

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-54-60

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF REMOVAL OF SUPPORTING STRUCTURES BY WIRE-CUT EDM

Д. В. Гаранин, А. А. Федоров, В. Г. Чуранкин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. V. Garanin, A. A. Fedorov, V. G. Churankin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований по удалению поддерживающих структур, полученных в процессе аддитивного производства методом селективного лазерного плавления. Удаление поддерживающих структур осуществлялось на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L. Главной целью исследования являлось снижение обрывов проволочного электрода-инструмента при удалении поддержек. Методом оптической микроскопии показано, что решетчатое строение поддерживающих структур имеет различные дефекты и варьирующуюся толщину, что является одной из причин выбора неоптимальных режимов резания. По результатам исследования предлагается алгоритм выбора оптимальных режимов резания.

Ключевые слова: поддерживающие структуры, удаление поддерживающих структур, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, аддитивные технологии, аддитивное производство

Abstract. This paper presents the results of studies on the removal of supporting structures obtained during additive production by selective laser melting. Removal of supporting structures was carried out on the Sodick VZ 300L wire-cut electric erosion machine. The main purpose of the study was to reduce the breakage of the wire electrode-tool when removing supports. By optical microscopy, it is shown that the lattice structure of the supporting structures has various defects and varying thickness, which is one of the reasons for choosing suboptimal cutting modes. Based on the results of the study, an algorithm for choosing optimal cutting modes is proposed.

Keyword: remove support, wire electrical discharge machining, additive technology.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии получают распространение в самых различных областях производства – от медицинских имплантатов до деталей, являющихся компонентами авиационных двигателей [1-3]. Аддитивные технологии представляют значительный интерес благодаря тому, что позволяют создавать изделия, которые классическими субтрактивными методами получить невозможно или крайне сложно. Одной из особенностей аддитивных технологий является необходимость создания поддерживающих структур (т.н. поддержек) в процессе создания изделия, которые затем необходимо удалять. При создании поддержек необходимо рассматривать удобство и возможность их последующего удаления, поскольку в ряде случаев они генерируются в крайне труднодоступных местах. Помимо удобства, так же необходимо учитывать положение ответственных поверхностей относительно генерируемых поддержек. Удаление поддержек производится различными методами: механическим, слесарным, ЭХО, ЭЭО и т.д. [4].

Механическое удаление поддержек применимо, когда полученное изделие является полуфабрикатом и дальнейшая механическая обработка детали и поддержек не приведет к возникновению дефектов в готовом изделии. Удаление поддержек слесарным методом в значительной степени зависит от человеческого фактора.

Кроме того, может вызывать появление микротрещин и вырывание части поверхностного слоя деталей вместе с поддержкой.

При удалении поддержек на тонкостенных и маложестких деталях возникающие силы резания при обработке могут деформировать деталь. Поэтому возникает необходимость разработки и совершенствования технологий, в основе которых лежат электрофизические или электрохимические методы и отсутствуют силы резания. Одним из эффективных бездеформационных способов обработки является проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПЭЭО). При использовании ПЭЭО силы резания отсутствуют, что приводит к отсутствию деформации детали при обработке и сохранению исходных геометрических параметров [5]. Однако при удалении поддержек методом ПЭЭО возникает проблема обрывов проволочного электрода инструмента и увеличению времени обработки. Данная проблема требует научного подхода при ее решении, поскольку прямая корректировка режимов обработки не приводит к снижению количества обрывов проволоки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для понимания процесса ПЭЭО удаления поддержек, необходимо установить причины выхода маркера стабильности обработки в режим HARD и возникновения обрывов проволочного электрода инструмента.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

3. Печать образцов методом селективного лазерного плавления

В данном исследовании проводилось удаление поддержек с образцов, напечатанных из порошка, ПР-12X18Н10Т. Порошок соответствует ТУ 14-123-261-2020. Размеры частиц порошка от 20 до 63 мкм. Образцы были напечатаны на аддитивной установке SLM 280HL. Размеры образцов 10×10×30 мм, количество образцов 3 штуки. Напечатанные образцы имели различные параметрами поддержек: сетка поддержки 0.7×0.7 мм, 1.2×1.2 мм и 1.5×1.5 мм. Высота напечатанных поддержек - 5 мм. На рисунке 1а изображены модели напечатанных образцов с поддержками в программном обеспечении для подготовки печати Materialise Magics 24.1, а на рисунке 1б – напечатанные образцы. Для печати были выбраны следующие режимы: мощность лазерного излучения – 295 Вт, скорость сканирования лазерного луча – 705 мм/с, расстояние между треками – 130 мкм, высота порошкового слоя – 30 мкм, печать производилось в атмосфере азота с постоянным подогревом платформы до 90°C. Отжиг образцов производился по при температуре 700°C в течении 2-х часов.

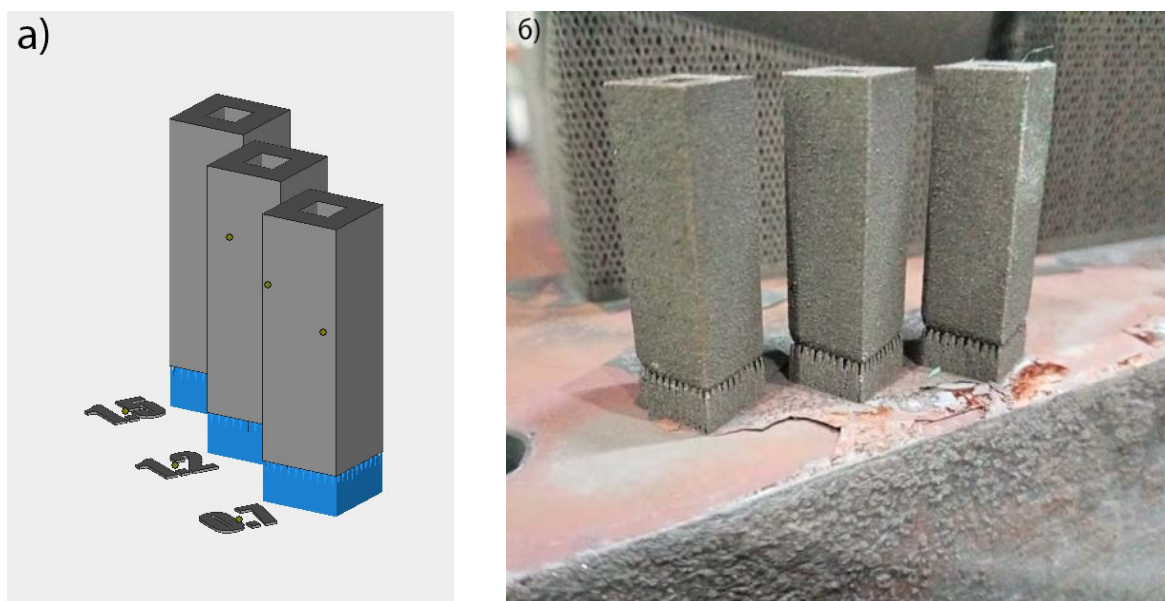


Рис. 1. Внешний вид образцов:

- а) подготовленных для печати в ПО Materialise Magics;
- б) Напечатанные образцы из стали 12X18Н10Т после стабилизирующего отжига

4. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка напечатанных образцов

Удаление поддержек производилось на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L. В качестве электрод-инструмента использовалась твердая латунная проволока (Cu-60%; Zn-40%) диаметром 0.2 мм. Обработка производилась в среде деионизированной воды, в режиме “Close” со следующими параметрами: ON 4.5 мкс; OFF 7.5 мкс; IP 2215; MAO 270; SV +055.0; V8.0; SF 0085; WK 020; WT120; WS 130; WP 050. Удаление поддержки производилось за 1 рабочий проход, в процессе обработки маркер стабильности обработки постоянно находился в зоне HARD, что говорит о нестабильной обработке и повышенной вероятности обрыва проволоки. Данная проблема потребовала дополнительного исследования структуры поддержек на микроуровне для понимания процесса их формирования и последующего удаления с оптимальными режимами.

Для проведения исследования из отрезанных фрагментов поддерживающих структур были изготовлены поперечные микрошлифы (рис. 2).

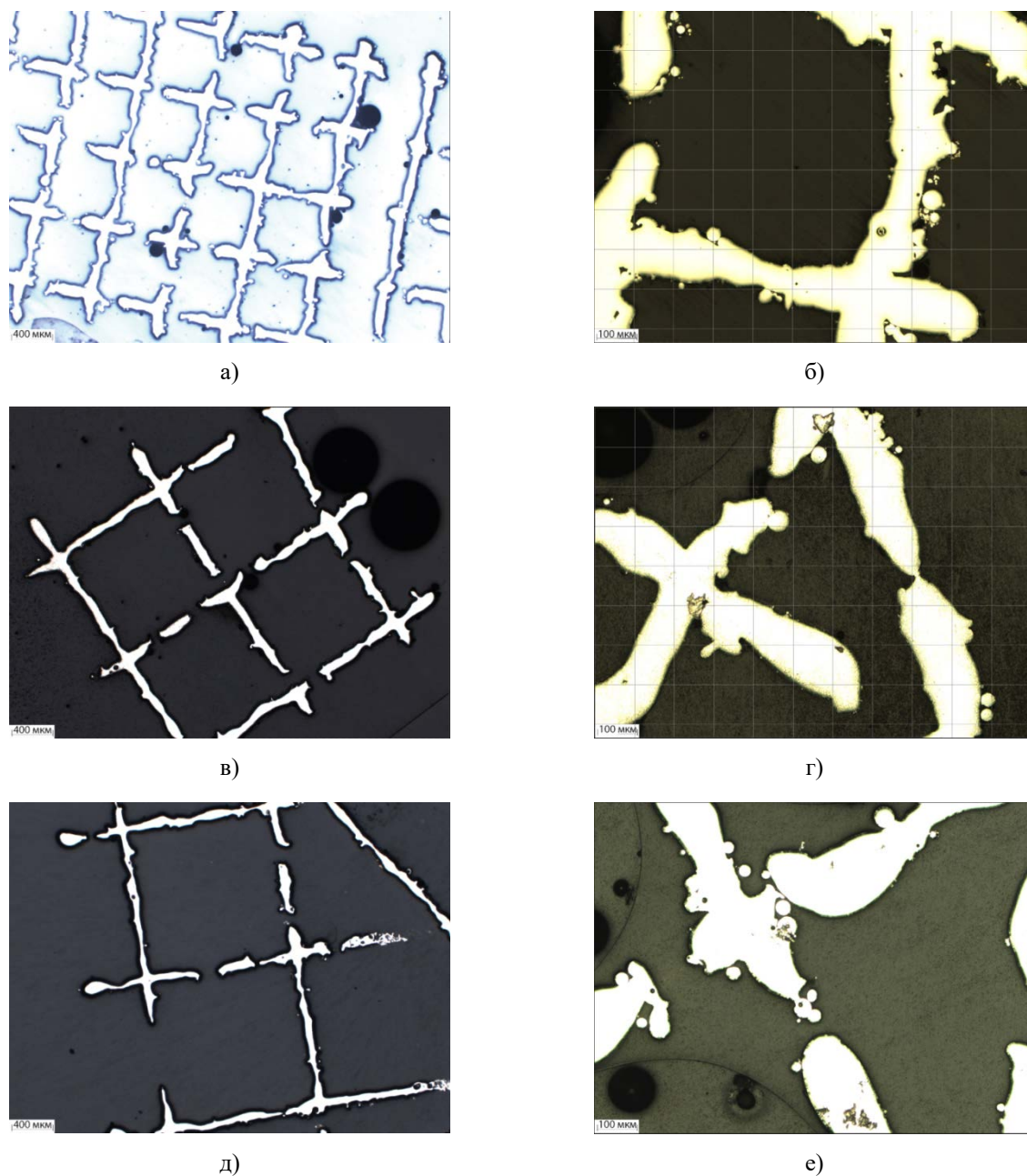


Рис. 2. Микрофотографии поддерживающих структур с различным периодом:

а) 0.7 мм, 25×; б) 0.7 мм, 100×; в) 1.2 мм, 25×; г) 1.2 мм, 100×; д) 1.5 мм, 25×; е) 1.5 мм, 100×

Для заливки образцов использовалась двухкомпонентная эпоксидная смола EpoхAmite HT. Приготовление смолы и заливка проводились при температуре 20°C. После смешивания компонентов, в форму заливало 5 грамм смолы, затем образцы укладывались в форму и заливалась остальная часть смолы. Такой порядок приготовления был обусловлен хрупкостью образца и наличием у него замкнутых контуров, которые смола не способна заполнить. Полимеризация смолы осуществлялась в вакуумной камере при давлении вакуума -0.8 кгс/см² в течение 24 часов.

Дальнейшее изготовление микрошлифов производилось по нестандартной методике в виду хрупкости образцов. На первом этапе шлифование образцов с выведением плоскости шлифа производилось на шлифовальной водостойкой бумаге SiC P400. На втором этапе образец проходил процедуру шлифования на водостойкой шлифовальной бумаге SiC P800 с выдерживанием перпендикулярного направления шлифования по отношению к предыдущему этапу. Далее производили полирование образцов 9 мкм поликристаллической двухкомпонентной алмазной суспензией АТМ (Германия), затем 3 мкм поликристаллической двухкомпонентной суспензией Microdiamant (Швейцария). Последний этап представлял доводку 50 нм суспензией оксида алюминия Al₂O₃ в течение 2 минут с добавлением дистиллированной воды в последние 30 секунд полирования.

Исследование нетравленных микрошлифов проводилось методом оптической микроскопии с использованием микроскопа AxioObserver A1 (Carl Zeiss) при увеличении 25-100×.

В процессе ЭЗО существенное влияние оказывают режимы обработки. Одним из важнейших параметров является толщина обрабатываемого изделия. В зависимости от заданной толщины обработки система ЧПУ станка рассчитывает остальные режимы резанья. Так как поддержки представляют собой решетчатую структуру, необходимо рассчитать фактическую среднюю толщину обрабатываемого материала. Для измерения толщины на снимки микрошлифов была нанесена сетка 100×100 мкм, затем была измерена толщина поддержки в месте каждого пересечения с вертикальной линией сетки (рисунок 3).

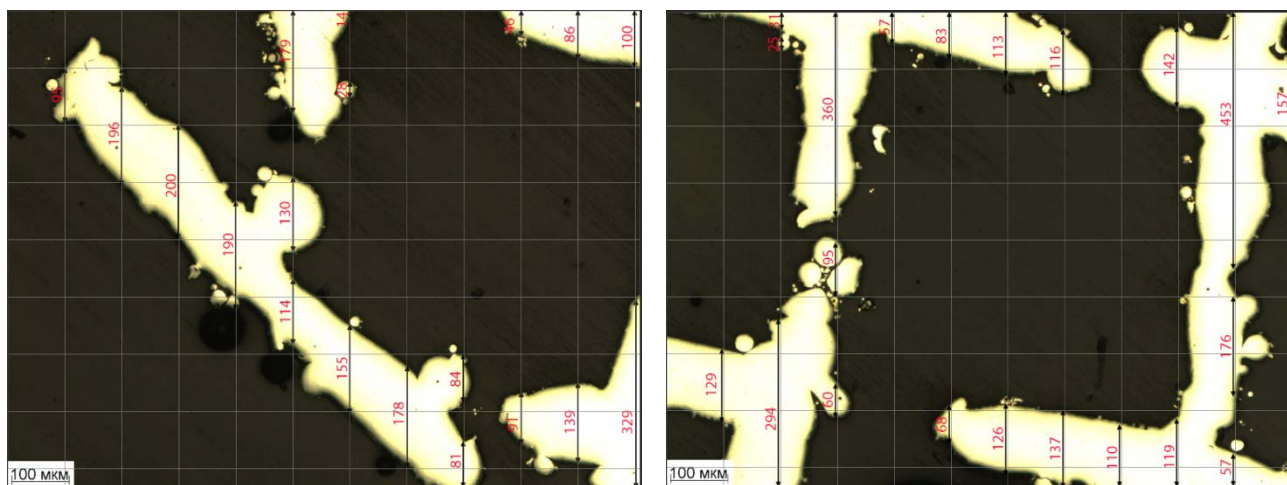


Рис. 3. Микрофотографии поддерживающих структур 0.7×0.7 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

Результаты измерений срезаемого слоя на образце с сеткой 0.7×0.7 мм на каждой из линий были занесены в таблицу 1. В таблице по горизонтали представлены номера снимков микрошлифов, а по вертикали номера линий слева направо в порядке измерений. Измерения показывают, что средний размер срезаемого слоя составляет 256-257 мкм при полной высоте снимка 0.836 мм. Так как общая толщина сплошного образца составляет 10 мм, то в среднем на всей высоте образца суммарная толщина срезаемых поддержек составляет 3.06 мм.

Образцы с шагом поддержек 1.2×1.2 мм, 1.5×1.5 мм были проанализированы аналогичным образом. На снимки также была нанесена сетка и расставлены размеры толщин срезаемого слоя в местах пересечения вертикальных линий сетки с поддержками (рисунок 4, 5).

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 0.7×0.7 мм (мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение по линиям, мкм
1	349	636	437	501	95	427	129	557	440	588	416
2	382	432	245	76	196	745	350	120	479	375	340
3	314	250	65	65	200	243	515	137	98	130	202
4	46	130	105	198	190	100	57	78	117	153	117
5	111	87	161	250	423	70	151	89	105	159	161
6	167	121	161	298	197	167	239	156	152	200	186
7	163	394	465	385	178	171	253	396	138	354	290
8	395	370	526	485	165	414	110	782	586	225	406
9	338	159	131	223	137	540	261	282	293	325	269
10	262	–	139	88	225	140	686	126	183	224	230
11	125	–	–	–	429	102	157	149	386	30	197
Среднее по снимкам, мкм	241	287	243	257	221	284	264	261	271	251	256-257

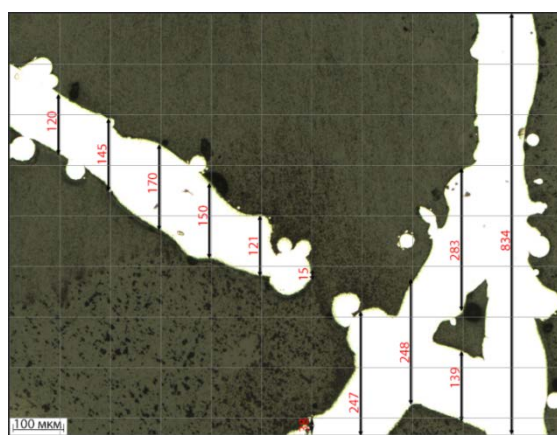
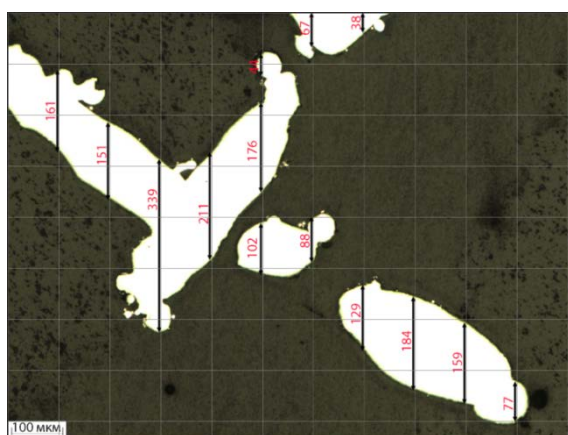


Рис. 4. Микрофотографии поддерживающих структур 1.2×1.2 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

В таблице 2 представлены сводные данные по измерениям всех снимков для образца с сеткой 1.2×1.2 мм. Толщина срезаемого слоя в пределах одного снимка составила 206-207 мкм, а при пересчете на высоту всего образца толщина обрабатываемого материала – 2.46 мм.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 1.2×1.2 мм

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
1	410	365	161	155	335	120	149	144	149	103	209
2	389	302	151	53	217	145	155	156	87	113	177
3	233	317	339	63	131	170	143	137	62	149	174
4	140	214	211	88	79	150	333	270	371	155	201
5	118	322	322	243	199	121	439	368	345	136	261
6	90	238	155	228	319	53	155	411	277	144	207

Окончание табл. 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
7	121	315	167	27	226	247	105	133	154	360	185
8	134	310	184	264	244	249	108	151	—	561	248
9	142	335	159	86	135	422	97	101	—	482	218
10	125	45	77	—	275	834	95	121	—	113	211
11	123	—	—	—	320	—	143	124	—	—	178
Среднее по снимкам, мкм	184	276	193	134	226	251	175	192	206	232	206-207

В таблице 3 представлены значения для третьего образца с сеткой поддержки 1.5×1.5 мм. Всего для каждого образца было проанализировано по 10 снимков. На рисунке 5 представлены снимки с размерами для третьего образца.

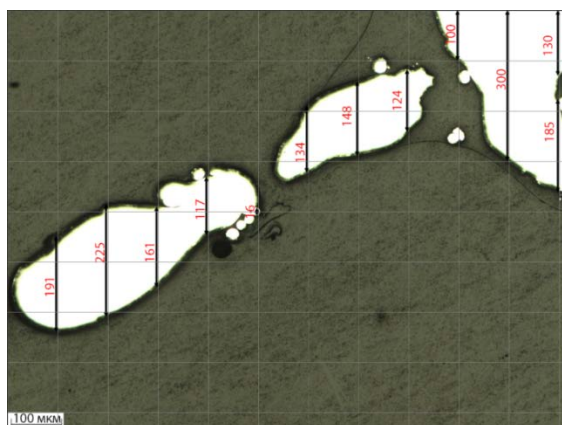


Рис. 5. Микрофотографии поддерживающих структур 1.5×1.5 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

ТАБЛИЦА 3
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 1.5×1.5 ММ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
1	123	129	86	191	107	198	141	155	155	154	144
2	73	290	44	225	139	197	166	84	84	238	154
3	61	145	105	161	282	240	148	422	422	157	214
4	98	138	122	117	278	215	156	201	201	251	178
5	175	174	177	16	34	194	324	285	285	200	186
6	233	120	129	134	235	101	264	425	425	315	238
7	706	148	207	148	437	21	219	304	304	335	283
8	121	95	130	124	271	112	188	125	125	374	167
9	122	—	146	100	85	113	—	34	34	153	98
10	106	—	71	300	149	111	—	14	14	187	119
11	122	—	—	315	125	129	—	542	542	—	296
Среднее по снимкам, мкм	176	155	122	166	195	148	201	235	235	236	187-189

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Так как система ЧПУ проволочно-вырезного станка Sodick VZ300L имеет встроенную базу режимов обработки, то их необходимо откорректировать в нестандартных ситуациях, таких как удаление решетчатых поддерживающих структур. Система ЧПУ не имеет возможности задать конкретную толщину обрабатываемого материала, в наличии имеется только возможность выбора ближайшего значения из стандартного ряда. Стандартный ряд имеет ограничение в виде минимальной высоты заготовки в 5 мм. Проведенные измерения суммарной толщины поддерживающих структур показывают, что при их удалении с помощью ПЭЭО, фактическая толщина срезаемого слоя может быть значительно меньше 5 мм, что требует корректировки параметров обработки станка.

Для повышения стабильности обработки необходимо исследовать влияние занижения параметров ON, OFF и EPA минимум на 30%. Также необходимо провести исследования по удалению поддержек, суммарная толщина которых будет превышать минимальные 5 мм, заданные в ЧПУ, вероятно в таком случае маркер стабильности не будет переходить в зону HARD и количество обрывов проволоки снизится.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе удаления поддержек методом проволочной электроэрозионной обработки на стабильность процесса могут оказывать различные факторы. Одним из них может являться несоответствие реальной толщины обрабатываемого материала той, которая указана в системе ЧПУ станка. Анализ микрошлифов удаленных поддержек показал, что при их удалении фактически материал составляет 20-30% от планируемой толщины реза. Таким образом, для того, чтобы устранить проблему обрывов проволоки необходимо: 1) ввести поправочный понижающий коэффициент, позволяющий пересчитать реальное количество срезаемого материала, или 2) вручную корректировать режимы резания, такие как ON, OFF и EPA.

Кроме указанных причин выхода маркера стабильности обработки в зону HARD, при удалении поддержек, могут быть и другие причины. Одна из них может быть связана с тем, что кроме образования стандартного шлама в процессе обработки, дополнительные коррективы в процесс могут вносить частицы порошка, которые не были удалены в результате постобработки изделий после печати, а также частицы, которые были приплавлены к основным частицам поддержки, но тем не менее, были оторваны высоким давлением прокачиваемой жидкости или газового пузыря в процессе обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leary M., Mazur M., Elambasseril J., McMillan M., Chirent T., Sun Y., Qian M., Easton M., Brandt M., Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures // Mater. Des. 2016. Vol. 98. Pp. 344–357. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.127.
2. Günther J., Leuders S., Koppa P., Tröster T., Henkel S., Biermann H., Niendorf T. On the effect of internal channels and surface roughness on the high-cycle fatigue performance of Ti-6Al-4V processed by SLM // Mater. Des. 2018. Vol. 143. Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.042.
3. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A, Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties // Prog. Mater. Sci. 2018. Vol. 92. Pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
4. Cao Q.[et al.]. Removability of 316L stainless steel cone and block support structures fabricated by Selective Laser Melting (SLM) //Materials & Design. 2020. Vol. 191. P. 108691.
5. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process // CIRP Annals. 2005. Vol. 54. Pp.64–87. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60020-1.