

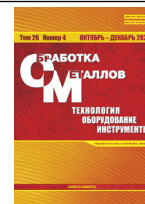
НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Изготовление электродов-инструментов с оптимизированной конфигурацией для копировально-прошивной электроэрозионной обработки методом быстрого прототипирования

Тимур Абляз ^a, Владимир Блохин ^b, Евгений Шлыков ^{c,*}, Карим Муратов ^d, Илья Осинников ^e

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>,  lowrider11-13-11@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>,  warkk98@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>,  Karimur_80@mail.ru;
^e  <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>,  ilyuhaosinnikov@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2024
Рецензирование: 08 октября 2024
Принята к печати: 17 октября 2024
Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Метод быстрого прототипирования
Мастер-модель
Точность
Стереолитография
Жидкий фотополимер
Копировально-прошивная электро-
эрозионная обработка
Отклонение от плоскостности

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Шумкову А.А. за помощь в получении и проектировании мастер-моделей методом быстрого прототипирования.

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты получения сложнопрофильного электрода-инструмента (ЭИ) для копировально-прошивной электроэрозионной обработки по технологии литья. Данный способ заключается в использовании мастер-модели, полученной методом быстрого прототипирования. **Цель работы:** экспериментальное исследование обеспечения точности при изготовлении сложнопрофильных ЭИ методом литья с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки. **Методы исследования.** Мастер-модель ЭИ изготавливали на установке Envisiontec Perfactory XEDE по технологии стереолитографии. В качестве исходного материала использовался фотополимер Si500. Промежуточные и окончательные измерения отклонения поверхностей выполнены на КИМ Contura Carl Zeiss G2. Расчет литниково-питательной системы выполнен в ПО ProCast. Получена отливка из литейной латуни ЛЦ40С. Исследование процесса копировально-прошивной электроэрозионной обработки электродом-инструментом, изготовленным литьем с применением технологии быстрого прототипирования, проводилось с помощью копировально-прошивного станка Smart CNC в среде трансформаторного масла. Рабочие параметры: время включения импульса T_{on} , мкс; напряжение U , В; сила тока I , А. **Результаты и обсуждение.** Разработана методика проектирования и изготовления сложнопрофильного ЭИ с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки. Анализ отклонения формы показал, что при изготовлении мастер-модели методом стереолитографии происходит возникновение погрешностей. Экспериментальное исследование отклонения формы мастер-модели показало вогнутость поверхности в диапазоне от 0,03 до 0,07 мм в зависимости от расположения сторон. Показано, что оптимизированная мастер-модель имеет на 25 % меньше отклонений формы. Для изготовления ЭИ по технологии литья разработана литниково-питательная система (ЛПС). При оценивании пористости установлено, что поры сконцентрированы в ЛПС и прибыли, что положительно влияет на качество отливки. Изготовление электрода-инструмента с помощью технологии литья показало, что все параметры точности и шероховатости находятся в заданном допуске и соответствуют исходным данным чертежа. Проведено экспериментальное исследование процесса электроэрозионной обработки профильного паза ЭИ, который был изготовлен методом литья по выплавляемой модели, полученной с применением технологии быстрого прототипирования. Установлено, что размеры полученного паза удовлетворяют заявленным требованиям.

Для цитирования: Изготовление электродов-инструментов с оптимизированной конфигурацией для копировально-прошивной электроэрозионной обработки методом быстрого прототипирования / Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов, И.В. Осинников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 138–152. – DOI:10.17212/1994-6309-2024-26.4-138-152.

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29,
614990, г. Пермь, Россия
Тел.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

Введение

Для изготовления сложнопрофильных поверхностей применяется механическая обработка. Этот метод имеет ряд технологических и экономических недостатков. Для получения



различных профилей необходимо изготовление различного профильного режущего инструмента, который применим на одном технологическом переходе. В таких условиях производственный цикл изготовления изделия увеличивается из-за частой смены инструмента. При обеспечении необходимого профиля поверхности в основном требуется применение оборудования с возможностью многоосевой обработки, что приводит к увеличению себестоимости изделия [1–3].

Для получения сложнопрофильных поверхностей широко применяется копировально-прошивная электроэрозионная обработка (КПЭЭО). КПЭЭО позволяет получать профиль изделий различной формы с минимальными затратами на инструмент и оснастку. Технологические переходы не требуют применения специальной оснастки в связи с отсутствием сил резания в процессе КПЭЭО [4–7].

Эффективность КПЭЭО зависит от качества электрода-инструмента (ЭИ). В современном производстве сложнопрофильные ЭИ изготавливают механическими способами обработки (токарная, фрезерная обработка). Необходимый контур поверхности зачастую требует ЭИ, который невозможно изготовить трехосевой обработкой, тогда изготавливают ЭИ на пятиосевых обрабатывающих центрах с применением специальной оснастки и режущего инструмента. Эти методы изготовления ЭИ требуют значительных экономических и временных затрат. В рамках массового производства использовать их нецелесообразно. Для опытного производства характерно изготовление одного контрольного образца для внесения последующих изменений в его конструкцию, чтобы минимизировать производственный цикл с целью обеспечения необходимого результата.

Актуальным решением является изготовление сложнопрофильных ЭИ с применением технологии литья по выплавляемым моделям и получением мастер-модели по методу быстрого прототипирования. Технология быстрого прототипирования позволяет изготовить опытный образец ЭИ для оценки соответствия качества и быстрого корректирования модели изделия. Применение аддитивных технологий для получения мастер-модели позволяет изготавливать единичные ЭИ различного профиля в сжатые сроки. Современное оборудование, применяе-

мое в аддитивном производстве, позволяет за один производственный цикл изготовить партию ЭИ с различными профилями, что способствует снижению экономических затрат и уменьшению производственного цикла [8].

Анализ литературы [9–11] показал, что по технологии быстрого прототипирования из жидких фотополимеров возможно изготавливать прототипы изделий с минимальными отклонениями и структурными дефектами. Применение данной технологии позволяет обеспечить нужные параметры повторяемой геометрии сложнопрофильных элементов. В работах [12–16] отмечается эффективность указанной технологии для получения требуемых сложнопрофильных изделий. Однако в настоящее время не в полной мере изучен вопрос точности мастер-моделей, полученных методом стереолитографии.

Актуальной задачей является разработка научно обоснованных подходов к изготовлению сложнопрофильных ЭИ по альтернативным технологиям.

Целью работы является обеспечение точности изготовления сложнопрофильных ЭИ методом литья с применением технологии быстрого прототипирования для копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Задачи:

- 1) разработать методику проектирования и производства сложнопрофильного ЭИ для КПЭЭО с применением технологии быстрого прототипирования для создания мастер-модели;
- 2) проанализировать отклонения формы мастер-модели, изготовленной из жидкого фотополимера, на координатно-измерительной машине (КИМ);
- 3) выполнить коррекцию CAD-модели для уменьшения отклонений формы мастер-модели;
- 4) разработать литниково-питательную систему (ЛПС) и оценить пористость отливки при заливке металлом;
- 5) провести экспериментальное исследование точности процесса КПЭЭО профильного паза электродом-инструментом, изготовленным литьем с получением выплавляемой модели по технологии быстрого прототипирования.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе ЦКП ЦАТ кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский нацио-

нальный исследовательский политехнический университет». В рамках исследования методом литья по выплавляемым моделям изготовлены пять образцов электродов-инструментов для КПЭО глухого профильного паза в изделиях специального назначения; эскиз ЭИ представлен на рис. 1. Электроды-инструменты спроектированы с учетом межэлектродного зазора (МЭЗ), рассчитанного по методике, представленной в работах [17, 18].

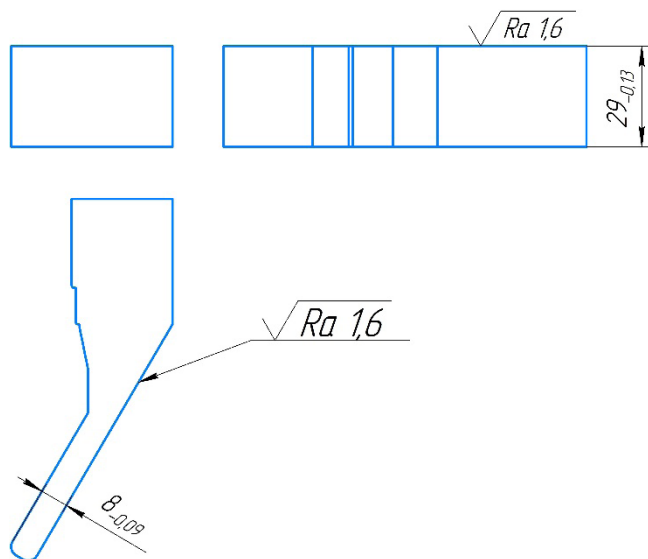


Рис. 1. Эскиз электрода-инструмента
Fig. 1. Sketch of the tool electrode

Проектирование CAD-модели с литниково-питательной системой осуществлялось в системе автоматизированного проектирования SOLIDWORKS.

Обработка CAD-модели для изготовления выплавляемой модели методом стереолитографии (SLA) осуществлена в программном комплексе Materialis Magics. Проектирование поддержек (рис. 2) необходимо для свободного удаления от рабочего места построения. Для минимизации расходов при изготовлении методом SLA выполнено внутреннее заполнение ЭИ ячеистой структурой гранецентрированной кубической решетки Вигнера – Зейтца (рис. 2). Данный тип решетки хорошо держит равноосную нагрузку, что позволяет получить мастер-модель с допустимыми отклонениями формы после дополимеризации материала на воздухе [19–21].

Выращивание ЭИ проведено на установке масочного типа Envisiontec Perfactory XEDE. Параметры режима представлены в табл. 1.

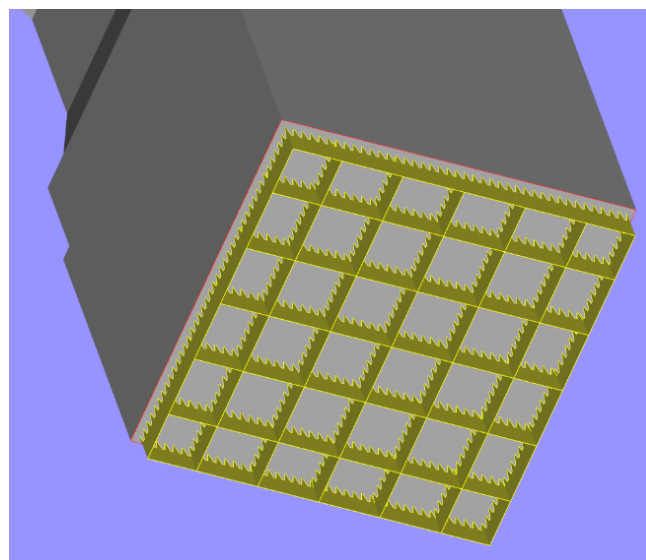


Рис. 2. Поддержки для ЭИ
Fig. 2. Supports for TE

Таблица 1
Table 1

Параметры режима выращивания
выплавляемой модели методом SLA
Parameters of the build mode of the investment
pattern by SLA method

Параметр	Значение
Толщина слоя, мкм	50
Высота поддержек, мм	3
Толщина поддержек, мкм	280
Время засветки сечения модели и поддержек, мс	8500

Для изготовления моделей использовался фотополимерный материал на основе крилатов – Si500, относящийся к классу сшитых полимеров. Характеристики материала при нормальных условиях представлены в табл. 2.

CAD-модель опытного ЭИ с литниково-питательной системой (ЛПС) представлена на рис. 3.

Для расчета ЛПС использован программный комплекс ProCast. При проектировании ЛПС необходимо учесть следующее:

- 1) одинаковые условия для каждого участка отливки при литье;
- 2) для толстостенных участков наличие дополнительного депо жидкого металла с целью устранения дефектов (усадочной раковины, рыхлости и пористости в металле);
- 3) направление горячего металла от толстостенных участков к тонкостенным.

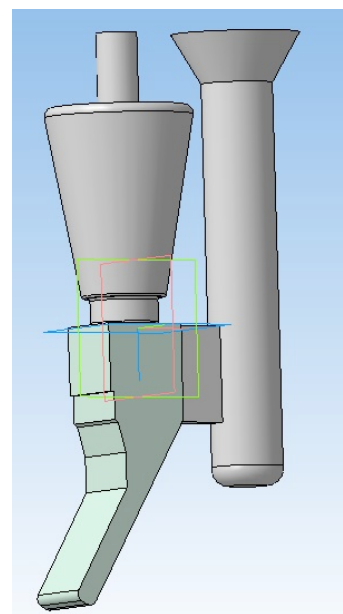
Таблица 2

Table 2

**Характеристики фотополимерного материала Si500
при нормальных условиях**
**Characteristics of Si500 photopolymer material under normal
conditions**

Параметр	Значение
Модуль упругости на растяжение E , МПа	2,68
Предел прочности на разрыв σ , МПа	78,1
Относительная деформация при разрыве ε , %	4,39
Предел прочности на изгиб σ , МПа	65
Температура стеклования T , °С	61
Плотность в жидком состоянии ρ , г/см ³	1,1
Плотность в твердом состоянии ρ , г/см ³	1,2

Рис. 3. Модель ЭИ с литниково-питательной системой
Fig. 3. TE model with sprue-feeding system



После изготовления мастер-модели для каждого ЭИ был сформирован модельный комплект ЛПС и литевая модель из литейного воска с помощью силиконовой формы.

Полученные восковые модели электродов были соединены с ЛПС. Восковые ЭИ с ЛПС затем устанавливались в опоку и заливались гипсом. Прокалка формы осуществлялась до температуры 750 °С. После остывания формы до температуры 450 °С проводилась прокалка моделей в индукционной тигельной печи, затем отливки извлекались из формы. Используемый материал изделия – литейная латунь ЛЦ40С.

Измерения параметров мастер-моделей, а также восковых моделей и последующих отли-

вок производились на трехкоординатной КИМ Contura Carl Zeiss G2. Рассматривались отклонения формы и величины возможных коррекций.

Исследуемые образцы устанавливались перпендикулярно плоскости стола, и с помощью активной сканирующей головки машины измерялись перемещения относительно сечения вертикальных и горизонтальных поверхностей прототипа. На каждом полученном ЭИ измерялось четыре поверхности. Измеряемые поверхности и стратегия измерения представлены на рис. 4.

Стратегия измерения представляет собой полилинию. Измерение производилось таким образом, чтобы максимальным образом задействовать всю поверхность. В результате собиралась

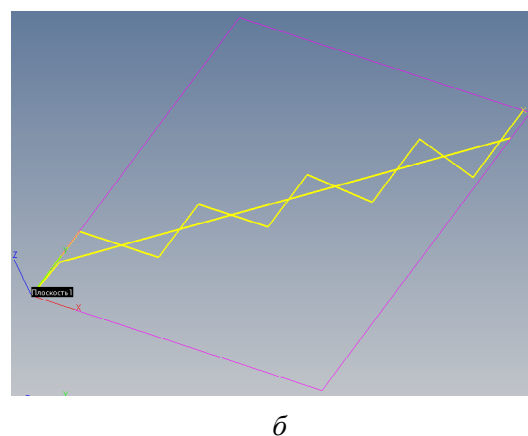
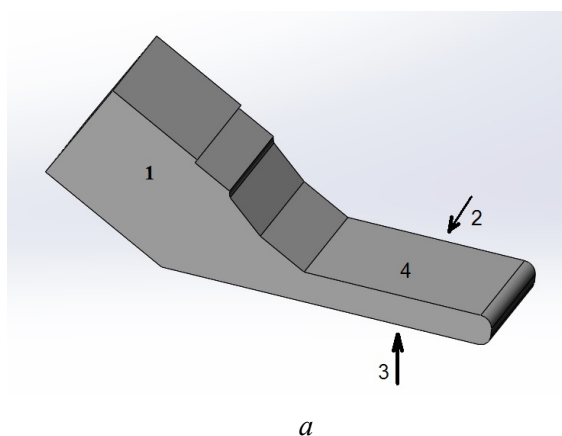


Рис. 4. Измеряемые поверхности электродов-инструментов (а) и траектория измерения ЭИ (б)

Fig. 4. Measured surfaces of the tool electrodes (a) and the trajectory of measuring the TE (b)

статистика из 200 точек в трех координатах – X , Y , Z .

Для тестирования полученных металлических ЭИ проведен эксперимент по КПЭЭО стали 45. Обработка выполнялась на КПЭЭО-станке Smart CNC в среде индустриального масла марки И-20а ГОСТ 982–80.

Режим КПЭЭО представлен в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Режим обработки на копировально-прошивном электроэрозионном станке

Machining mode on the copy-piercing EDM machine

Параметры	Значения
	max
I , А	8
U , В	50
T_{on} , мкс	100

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлена ячеистая структура внутреннего заполнения выплавляемых моделей.

С помощью программного комплекса Calypso показаны средние отклонения от плоскостности на поверхностях 1–4 (рис. 6) всех пяти образцов ЭИ. Для моделирования линии погрешности отклонения от плоскостности применен метод аппроксимации.

Для визуализации сделана выборка данных в количестве двенадцати точек для каждой поверхности. Точки выбирались на линии измерения, где она ломается.

Данные выборки для каждой поверхности представлены в табл. 4.

Расположение указанных точек представлено на рис. 7. Через эти точки проведена линия аппроксимации, обозначающая средний фактический размер мастер-моделей.

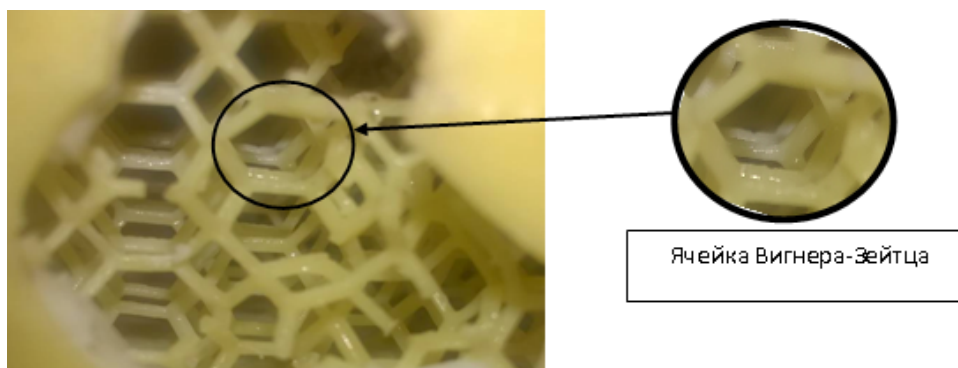


Рис. 5. Заполнение ячейками структурой гранецентрированной кубической решетки Вигнера – Зейтца

Fig. 5. Cell filling with the structure of a face-centered Wigner-Seitz cubic lattice

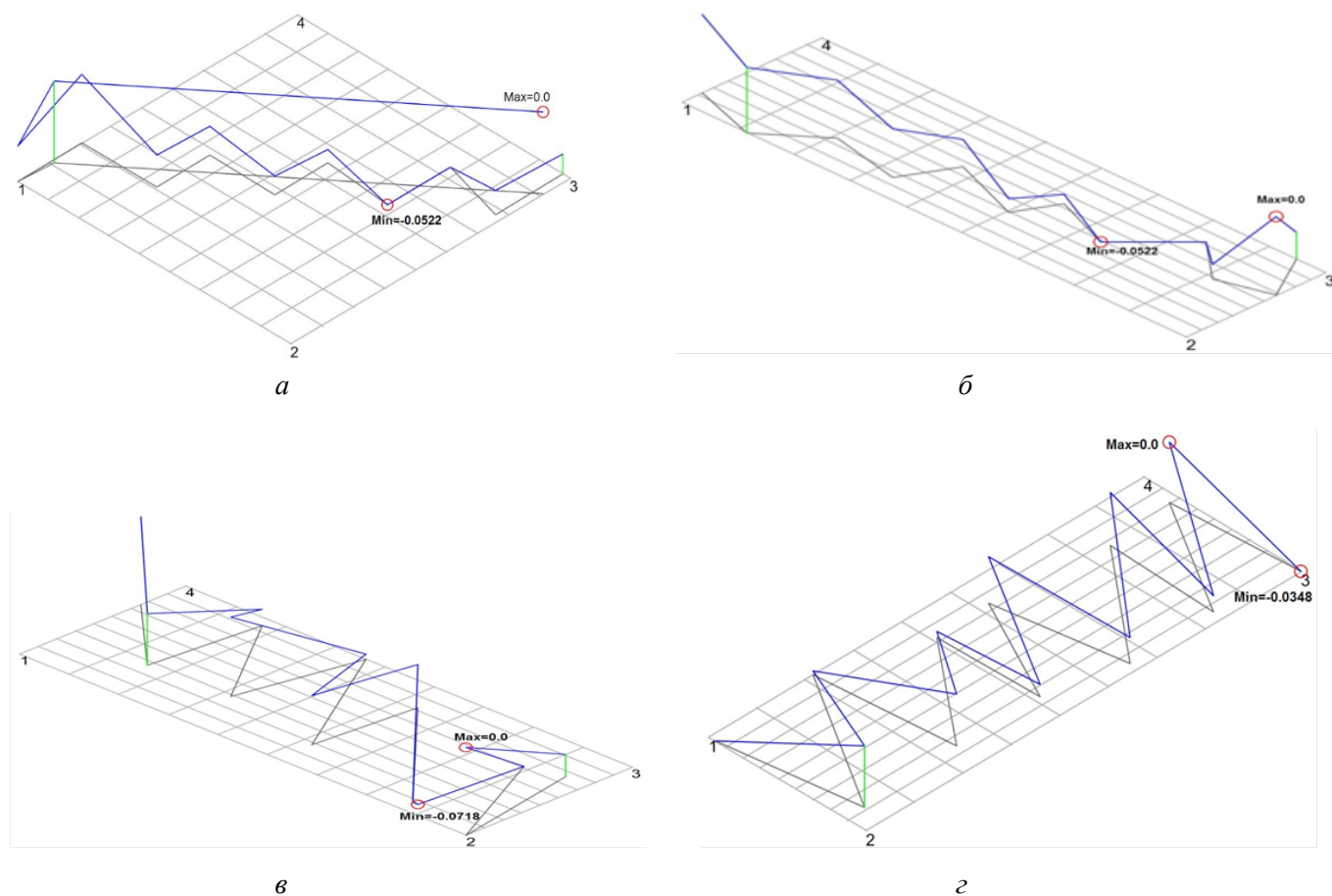


Рис. 6. Траектория измерения со значением среднего отклонения от плоскости по поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 6. Measurement trajectory with the value of average flatness deviation along the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Таблица 4

Table 4

Выборка точек с поверхностями 1–4
Sampling points from surface 1–4

Поверхность	Точка	Координаты точек на поверхности		
		X	Y	Z
1	1	264,2598	–513,1588	–477,3192
	2	264,2567	–518,4794	–477,3239
	3	259,5628	–517,3288	–477,2899
	4	259,5518	–521,9996	–477,2986
	5	255,7281	–520,0690	–477,2837
	6	255,7163	–525,1954	–477,2634
	7	250,7091	–523,9416	–477,2420
	8	250,6929	–529,7544	–477,2196
	9	244,3490	–528,7445	–477,1874
	10	244,3337	–534,6175	–477,1713
	11	237,7511	–536,6551	–477,1053
	12	267,6178	–513,1320	–477,3031

Поверхность	Точка	Координаты точек на поверхности		
		X	Y	Z
2	1	266,8592	–536,3874	–477,330
	2	266,8582	–539,1545	–477,2888
	3	262,9658	–539,3621	–477,3156
	4	258,9135	–542,0315	–477,2840
	5	254,9696	–539,4720	–477,2727
	6	250,3227	–541,9105	–477,2169
	7	245,5120	–543,7889	–477,1600
	8	237,8660	–544,3309	–477,1061
	9	230,9308	–544,0254	–477,0633
	10	227,6826	–544,4671	–477,0632
	11	234,7477	–544,6761	–477,0746
	12	236,7347	–543,6066	–477,0987
3	1	268,8741	–517,3798	–479,1381
	2	268,7148	–517,5176	–488,4096
	3	266,4900	–519,2954	–481,6966
	4	266,5182	–519,2315	–489,1544
	5	262,5285	–522,4333	–481,4241
	6	262,0909	–522,7745	–489,2207
	7	259,3579	–524,9424	–484,7519
	8	258,9885	–525,2224	–489,5129
	9	252,9817	–529,9868	–481,4362
	10	254,9560	–528,4201	–48,5392
	11	249,1152	–533,0230	–482,6272
	12	242,8281	–538,0595	–489,9179
4	1	264,0658	–510,4802	–481,0604
	2	263,1891	–511,1592	–490,5512
	3	260,0128	–513,6948	–481,1179
	4	258,2810	–515,0385	–488,8638
	5	253,7875	–518,5229	–482,0872
	6	253,1226	–519,1440	–490,6190
	7	249,1201	–522,2798	–481,9732
	8	249,2972	–522,1993	–491,0848
	9	245,1400	–525,4132	–481,5228
	10	242,5907	–527,4970	–491,0312
	11	237,5517	–531,5133	–490,5426
	12	236,7127	–532,0627	–481,5488

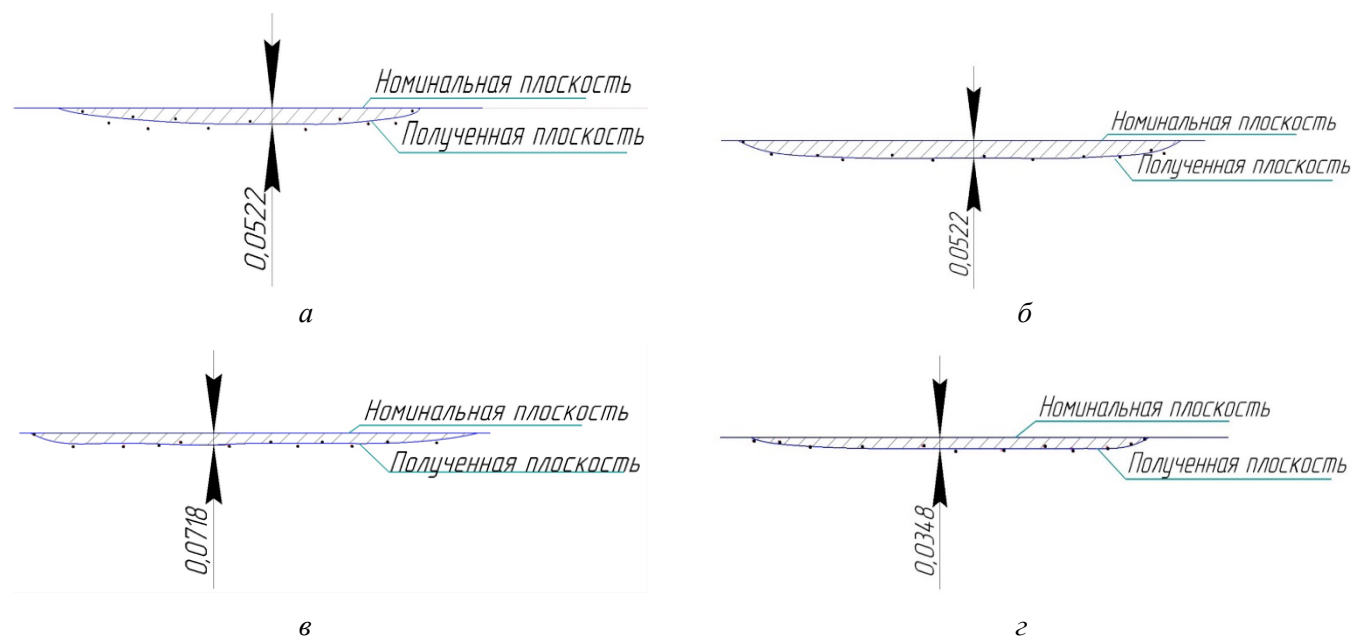


Рис. 7. Среднее отклонение от плоскостности на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 7. Average flatness deviation on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

В табл. 5 представлены отклонения образцов от плоскостности всех измеряемых поверхностей и усредненное значение. Необходимо учитывать эти отклонения и вносить их в исходную CAD-модель для создания новой геометрии детали.

Для устранения получившегося отклонения рассчитан новый размер, компенсирующий отклонение формы и равный среднему размеру отклонения от плоскостности. На рис. 8 представлены изменения геометрии формы детали на поверхностях 1–4.

Рассчитанные номинальные размеры внесены в CAD-модель (рис. 9), и создана новая геометрия поверхностей 1–4.

После внесения изменений повторно выращены мастер-модели в исходном режиме. Мастер-модели выращивались вертикально. Поддержки располагаются на нерабочей части электрода. Проведены повторные измерения отклонений от плоскостности всех поверхностей мастер-моделей. В табл. 6 представлены повторные измерения моделей ЭИ.

Анализ полученных данных показывает уменьшение среднего отклонения выращивания мастер-моделей на 25 % первой, второй и третьей поверхности. Отклонение от плоскостности поверхности 4 снизилось на 11,5 % в связи с меньшей площадью поверхности и меньшим углом ее расположения по отношению к столу.

Таблица 5

Table 5

Отклонения от плоскостности (мм)
Flatness deviation (mm)

№ Образца	Поверхности			
	1	2	3	4
1	0,0517	0,0512	0,0715	0,0346
2	0,0528	0,0519	0,0717	0,0341
3	0,0523	0,0519	0,0720	0,0352
4	0,0521	0,0529	0,0710	0,0351
5	0,0521	0,0530	0,0724	0,0351
Среднее значение	0,0522	0,0522	0,0718	0,0348

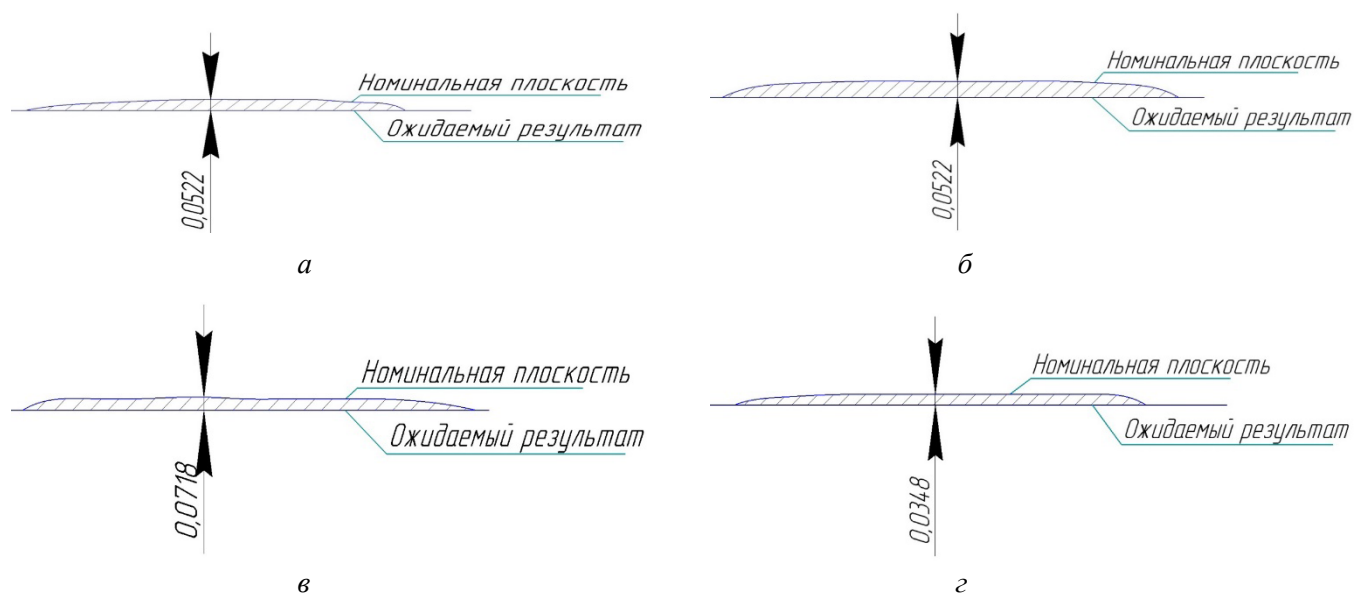


Рис. 8. Предполагаемая геометрия формы на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 8. Assumed geometry of the shape on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

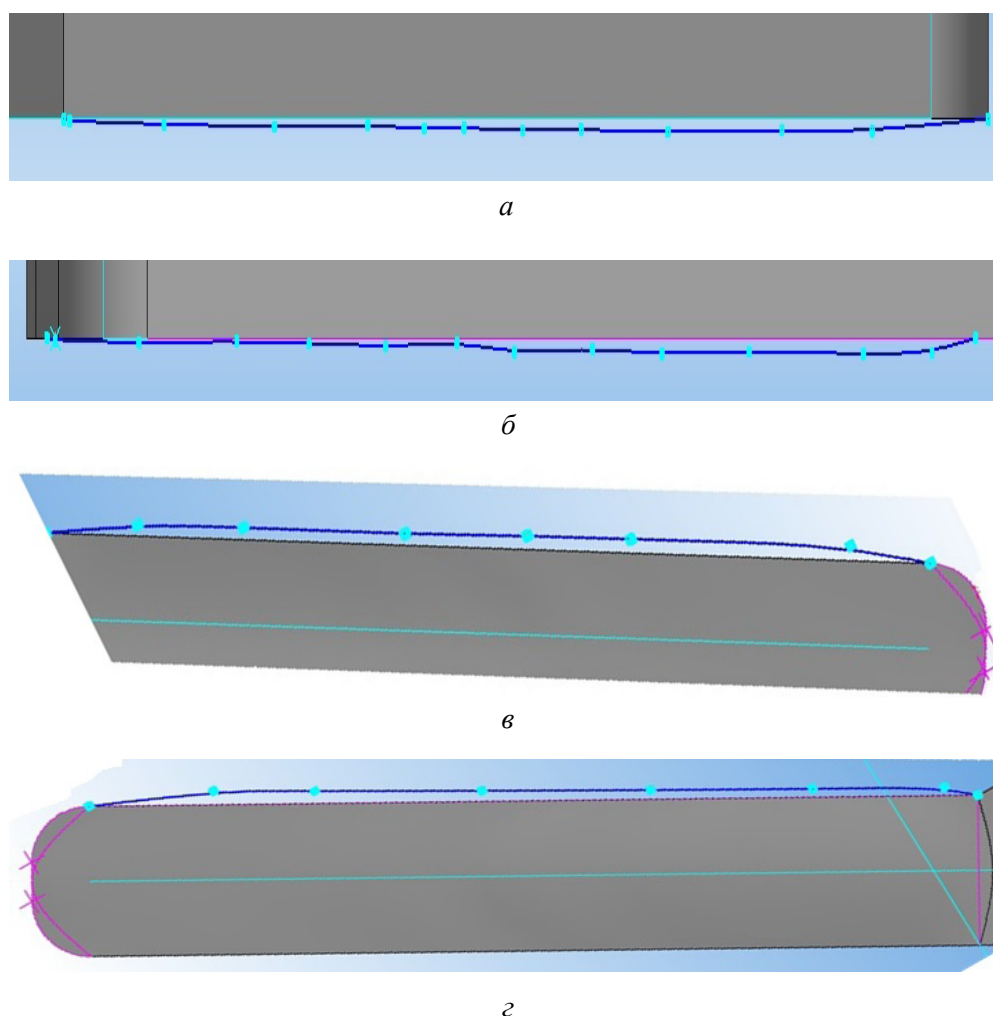


Рис. 9. Измененная геометрия формы с учетом выполненных расчетов на поверхности 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Fig. 9. Modified geometry of the mold taking into account the performed calculations on the surface 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

Измерения моделей ЭИ после повторного выращивания

Measurements of TE models after re-build

№ ЭИ	Поверхности			
	1	2	3	4
1	0,0388	0,0400	0,0539	0,0301
2	0,0394	0,0382	0,0549	0,0305
3	0,0394	0,0395	0,0538	0,0309
4	0,0397	0,0399	0,0530	0,0311
5	0,0387	0,0385	0,0538	0,0314
Среднее значение	0,0392	0,0392	0,0539	0,0308

При изготовлении отливки через щелевидный питатель форма заполняется расплавом. При поступлении расплава в тонкие места отливки происходит выравнивание скорости охлаждения, благодаря чему осуществляется удаление газа из отливки. Обеспечивается отсутствие усадочных пор в теле отливки ЭИ.

Распределение пор в прибыли и литниковой системе, рассчитанное в ПО ProCAST, представлено на рис. 10. На всю модель приходится примерно 13 % пористости. Установлено, что дефект не затрагивает ответственную часть отливки детали, это повышает качество поверхности и плотность металла. Программа производит

расчеты в идеальных условиях. Фактические результаты могут отличаться от произведенных расчетов.

На основе проведенного расчета доказана корректность спроектированной отливки и ЛПС.

На рис. 11, а представлена мастер-модель после корректировки; восковая модель представлена на рис. 11, б. На рис. 11, в показана металлическая отливка с ЛПС, которая отделяется от детали отрезным резцом. Металлический ЭИ с закреплением и ответный профиль паза, обработанный методом копировально-прошивной электроэрозионной обработки полученным металлическим ЭИ, представлены на рис. 11, г–е.

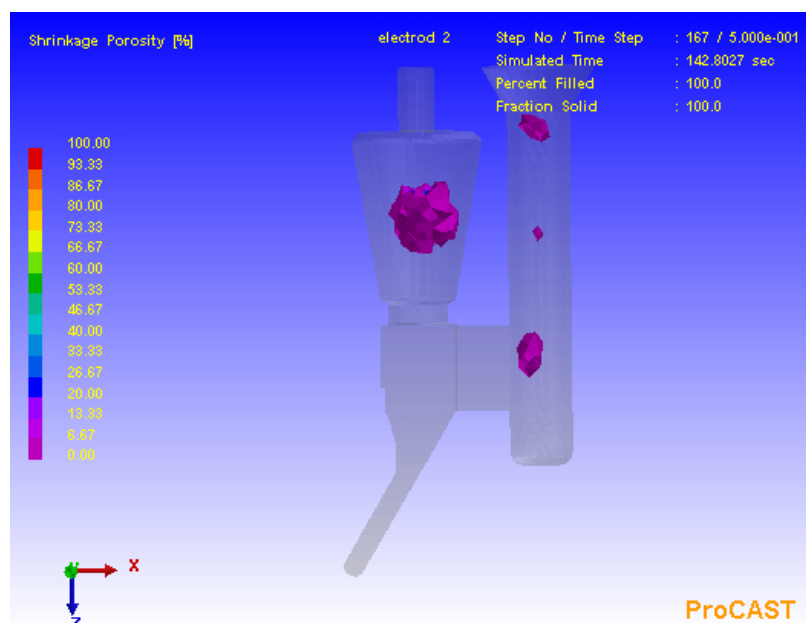


Рис. 10. Распределение пористости в теле отливки детали

Fig. 10. Porosity distribution in the body of the part casting



Рис. 11. Технологический процесс изготовления ЭИ:

a – мастер-модель; *б* – восковая модель; *в* – металлическая отливка с ЛПС; *г* – ЭИ; *д* – ЭИ с закреплением; *е* – ответный профиль поверхности паза после КПЭЭО

Fig. 11. Technological process of TE manufacturing:

a – master model; *б* – wax model; *в* – metal casting with SFS; *г* – TE; *д* – TE with fixing; *е* – mating profile of groove surface after CPEDM

В ходе эксперимента получены мастер-модель, восковая модель и металлическая отливка. В табл. 7 собраны заданные размеры и шероховатость CAD-модели, а также данные, полученные измерением металлической отливки.

Полученные размеры и шероховатость металлической отливки удовлетворяют заданным параметрам.

По результатам экспериментального исследования применения ЭИ, изготовленного по технологии литья с применением метода быстрого прототипирования для получения ма-

стер-модели, качество поверхности профильного паза удовлетворяет требованиям чертежа. Учетный межэлектродный зазор (МЭЗ) позволяет обеспечить размеры в пределах 12-го качества, что соответствует требованиям опытного производства.

Выводы

Разработана методика проектирования и изготовления сложнопровильного ЭИ с применением технологии быстрого прототипирования

Сравнительная таблица результатов измерения
Comparative table of measurement results

Объект	Размеры (мм)		Шероховатость (мкм)	
	Стороны 1–2	Стороны 3–4	Стороны 1–2	Стороны 3–4
CAD-модель	29 _{-0,13}	8 _{-0,09}	Ra 1,6	Ra 1,6
Металлическая отливка	28,90	7,98	Ra 1,6	Ra 1,6

для копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Анализ отклонения формы показал, что при изготовлении мастер-модели методом стереолитографии происходит возникновение погрешностей.

Экспериментальное исследование отклонения формы мастер-модели показало вогнутость поверхности в диапазоне от 0,03 до 0,07 мм в зависимости от расположения сторон.

Показано, что оптимизированная мастер-модель имеет на 25 % меньше отклонений формы.

Для изготовления ЭИ по технологии литья разработана литниково-питательная система. При оценивании пористости установлено, что поры сконцентрированы в ЛПС и прибыли, что положительно влияет на качество отливки.

Изготовление электрода-инструмента с помощью технологии литья показало, что все параметры точности и шероховатости ЭИ находятся в заданном допуске и соответствуют исходным данным чертежа.

Проведено экспериментальное исследование процесса электроэрозионной обработки профильного паза электродом-инструментом, который был изготовлен методом литья по выплавляемой модели, полученной с применением технологии быстрого прототипирования. Установлено, что размеры полученного паза удовлетворяют заявленным требованиям.

Список литературы

1. Predictive model of milling force for complex profile milling / X. Su, G. Wang, J. Yu, F. Jiang, J. Li, Y. Rong // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 87. – P. 1653–1662. – DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.

2. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling / D. Sommer, A. Safi, C. Esen, R. Hellmann // *Proceedings of SPIE*. – 2024. – Vol. 12876: Laser 3D Manufacturing XI. – DOI: 10.1117/12.3000972.

3. Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces / M.R. Gimadeev, A.V. Nikitenko, V.O. Berkun // *Advanced Engineering Research*. – 2023. – Vol. 23 (3). – P. 231–240. – DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.

4. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (13). – P. 1287–1300. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.

5. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro electrical discharge machining of micro-hole // *Advanced Science Engineering and Medicine*. – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 1335–1339. – DOI: 10.1166/ase.2020.2586.

6. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 13–26. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.

7. Rathod R., Kamble D., Ambhore N. Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2022. – Vol. 69 (1). – P. 1–19. – DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.

8. Melchels F.P.W., Feijen J., Grijpma D.W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering // *Biomaterials*. – 2010. – Vol. 31. – P. 6121–6130. – DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

9. Continuous liquid interface production of 3D objects / J.R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin, R. Januszewicz, A.R. Johnson, D. Kelly, K. Chen, R. Pinschmidt, J.P. Rolland, A. Ermoshkin, E.T. Samulski, J.M. DeSimone // *Science*. – 2015. – Vol. 6228 (347). – P. 1349–1352. – DOI: 10.1126/science.aaa2397.

10. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures / M. Shusteff, A.E.M. Browar, B.E. Kelly, J. Henriksson, T.H. Weisgraber, R.M. Panas, N.X. Fang, C.M. Spadaccini // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3 (12). – P. 1–7. – DOI: 10.1126/sciadv.aao5496.
11. Layerless fabrication with continuous liquid interface production / R. Januszewicz, J.R. Tumbleston, A.L. Quintanilla, S.J. Mecham, J.M. DeSimone // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113 (42). – P. 1–6. – DOI: 10.1073/pnas.1605271113.
12. Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control / D. Han, C. Yang, N.X. Fang, H. Lee // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27 (17). – P. 606–615. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.031.
13. Jigang H., Qin Q., Jie W. A review of stereolithography: processes and systems // *Processes*. – 2020. – Vol. 8 (9). – P. 1–16. – DOI: 10.3390/pr8091138.
14. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing / S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt // *Chemical Reviews*. – 2017. – Vol. 117 (15). – DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
15. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities // *Dental Materials*. – 2016. – Vol. 32 (1). – P. 54–64. – DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018.
16. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui // *Composites, Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 442–458. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
17. Golabczak A., Konstantynowicz A., Golabczak M. Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations // *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures*. – Cham: Springer, 2013. – P. 169–184. – DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process / A. Kumar, A. Mandal, A.R. Dixit, D.K. Mandal // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 4 (1). – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. Using rapid prototyping technologies for creating implants with cellular structure / P.N. Kilina, V.P. Vasilyuk, E.A. Morozov, A.M. Khanov, L.D. Sirotenko // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. – 2015. – Vol. 12 (2). – P. 1691–1698. – DOI: 10.13005/bbra/1832.
20. Real-space wigner-seitz cells imaging of potassium on graphite via elastic atomic manipulation / F. Yin, P. Koskinen, S. Kulju, J. Akola, R.E. Palmer // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5 (1). – P. 1–5. – DOI: 10.1038/srep08276.
21. Cho Y., Lee I., Cho D.W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography // *Microsystem Technologies*. – 2005. – Vol. 11 (2). – P. 158–167. – DOI: 10.1007/s00542-004-0468-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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



Manufacturing of tool electrodes with optimized configuration for copy-piercing electrical discharge machining by rapid prototyping method

Timur Ablyaz ^a, Vladimir Blokhin ^b, Evgeniy Shlykov ^{c, *}, Karim Muratov ^d, Ilya Osinnikov ^e

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>,  lowrider11-13-11@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>,  warkk98@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>,  Karimur_80@mail.ru;
^e  <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>,  ilyuhaosinnikov@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2024

Revised: 08 October 2024

Accepted: 17 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Rapid prototyping method

Master model

Precision

Stereolithography

Liquid photopolymer

Copy-and-pierce electrical discharge machining

Flatness deviation

Funding

The research was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Associate Professor of the department. ITM Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education "Perm National Research Polytechnic University" Shumkov A.A. for assistance in obtaining and designing master models by the rapid prototyping method.

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of obtaining a complex-profile tool electrode (*TE*) for copy-and-pierce electrical discharge machining by casting technology. This method consists in using a master model by rapid prototyping method. **The purpose of the work:** experimental study of accuracy assurance in manufacturing of complex-profile *TE* by casting with the use of rapid prototyping technology for copy-piercing electrical discharge machining. **Research Methods.** The master model of *TE* was produced on the *Envisiontec Perfactory XEDE* machine using stereolithography technology. *Si500* photopolymer was used as a starting material. Intermediate and final surface deviation measurements were performed on a *Contura Carl Zeiss G2 CMM*. Calculation of the gutter and feed system was performed in *ProCast* software. A casting was obtained from casting brass *LC40S (Cu-40 Zn-Pb)*. The study of the process of copy-piercing electrical discharge machining of *TE* made by casting with the use of rapid prototyping technology was carried out with the help of *Smart CNC* copy-piercing machine in the environment of transformer oil. Operating parameters: pulse turn-on time (T_{on} , μ s), voltage (U , V), current (I , A). **Results and discussion.** The methodology of design and manufacturing of complex-profile *TE* with application of rapid prototyping technology for copy-piercing electrical discharge machining is developed. The analysis of shape deviation shows that errors occur during the manufacturing of the master model by stereolithography. An experimental study of the shape deviation of the master model shows surface concavity in the range of 0.03 to 0.07 mm depending on the arrangement of the sides. It is shown that the optimized master model has 25 % less shape deviation. A sprue-feeding system (*SFS*) is developed for the fabrication of *TE* by casting technology. When porosity is evaluated, it is found that pores are concentrated in the *SFS* and riser, which positively affects the quality of the casting. Manufacturing of the tool electrode with the help of casting technology showed that all accuracy and roughness parameters are within the specified tolerance and correspond to the initial drawing data. Experimental study of the process of electroerosion machining of the profile groove of the *TE* manufactured by casting on the investment casting model obtained with the use of rapid prototyping technology is carried out. It is established that the dimensions of the obtained groove meet the stated requirements.

For citation: Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Shlykov E.S., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Manufacturing of tool electrodes with optimized configuration for copy-piercing electrical discharge machining by rapid prototyping method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 138–152. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-138-152. (In Russian).

References

1. Su X., Wang G., Yu J., Jiang F., Li J., Rong Y. Predictive model of milling force for complex profile milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 1653–1662. DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.

* Corresponding author

Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University,
 29 Komsomolsky prospekt,
 614990, Perm, Russian Federation
 Tel.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

2. Sommer D., Safi A., Esen C., Hellmann R. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling. *Proceedings of SPIE*, 2024, vol. 12876. *Laser 3D Manufacturing XI*. DOI: 10.1117/12.3000972.
3. Gimadeev M.R., Nikitenko A.V., Berkun V.O. Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces. *Advanced Engineering Research*, 2023, vol. 23 (3), pp. 231–240. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.
4. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43 (13), pp. 1287–1300. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
5. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro electrical discharge machining of micro-hole. *Advanced Science Engineering and Medicine*, 2020, vol. 12 (11), pp. 1335–1339. DOI: 10.1166/ase.2020.2586.
6. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6 (2), pp. 13–26. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.
7. Rathod R., Kamble D., Ambhore N. Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, vol. 69 (1), pp. 1–19. DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.
8. Melchels F.P.W., Feijen J., Grijpma D.W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 2010, vol. 31, pp. 6121–6130. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
9. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N., Janusziewicz R., Johnson A.R., Kelly D., Chen K., Pinschmidt R., Rolland J.P., Ermoshkin A., Samulski E.T., DeSimone J.M. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2015, vol. 6228 (347), pp. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
10. Shusteff M., Browar A.E.M., Kelly B.E., Henriksson J., Weisgraber T.H., Panas R.M., Fang N.X., Spadaccini C.M. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures. *Science Advances*, 2017, vol. 3 (12), pp. 1–7. DOI: 10.1126/sciadv.aao5496.
11. Janusziewicz R., Tumbleston J.R., Quintanilla A.L., Mechama S.J., DeSimone J.M. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113 (42), pp. 1–6. DOI: 10.1073/pnas.1605271113.
12. Han D., Yang C., Fang N.X., Lee H. Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27 (17), pp. 606–615. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.031.
13. Jigang H., Qin Q., Jie W. A review of stereolithography: processes and systems. *Processes*, 2020, vol. 8 (9), pp. 1–16. DOI: 10.3390/pr8091138.
14. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, 2017, vol. 117 (15). DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
15. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 2016, vol. 32 (1), pp. 54–64. DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018.
16. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Composites, Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 442–458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
17. Golabczak A., Konstantynowicz A., Golabczak M. Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations. *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures*. Cham, Springer, 2013, pp. 169–184. DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Kumar A., Mandal A., Dixit A.R., Mandal D.K. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 4 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. Kilina P.N., Vasilyuk V.P., Morozov E.A., Khanov A.M., Sirotenko L.D. Using rapid prototyping technologies for creating implants with cellular structure. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015, vol. 12 (2), pp. 1691–1698. DOI: 10.13005/bbra/1832.
20. Yin F., Koskinen P., Kulju S., Akola J., Palmer R.E. Real-space wigner-seitz cells imaging of potassium on graphite via elastic atomic manipulation. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5 (1), pp. 1–5. DOI: 10.1038/srep08276.
21. Cho Y., Lee I., Cho D.W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography. *Microsystem Technologies*, 2005, vol. 11 (2), pp. 158–167. DOI: 10.1007/s00542-004-0468-2.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).