. 2022. 14. 424. <https://doi.org/10.3390/polym14030424>.
5. 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. *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, 8, 44. <https://doi.org/10.3390/jmmp8020044>.

6. Lubimyi N.S., Voronenko V.P., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Antsiferov S., Oğuz Kaan Öztürk, Chetverikov B.S., Tikhonov A.A., Ryzantsev V.G., Shumyacher V.M., Melentiev N. What is the economic feasibility of manufacturing a metal-metal-polymer composite part compared to other technologies?, *Australian Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 20. Iss. 4. P. 1-12. DOI: 10.1080/14484846.2022.209453.
7. EOS. Additive Manufacturing advantages in tooling [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.eos.info/content/blog/the-strategic-advantage-of-am-for-tooling> (дата обращения: 08.09.2025).
8. Murčinková Z, Adamčík P, Sabol D. Dynamic Response of Components Containing Polymer Composites in the Resonance Region for Vibration Amplitudes up to 5g. *Polymers*. 2022. 14(22):5051. <https://doi.org/10.3390/polym14225051>.
9. Глаголев С.Н., Моисеев В.В. Проблемы импортозамещения в России. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 204-208.

REFERENCES

1. Sandvik Coromant. Metal cutting technology: Drilling [Internet]. [cited 2025 Aug 09] Available from: https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/drilling/drilling-tips?utm_source=chatgpt.com.
2. Tungaloy. DrillMeister Modular Drilling System. Official Brochure. Tungaloy Corporation [Internet]. 2021 [cited 2025 Aug 09] Available from: https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/412-u_DrillMeister.pdf?utm_source=chatgpt.com.
3. The Rhythm of mechanical engineering. Russian market of metal-cutting tools [Internet]. [cited 2025 Aug 09] Available from: https://ritm-magazine.com/ru/public/rossiyskiy-rynok-metallorezhushchego-instrumenta?utm_source=chatgpt.com.
4. Kanbur BB, Zhou Y, Shen S, Wong KH, Chen C, Shocket A, Duan F. Metal additive manufacturing of plastic injection molds with conformal

cooling channels. *Polymers* [Internet]. 2022;14:424. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym14030424>.

5. Lubimyi NS, Chepchurov M, Polshin AA, Gerasimov MD, Chetverikov BS, Chetverikova A, Tikhonov AA, 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. *J. Manuf. Mater. Process* [Internet]. 2024;8:44. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmmp8020044>.
6. Lubimyi NS, Voronenko VP, Polshin AA, Gerasimov MD, Antsiferov S, Oğuz Kaan Öztürk, Chetverikov BS, Tikhonov AA, Ryzantsev VG, Shumyacher VM, Melentiev N. What is the economic feasibility of manufacturing a metal-metal-polymer composite part compared to other technologies? *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 20(4):1-12. DOI: 10.1080/14484846.2022.209453.

7. EOS. Additive Manufacturing advantages in tooling [Internet]. [cited 2025 Aug 09] Available from: <https://www.eos.info/content/blog/the-strategic-advantage-of-am-for-tooling>.
8. Murčinková Z, Adamčík P, Sabol D. Dynamic response of components containing polymer composites in the resonance region for vibration

amplitudes up to 5g. *Polymers* [Internet]. 2022;14(22):5051. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym14225051>.

9. Glagolev SN, Moiseev VV. Problems of import substitution in Russia. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016;1:204-208.

Информация об авторе:

Польшин Андрей Александрович – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, Author-ID-РИНЦ: 1204463, тел. 8-920-203-12-99.

Polshin Andrey Aleksandrovich – Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology at Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Author-ID-РИНЦ: 1204463, phone: 8-920-203-12-99.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 29.08.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 26.09.2025. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 29.08.2025; approved after review on 09.09.2025; accepted for publication on 26.09.2025. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.