

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9.02; 621.01
doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-31-41

ПОСТОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ SLM

Сергей Семенович Кугаевский^{1✉}, Андрей Павлович Старостин², Анатолий Васильевич Губанов³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ s.s.kugaevskiy@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8715-3699>

² andrey.starostin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5639-1704>

³ avgubanov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4444-4643>

Аннотация

Рассмотрены способы финишной обработки поверхностей изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM). Приведен опыт экспериментальных исследований, выполненных для изготовления корпусов режущего инструмента (резцы, фрезы, сверла) с применением технологии SLM. Рассмотренные изделия имеют сложную пространственную форму рабочих поверхностей, изготовление которых традиционными способами невозможно. Преимущества аддитивных технологий для изготовления таких изделий описаны достаточно широко, но этот метод имеет достаточно много недостатков. В том числе большая шероховатость поверхности и недостаточно высокая точность расположения этих поверхностей. Так, при требовании к шероховатости поверхности

Ra_{2,5} мкм аддитивные технологии позволяют получить только Ra_{12,5} мкм (Rz40). Наибольшая точность изделий, полученных SLM, составляет 0,1 мм при требовании 0,03±0,05 мм. Таким образом, аддитивный метод изготовления сложных изделий может рассматриваться как подготовительный этап, а финишную обработку базовых и рабочих поверхностей приходится выполнять на более поздних этапах производства.

Проанализирован опыт окончательной обработки таких изделий на примере изготовления корпусов токарных резцов, а также концевых и торцевых фрез.

Ключевые слова: фреза, пластина, каналы, технологии, постобработка, SLM, поверхность.

Благодарности: Авторы выражают благодарность за финансирование исследований со стороны Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Программа развития Уральского федерального университета в рамках Программы «Приоритет-2030»).

Ссылка для цитирования:

Кугаевский С.С. Постобработка изделий, изготовленных аддитивным способом SLM / С.С. Кугаевский, А.П. Старостин, А.В. Губанов // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 2. – С. 31-41. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-31-41.

Original article
Open Access Article

POST-PROCESSING OF PRODUCTS MADE BY ADDITIVE SLM METHOD

Sergey Semenovich Kugaevsky^{1✉}, Andrey Pavlovich Starostin², Anatoly Vasilyevich Gubanov³

^{1,2,3} Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

¹ s.s.kugaevskiy@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8715-3699>

² andrey.starostin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5639-1704>

³ avgubanov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4444-4643>

Abstract

The methods of finishing surfaces of products by selective laser melting (SLM) are considered. The experience of experimental studies performed for manufacturing cutting tool housings (cutters, cutters, drills) using SLM is presented. The products considered have a complex spatial shape of the surfaces, which cannot be manufactured using traditional methods. The advantages of additive technologies for manufacturing such products are widely described, but this method has quite a few disadvantages. This includes high surface roughness and insufficiently high accuracy of the location of these surfaces. Thus, with a surface roughness requirement of Ra2.5 microns, additive technolo-

gies can only produce Ra12.5 microns (Rz40). The highest accuracy of products obtained by SLM is 0.1 mm with a requirement of 0.03-0.05 mm. Thus, the additive manufacturing method of complex products can be considered as a preparatory stage, and the finishing of the base and working surfaces has to be performed at later stages of production.

The experience of final processing of these products is analyzed using the example of manufacturing turning tool housings, as well as end and end mills.

Keywords: milling cutter, plate, channels, technologies, post-processing, SLM, surface.

Acknowledgments: The authors acknowledge the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for funding their research (the Ural Federal University Development Program under the Priority 2030 Program).

Reference for citing:

Kugaevsky SS, Starostin AP, Gubanov AV. Post-processing of products made by additive SLM method. Transport Engineering. 2026;2:31-41. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-31-41.

Введение

Способ изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления металлического порошка известен с 90-х годов прошлого века [1, 2]. Суть метода заключается в том, что металлический порошок разравнивают тонким слоем на плоской поверхности, после чего с помощью концентрированного источника энергии (лазера) выборочно сплавляют частицы порошка в соответствии с заранее разработанной 3D-моделью. После отверждения каждого текущего слоя наносят новый слой порошка, и процедура повторяется до полного отверждения заданного моделью объема. При этом имеется возможность управлять структурой внутреннего пространства детали, формируя в нем пустоты в виде облегчений, каналов заданной формы, герметичных камер и т.д. Различные исследователи [3-5] отмечают высокий уровень плотности полученной структуры металла до 99,95%, что значительно лучше, чем плотность литых деталей, хотя и немного хуже, чем структура деталей из проката.

Первоначально аддитивные технологии рассматривались только как способ быстрого прототипирования, когда этим методом можно изготовить опытные образцы и модели будущих изделий. Но в последние 10 лет мы становимся свидетелями массового перехода изготовления

функциональных производственных деталей с субтрактивного метода, связанного с удалением стружки, к аддитивному методу.

Среди достоинств аддитивного метода можно отметить значительную экономию материала и возможность получения сложных пространственных форм по сравнению с традиционными методами обработки резанием (точение, сверление, фрезерование). К недостаткам метода обычно относят высокую стоимость, недостаточную точность и качество поверхностей. По сути метод можно отнести к заготовительному производству сравнимому с методами точного литья. При этом дополнительным преимуществом аддитивных технологий является повышенная мобильность создания новых изделий. Ведь напечатать новую деталь по 3D-модели можно в течение нескольких суток, в то время как для изготовления заготовки методом литья и последующей механической обработки потребуется несколько месяцев. Что касается стоимости аддитивного производства, то при современных темпах развития цифровых технологий эта стоимость постоянно уменьшается. В частности, аддитивные SLM-машины оснащаются несколькими одновременно работающими лазерами, создаются новые мощности по производству металлических порошков различных спе-

циальных сплавов. По данным [6] прогнозируемый среднегодовой темп роста (CAGR) российского рынка аддитивных технологий (АТ) до 2030 года составляет около 20 %. Поэтому поиск эффективных методов постобработки наиболее ответственных поверхностей деталей, полученных методом *SLM*, приобретает большое значение.

В первую очередь определимся с тем, какие поверхности корпусной детали можно отнести к «наиболее ответственным». Профессором Б.М. Базровым разработан модульный подход к оценке состава поверхностей корпусной детали [7]. В соответствии с его теорией деталь представляет собой пространственное тело, очерченное совокупностью поверхностей (рис. 1). Все поверхности делятся на исполнительные и связующие. В свою очередь исполнительные поверхности делятся на базисные и рабочие.

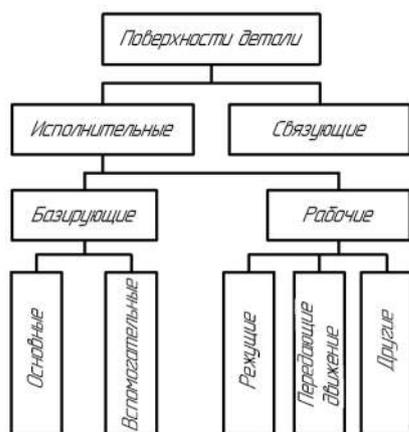


Рис. 1. Классификация поверхностей детали, как сборочной единицы [6]

Fig. 1. Classification of surfaces of a part as an assembly unit [6]

На основании многочисленных примеров автором сформировано ограниченное число исполнительных поверхностей, для которых сформированы типовые варианты технологии обработки резанием. Нетрудно заметить, что в контексте постобработки деталей, полученных *SLM*, повышения точности и снижения шероховатости требуют только исполнительные поверхности детали.

Рассмотрим типовые методы финишной обработки деталей в машинострои-

тельном производстве. Традиционно их разделяют на обработку резанием, шлифование, пескоструйную обработку, абразивное полирование, лазерную полировку, электрофизическую обработку, электрохимическое снятие заусенцев и др.

Наиболее доступным на сегодняшний день является механическая чистовая обработка на станках с ЧПУ. Этот метод достаточно универсален и может быть применен в тех случаях, когда обработке подвергаются открытые и полукрытые поверхности, к которым имеется доступ режущего инструмента. Проблемой являются узкие места, где применяемый инструмент должен иметь небольшие размеры и соответственно малую жесткость.

Шлифование является классическим методом финишной обработки деталей, в том числе имеющих повышенную твердость после термообработки. Применение круглошлифовальных и плоскошлифовальных станков идеально подходит для постобработки открытых базовых поверхностей. Но в случае постобработки узких мест метод шлифования становится проблематичным из-за невозможности применять стандартные шлифовальные инструменты.

Пескоструйная обработка обычно применяется для снятия заусенцев и улучшения качества наружных поверхностей, но этот способ не дает обеспечения точности выборочных исполнительных поверхностей и может применяться только для улучшения внешнего вида изделия.

Абразивное полирование является очень трудоемким способом и может применяться только в легкодоступных местах.

Лазерное полирование является перспективным методом, но в настоящее время недостаточно изучено и требует применения дорогостоящего оборудования.

Электрофизическая обработка формованным электродом может применяться для повышения точности и улучшения качества поверхности закрытых зон. Однако сам процесс требует наличие электрода специальной формы, сложен в настройке и требует применения дорогостоящего оборудования.

Электрохимический процесс анодного растворения металла может обеспечить исключительно хорошее качество всех поверхностей детали в целом, но не приме-

Методы

В Уральском федеральном университете ведутся разработки конструкций корпусного режущего инструмента, изготовленного методом *SLM* [8-10]. Для проведения исследований использован экспериментальный метод постобработки корпусов концевых и торцевых фрез. С учетом относительной дороговизны *SLM*-метода была проанализирована экономическая це-

ним для повышения точности расположения требуемых исполнительных поверхностей.

лесообразность применения этого метода по сравнению с методом традиционной лезвийной обработки. Особенностью конструкции представленных корпусов является повышенное количество режущих кромок фрезы. На рис. 2а показана фреза *D50 Z6* производства «*KORLOY*», а на рис. 2б показана фреза *D50 Z10* изготовленная методом *SLM*.

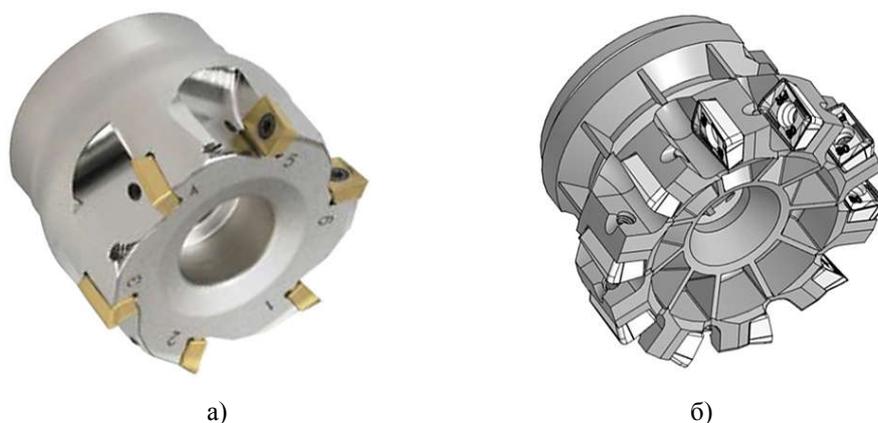


Рис. 2. Сравнение фрез, а – полученных традиционным способом; б – изготовленных методом *SLM*
 Fig. 2. Comparison of cutters produced by the traditional method (a) and those manufactured by the *SLM* method (b).

Как известно, производительность фрезерования напрямую связана с минутной подачей фрезы. Эта зависимость представлена в (1).

$$Q = tBS_m, \text{ мм}^3/\text{мин} \quad (1)$$

где Q – снимаемый объем стружки в единицу времени; t – глубина фрезерования (мм); B – ширина фрезерования (мм); S_m – минутная подача инструмента (мм/мин).

В свою очередь:

$$S_m = S_z Z n, \text{ мм/мин} \quad (2)$$

где S_z – подача на (мм/зуб); Z – количество зубьев, участвующих в работе; n – число оборотов шпинделя (об/мин).

Глубина и ширина фрезерования обычно выбирается на основании конструктивных особенностей детали. Подача на зуб определяется нагрузкой на режущую пластинку (зуб), при которой пла-

стинка не разрушается. Число оборотов шпинделя рассчитывается на основании рекомендуемой скорости резания для данного обрабатываемого материала. Как видно из формулы, при увеличении числа зубьев (режущих кромок инструмента) пропорционально увеличивается объем снимаемой стружки и соответственно производительность обработки.

Повышение количества режущих кромок при изготовлении фрезы обычными методами (фрезерование) ограничено возможностью доступа инструмента к поверхности площадки, на которую должно устанавливаться сменная твердосплавная пластина (СТП). Вариант возможной коллизии показан на рис. 3. В то же время, аддитивная технология этого ограничения не имеет.

На рис. 4 показаны примеры корпусов режущего инструмента, изготовленного методом *SLM* по чертежам и моделям авторов статьи.

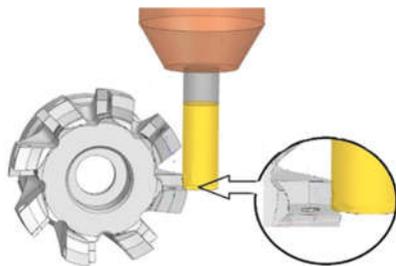


Рис. 3. Ограничение доступа инструмента к обрабатываемой поверхности
Fig. 3. Restricting access of the tool to the work surface



Рис. 4. Примеры корпусов режущего инструмента
Fig. 4. Examples of cutting tool bodies

Другой пример – изготовление режцового модуля, содержащего внутренние каналы для подвода *COTC* (рис. 5). Кон-

струкция режущего инструмента описана в работе [11].

Полученные после печати образца были измерены и оценены на соответствие точности расположения исполнительных поверхностей и их допустимой шероховатости.

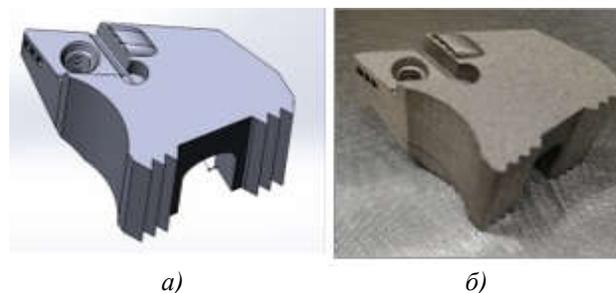


Рис. 5. а – 3D-модель; б – фотография сменного режцового модуля с каналами для подачи *COTC*, изготовленного методом *SLM*
Fig. 5. 3D model (a) and photograph (б) of a replaceable cutting module with channels for supplying coolant, manufactured using the *SLM* method

Анализ показал, что точность взаимного расположения поверхностей деталей, изготовленных методом *SLM*, составляет примерно 0,1 мм при требуемой точности для рабочих поверхностей $\Delta = \pm 0,02$ мм, а шероховатость составляет Ra 12,5 мкм при требуемом качестве поверхности Ra 1,25 мкм. Следовательно, полученные детали нуждаются в постобработке.

Экспериментальная проверка теоретических результатов

Операции постобработки связующих поверхностей. В первую очередь должны быть выполнены финишные операции, направленные на уменьшение шероховатости и улучшение внешнего вида. Для уменьшения шероховатости поверхности изделий после *SLM* применяются различные методы постобработки, которые можно условно разделить на механические, термические, химические и электрохимические [11-14]. Наиболее доступным методом является пескоструйная обработка. В ходе эксперимента в стационарной очистной камере КСО-110-НСФР ВМЗ была произведена обработка экспериментальных образцов. Обработка производилась при давлении от 0,35 до 0,7 МПа. В качестве абразива использовался электроко-

рунд марки 25А зернистостью F24, изготовленный ООО «Заводом абразивных и огнеупорных материалов» ГОСТ 28818-90. В результате удалось улучшить качество поверхностей по всему объему детали до величины Ra 2,5 мкм.

В случае повышенных требований к качеству поверхностей была проработана возможность выполнения электрохимического полирования, в том числе технология *DryLyte*.

DryLyte – это технология сухого электрохимического шлифования и полирования металлических изделий с помощью переноса ионов металла посредством свободных твердых тел (рис. 9). Отличительной особенностью и уникальностью *DryLyte* является то, что жидкости не ис-

пользуются в качестве электролитов. В работах [14,15] отмечено, что благодаря технологии *DryLyte* удалось добиться шероховатости поверхности изделия на ответственных поверхностях $Ra0,08$ мкм. В нашем случае, как было сказано выше, высокие требования к точности и чистоте поверхностей предъявляются только к исполнительным поверхностям, а связующие поверхности могут быть изготовлены с ше-

роховатостью $Ra 2,5$ мкм. Поэтому было принято решение ограничиться описанной выше пескоструйной обработкой.

Механическая обработка базовых и рабочих поверхностей. В случае изготовления корпусов фрез к исполнительным поверхностям можно отнести базовые поверхности, которыми фреза устанавливается в станочную оправку (рис. 6).



Рис. 6. Базовые поверхности корпусов режущего инструмента
Fig. 6. Base surfaces of cutting tool bodies

На рис. 6 показаны базовые цилиндрические (поз.1) и базовые торцевые (поз.2) поверхности.

С целью создания черных технологических баз в конструкции фрезы предусмотрены технологические фаски. Учитывая то, что в ходе 3D-печати методом *SLM*

все поверхности детали создаются за один установ, взаимное расположение этих фасок и рабочих поверхностей гнезда под СТП получается с высокой точностью. На рис. 7 показана схема базирования детали по этим фаскам при обработке базовых цилиндрических поверхностей.

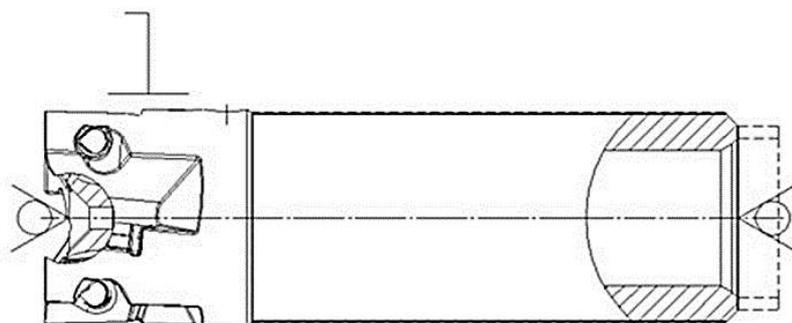


Рис. 7. Схема базирования детали при обработке базовых цилиндрических поверхностей
Fig. 7. Diagram of the part basing when processing base cylindrical surfaces

С использованием этих базовых поверхностей в дальнейшем обрабатывают рабочие поверхности. Рабочими поверхностями, в случае изготовления корпусов режущего инструмента, являются поверхности гнезда под СТП, показанные на рис. 8.

Используя классификацию конструктивно-технологических элементов корпусной детали [16,17], эти поверхности относятся к классу «уступ» и не представляют больших трудностей при фрезерной обработке на станках с ЧПУ.

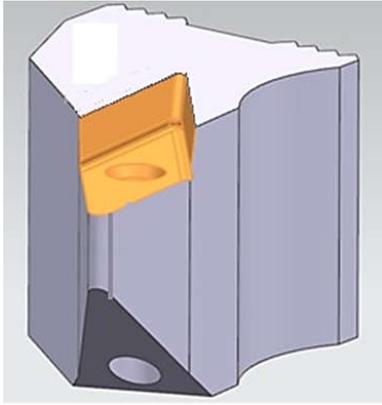


Рис.8. Рабочие поверхности корпусов режущего инструмента - поверхности гнезда под СТП
 Fig.8. Working surfaces of cutting tool bodies – surfaces of the socket for the insert

Однако в некоторых случаях, например при обработке корпусов фрез, боковые стенки такого уступа имеют отрицательный наклон. Это создает трудности для доступа концевой фрезы к опорным поверхностям, что создает немалые проблемы при их обработке (рис. 9).

Для определения наиболее оптимальной стратегии обработки открытых рабочих поверхностей (например – при обработке гнезда под СТП в корпусе токарного резца) были проанализированы различные варианты обработки.



Рис. 9. Классификация конструктивно-технологических элементов корпусной детали
 Fig. 9. Classification of design and technological elements of a body part

Наиболее эффективным способом является последовательная обработка опорной плоскости концевой фрезой и обработка боковых базовых поверхностей конусной фрезой. При этом на первой ста-

дии обработки применяется траектория по схеме «эквилибриста», а на второй стадии траектория по схеме «контурная вдоль стенки». Траектории показаны на рис. 10.

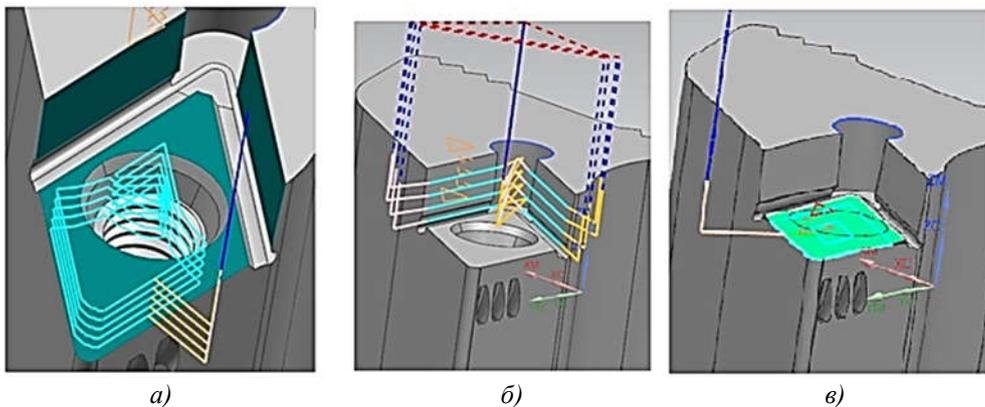


Рис. 10. Траектории черновой обработки – а, обработки базовых боковых поверхностей – б и в – чистовой обработки опорной поверхности гнезда под СТП
 Fig. 10. Trajectories of rough machining (а), machining of base side surfaces (б) and finishing machining of the supporting surface (в) of the socket for the insert

Результат выполнения постобработки открытых рабочих поверхностей корпуса инструмента на 3-х осевых станках с ЧПУ показал целесообразность такого подхода. Сложнее приходится с обработкой закрытых рабочих поверхностей, в частности при обработке гнезда под СТП в корпусе торцевой или концевой фрезы. Во-первых, точность расположения этих поверхностей выше из-за необходимости обеспечить минимальное биение режущих кромок СТП относительно оси фрезы. Во-вторых, доступ цилиндрической концевой фрезы к рабочим поверхностям ограничен, о чем было сказано выше. Поэтому постобработку закрытых рабочих поверхностей необходимо производить на 5-ти осевых станках с ЧПУ (рис. 11).

Расчет управляющей программы проведен в программе СПРУТКАМ (рис. 12). С целью оптимизации конструкции базовые боковые поверхности были выполнены в виде отдельных плоских платиков.

Опорная поверхность под установку СТП так же была немного уменьшена. Учитывая то, что опорная поверхность занимает более половины площади опоры и лишает 3-х степеней свободы, в результате получилась классическая схема базирования из 6-ти базовых точек.



Рис. 11. Обработка гнезда под СТП на 5-ти координатном станке с ЧПУ

Fig. 11. Machining the socket for the tool insert using a 5-axis CNC machine

Первоначально обработаны 2D-контуры поверхностей, соприкасающихся с боковыми сторонами СТП (рис. 12а), а затем по круговой траектории обработана опорная поверхность для установки СТП (рис. 12б).

В результате удалось обеспечить требуемую точность рабочих поверхностей, но трудоемкость и себестоимость такой постобработки оказалась весьма высокой, что заставляет искать другой, более дешевый способ постобработки.

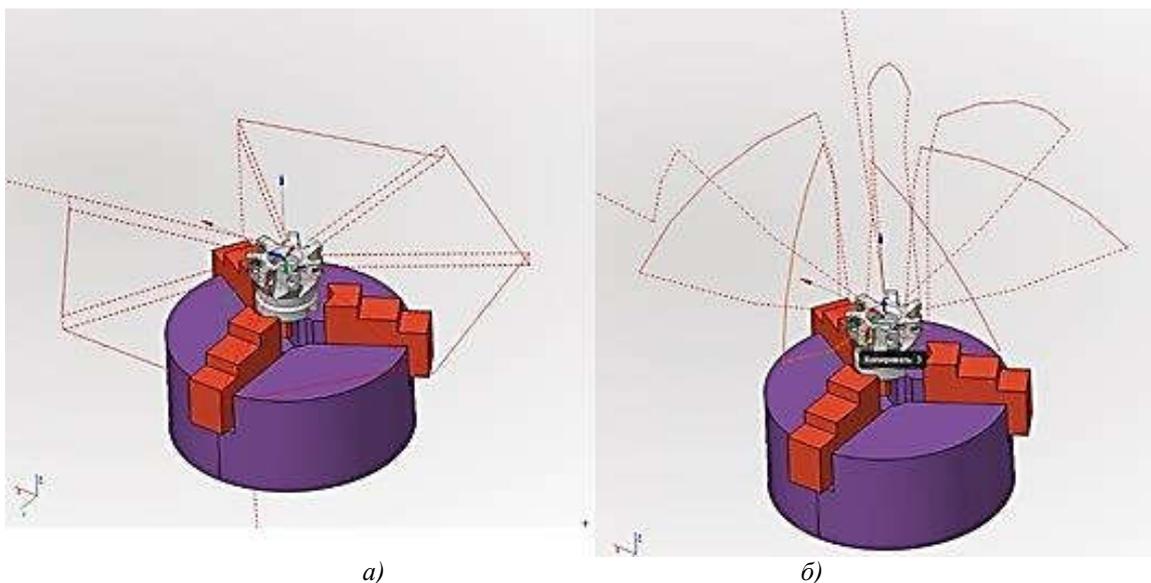


Рис. 12. Траектория инструмента при обработке на 5-ти осевом станке базовых боковых поверхностей – а и опорных поверхностей – б гнезда под СТП

Fig. 12. Tool path when machining the base side surfaces (a) and support surfaces (б) of a insert on a 5-axis machine

Заключение

В Уральском федеральном университете ведутся разработки конструкций режущего инструмента с внутренними каналами для подачи СОЖ в зону резания и инструмента с увеличенным количеством режущих кромок. В результате выполненных исследований:

1. Обоснована целесообразность классификации деталей, изготовленных методом аддитивных *SLM* технологий, основанная на выделении связующих и исполнительных модулей поверхностей.

2. На основании построенных 3D-моделей изготовлены опытные образцы корпусного инструмента методом селективного лазерного сплавления – *SLM* с последующей обработкой исполнительных поверхностей на металлорежущих станках.

3. Обоснована необходимость добавления в 3D-модель вспомогательных эле-

ментов, используемых для базирования на операциях постобработки.

4. Разработаны типовые схемы постобработки рабочих модулей поверхностей, служащих для установки сменных твердосплавных пластин (СТП) в корпусе инструмента.

Результаты наблюдений показали, что для открытых рабочих модулей поверхностей (токарные резцы) целесообразно использовать 3-х осевую обработку на станках с ЧПУ.

Для закрытых рабочих модулей поверхностей (многозубые фрезы) требуется 5-ти координатная обработка на станках с ЧПУ. При этом трудоемкость постобработки слишком высока, а точность обработки рабочих поверхностей недостаточна ввиду малой жесткости доступного инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент US4863538A Метод и аппарат производства деталей с помощью селективного спекания
2. ГОСТ Р 59036-2020 Аддитивные технологии Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков
3. Исследование физико-механических свойств образцов, полученных по технологии SLM. Часть 1. Предел прочности / П. Г. Зобов, А. В. Дектярев, К. В. Казаченко, В. Н. Морозов // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 107-117. DOI 10.46845/1997-3071-2022-65-107-117. EDN DKWDQP.
4. Плясов М. А. Сравнение технологии SLM и литья по выплавляемым моделям для получения заготовок изделий сложной геометрии / М. А. Плясов, И. Н. Зазулин, А. И. Болдырев // Технологии и техника: пути инновационного развития : Сб. научных статей 3-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 17 июня 2025 года. Воронеж: ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 201-206. DOI 10.47581/2025.TM-11.Plyasov-Mixail-01. EDN NDITTW.
5. Оценка свойств изделий аддитивного производства, полученных в рамках ФЦП по SLM-технологии / А. Н. Чуканов, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев [и др.] // Университет XXI века: научное измерение : Материалы научной конференции научно-педагогических работников, аспирантов, магистрантов ТГПУ им. Л. Н. Толстого, Тула, 22 мая 2019 года. Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2019. С. 15-30. EDN KEAXXN.
6. Аддитивные технологии в России и в мире: со-
временное состояние, тренды, перспективы развития и сравнительный анализ. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/additivnye-tehnologii-v-rossii-i-v-mire/#>. (дата обращения 25.12.2025).
7. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. Москва : Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2001. 368 с. ISBN 5-217-03061-5. EDN WWFEPV.
8. Kugaevskii S.S., Gamberg A.E., Pizhenkov E.N. The effectiveness of additive SLM-technologies in the manufacture of cutting tools. *Materials Today: Proceedings*. July 2019. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.055 p.1977–1981.
9. Pizhenkov E.N., Podgorbunskikh V.M., Roshchin V.A. Using of SLM 3D printing technology in the manufacture of high-performance drilling heads. *Polish Science Journal*. 2018;9:63-66.
10. Кугаевский, С. С. Создание канавочного и отрезного инструмента с каналами для охлаждения, изготовленными с помощью аддитивных технологий / С. С. Кугаевский, Е. Н. Пиженков, В. М. Подгорбунских // Транспортное машиностроение. 2022. № 10(10). С. 4-11. DOI 10.30987/2782-5957-2022-10-4-11. EDN KMVCYX.
11. Kugaevskii S.S., Gamberg A.E., Kulpina K.A. Development of Modular Later Cutter with the Application of Additive Technologies. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. April 2021. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_14

12. Баякин А. В. Гидроабразивная обработка титановых образцов ВТ6, полученных методом СЛС / А. В. Баякин, Е. С. Гончаров // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2019. № 7. С. 112-116. DOI 10.26160/2309-8864-2019-7-112-116. EDN XYHHVQ.
13. Гончаров Е. С. Исследование поверхности образцов из титанового сплава, полученных селективным лазерным сплавлением и гидроабразивной полировкой / Е. С. Гончаров, А. В. Баякин, Е. А. Носова // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : сб. докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 23–25 июня 2021 года. Том 1. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. С. 295-296. EDN ITPEWG.
14. Технология DryLyte для сухой электрополировки DLyte. URL: <https://www.dlyte.com>. (дата обращения 23.12.2025).

15. Патент RU2730306C1 Способ сухого электрополирования детали
16. ISO 14649-10. (2003). Industrial automation systems and integration physical device control-data model for computerized numerical controllers-part 10: General process data, ISO TC 184/SC 1, 2003.
17. Кугаевский С. С. Технология механической обработки корпусных деталей на базе распознавания типовых конструктивных форм : Учебн. пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 15.04.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств / С. С. Кугаевский ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. 120 с. ISBN 978-5-7996-3334-9. EDN OTTXSL.

REFERENCES

1. Decard KP. Method and apparatus for manufacturing parts by selective sintering. Patent US4863538A. 5 Sept 1989.
2. GOST R 59036-2020 Additive technologies. Production based on selective laser melt of metal powders. General provisions. Moscow: Standartinform; 2020.
3. Zobov PG, Dektyarev AV, Kazachenko KV, Morozov VN. Study of physical and mechanical properties of samples obtained by SLM technology. Part 1. Strength limit *Izvestiya KSTU*. 2022;65:107-117. DOI 10.46845/1997-3071-2022-65-107-117. EDN DKWDQP.
4. Plyasov MA, Zazulin IN, Boldyrev AI. Comparison of SLM technology and casting for the production of blanks of products with complex geometry. Collection of Scientific Papers of the 3rd International Scientific and Technical Conference, 17 Jun, 2025: Voronezh: University Book; 2025. DOI 10.47581/2025.TM-11.Plyasov-Mixail-01. EDN NDITTW.
5. Chukanov AN, Gvozdev AE, Sergeev AN. Assessment of the properties of additive manufacturing products obtained within the framework of the Federal Target Program for SLM technology. Proceedings of the Scientific Conference of Scientific and Pedagogical Workers, Graduate Students, Undergraduates of TSPU named after Tolstoy LN, May 22, 2019: University of the XXI Century: Scientific Dimension; Tula: Tula State Pedagogical University named after Tolstoy LN; 2019.
6. Additive technologies in Russia and in the world: current state, trends, development prospects and comparative analysis [Internet]. [cited 2025 Dec 25]. Available from: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/additivnye-tehnologii-v-rossii-i-v-mire/#>.
7. Bazrov BM. Modular technology in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie; 2001.
8. Kugaevskii SS, Gamberg AE, Pizhenkov EN. The effectiveness of additive SLM-technologies in the manufacture of cutting tools. *Materials Today: Proceedings*. July 2019. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.055 p.1977–1981.
9. Pizhenkov EN, Podgorbunskikh VM, Roshchin VA. Using of SLM 3D printing technology in the manufacture of high-performance drilling heads. *Polish Science Journal*. 2018;9:63-66.
10. Kugaevsky SS, Pizhenkov EN, Podgorbunskikh VM. Creating a grooving and cutting tool with cooling channels made using additive technologies. *Transport Engineering*. 2022;10(10):4-11. DOI 10.30987/2782-5957-2022-10-4-11. EDN KMVCYX.
11. Kugaevskii SS, Gamberg AE, Kulpina KA. Development of Modular Later Cutter with the Application of Additive Technologies. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). April 2021. doi: 10.1007/978-3-030-54814-8_14
12. Balyakin AV, Goncharov ES. Technological inheritance in the process of selective laser melting. *Computer-aided Design in Mechanical Engineering*. 2019;7:112-116. DOI 10.26160/2309-8864-2019-7-112-116. EDN XYHHVQ.
13. Goncharov ES, Balyakin AV, Nosova EA. Study of the surface of titanium alloy samples obtained by selective laser melting and hydroabrasive polishing. Collection of Reports of the International Scientific and Technical Conference, June 23-25, 2021: Problems and Prospects of Engine Design Development; Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev; 2021.
14. DryLyte technology for dry DLyte electropolishing [Internet]. [cited 2025 Dec 23]. Available from: <https://www.dlyte.com>.

15. Mingazhev AD, Krioni NK. Method of dry electropolishing of parts. Patent RU2730306C1. 21 Aug 2020.
16. ISO 14649-10. (2003). Industrial automation systems and integration physical device control-data model for computerized numerical controllers-part 10: General process data. ISO TC 184/SC 1; 2003.

17. Kugaevsky SS. Technology of mechanical machining of body parts based on recognition of standard structural forms: textbook for university students. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia BN Yeltsin; 2021.

Информация об авторах:

Кугаевский Сергей Семенович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии машиностроения и станки и инструменты» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, тел. +7 9122472762.

Старостин Андрей Павлович – старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения и станки и инструменты» Уральского федераль-

Kugaevsky Sergey Semenovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Machines and Tools at Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, phone: +7 9122472762.

Starostin Andrey Pavlovich – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technologies, Machines and Tools at Ural Federal University

ного университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, тел. +7 9126953409.

Губанов Анатолий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения и станки и инструменты» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, тел. +7 9122003969.

named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, phone: +7 9126953409.

Gubanov Anatoly Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies at Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Machines and Tools, phone: +7 9122003969.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 27.01.2026. 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 23.01.2026; approved after review on 26.01.2026; accepted for publication on 27.01.2026. 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*.