



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом

Дмитрий Ардашев^{a, *}, Александр Дюрягин^b, Дамир Галимов^c

Южно-Уральский государственный университет, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdv@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, s.dyuryagin@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-6060-5525>, galimovdm@susu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.019

История статьи:

Поступила: 25 августа 2020
 Рецензирование: 11 сентября 2020
 Принята к печати: 14 сентября 2020
 Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Аддитивные технологии
 Генеративные заготовки
 Дефектный слой
 БрАЖ10
 Стеллит 6

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время все большую популярность набирают новые методы изготовления деталей, к которым относятся аддитивные технологии. Методы выращивания деталей путем спекания порошка лазером позволяют изготавливать детали сложной формы, которые достаточно затруднительно либо вообще невозможно получить традиционными методами – литьем, штамповкой и др. Однако заготовки, полученные посредством аддитивных технологий, в частности DMD-методом (Direct Metal Deposition), не соответствуют точностным требованиям чертежа готовой детали. Следовательно, они требуют дальнейшей обработки традиционными методами резания материалов – точением, фрезерованием или шлифованием. Для проектирования операции механической обработки деталей необходимо знать припуски на обработку и величины погрешностей, сформированных на заготовительной операции, чтобы после их удаления обработанная деталь соответствовала требованиям чертежа. **Цель работы:** экспериментальное исследование величины дефектного слоя в приповерхностных слоях генеративных заготовок из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10, выращенных DMD-методом, посредством микроструктурных методов. **В работе** при помощи микроскопа **выполнено исследование**, заключающееся в визуальном определении дефектного слоя, отличающегося по структуре, измерении его величины, проведении химического анализа и определении характера изменения микротвердости. **Методом исследования** является микроскопическое исследование образцов, наплавленных из материалов Стеллит 6 и БрАЖ10. По снимкам, выполненным при помощи микроскопа, удалось установить линейную величину дефектного слоя. **Результаты и обсуждение.** Обнаружены вихревые образования в зоне ванны плавления, проведен их химический анализ и установлено, что концентрация химических элементов в данной области изменяется и включает в себя элементы как материала порошка, так и материала подложки. Измерение микротвердости показало, что она уменьшается по глубине от поверхности наплавленного материала к подложке, что также позволяет оценить величину дефектного слоя. Таким образом, использование представленной в настоящей работе методики микроскопических исследований структуры, химического состава и микротвердости заготовок, выращенных DMD-методом, позволит в дальнейшем прогнозировать величину припусков на обработку при проектировании операции механической обработки генеративных заготовок.

Для цитирования: Ардашев Д.В., Дюрягин А.А., Галимов Д.М. Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17.

Введение

В настоящее время в мировом машиностроении активно инициируются наукоемкие процессы, связанные с созданием принципиально новых методов конструирования и изготовления

сложнопрофильных ответственных деталей, а также новых методов их обработки. Такие детали невозможно или достаточно сложно получить традиционными методами – обработкой резанием, литьем, штамповкой и другими методами обработки материалов.

DMD (Direct Metal Deposition) – это новая аддитивная технология, которая заключается в прямом осаждении материала из газопорошковой струи металлических частиц [1–4]. Применение этого метода позволяет реализовать гене-

*Адрес для переписки

Ардашев Дмитрий Валерьевич, д.т.н., профессор
 Южно-Уральский государственный университет,
 пр. Ленина, 76,
 454080, г. Челябинск, Россия
 Тел.: +7 (351) 272-32-94, e-mail: ardashevdv@susu.ru

ративную технологию производства деталей с уникальной пространственно-сложнопрофильной внешней и внутренней геометрией без реализации трудоемких заготовительных операций. Кроме того, открывается возможность изготовления деталей с многоматериальными покрытиями, обладающими специальными многофункциональными свойствами – жаростойкостью, коррозионной стойкостью, повышенной прочностью, износостойкостью и т. д. Также с применением DMD-метода повышается эффективность ремонтно-восстановительных работ для дорогостоящих деталей (направляющих станков, корпусов турбин, пресс-форм и т. д.).

Таким образом, основными причинами перехода от традиционных методов создания сложнопрофильных заготовок к генеративным технологиям их выращивания стали высокая трудоемкость их изготовления с сохранением эксплуатационных свойств и сложности реализации последующей технологии обработки резанием [5, 6]. Применение DMD-метода позволяет упростить и повысить производительность процесса производства заготовок деталей сложной конфигурации, снизить затраты на режущий инструмент, а также сократить основное время последующей обработки резанием за счет производства заготовок, конфигурация которых практически полностью соответствует чертежу готовой детали. Последующая обработка резанием таких заготовок будет производиться с минимально возможными припусками.

Как следствие, использование технологии лазерной наплавки имеет еще одно преимущество. Данный метод позволяет существенно сократить расход материала. Его использование в значительной степени повышает коэффициент использования материала – наплавляемого порошка, что в свою очередь повышает экономическую эффективность производства.

Получение деталей, отвечающих высоким требованиям чертежа, посредством только аддитивных технологий в настоящее время невозможно. Это связано с несовершенством технологии выращивания, отсутствием методологической базы, позволяющей DMD-методами получать детали с заданными требованиями по точности, шероховатости, допускам формы и пр. Качество поверхности изделия, полученного путем

выращивания, зависит от большого количества факторов, например, температуры в зоне ванны плавления, свойств наплавляемого материала и материала подложки, гранулометрического состава порошка, скорости его подачи через сопло, характеристик лазерного излучения и др.

Практически всегда для получения окончательного изделия с соответствующими характеристиками необходимо применять традиционные методы обработки резанием – точение, фрезерование и др.

В работе А.В. Дранкова [7] рассмотрено сравнение деталей, обработанных точением и фрезерованием, заготовки которых получены методом селективного лазерного спекания и методом проката. После проведения обработки установлено, что обе детали соответствуют точностным параметрам и имеют аналогичные механические свойства.

Suman Das и Martin Wohler [8], исследуя микроструктуру детали, полученной методом селективного лазерного спекания, установили, что материал, обработанный комбинированным методом, соответствует материалу, обработанному традиционным способом.

Известно, что проектирование операции механической обработки обычно начинается с определения глубины резания исходя из суммарного припуска. Следовательно, первоочередная задача, стоящая перед инженером-технологом при проектировании технологического процесса механической обработки заготовки, – определение величины дефектного слоя в приповерхностных слоях заготовки. Дефектный слой – это слой металла, отличающийся от основного материала заготовки по его механическим и физико-химическим свойствам. Дефектный слой является одной из составляющих припуска на обработку и должен быть удален в процессе механической обработки заготовки. Эта задача может быть решена в соответствии с методикой профессора В.М. Кована [9]. Кроме методики В.М. Кована существует опытно-статистический метод определения припуска. Однако данный способ не учитывает фактической величины шероховатости и дефектного слоя, входящих в составляющие припуска [10].

Для проектирования технологии обработки генеративных деталей в совокупности с про-

ектированием эффективных технологических процессов выращивания заготовок необходимо обладать достаточными и достоверными данными, описывающими характер поверхностного слоя заготовок, полученных таким методом. Важно располагать сведениями о величине шероховатости, глубине залегания и величине дефектного слоя.

Таким образом, **целью настоящей работы является** экспериментальное исследование величины дефектного слоя в приповерхностных слоях генеративных заготовок из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10, выращенных DMD-методом, посредством микроструктурных методов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) изготовить микрошлифы исследуемых образцов;
- 2) исследовать микроструктуру наплавленного слоя;
- 3) определить химический состав наплавленного материала и материалов, образовавшихся в зоне наплавления;
- 4) выполнить исследование микротвердости наплавленного слоя;
- 5) определить размеры составляющих дефектного слоя для исследуемых образцов.

Методика исследований

Выращенные образцы из порошков материалов БрАЖ10 и Стеллит 6 были получены DMD-методом в ресурсном центре специальной металлургии на базе Южно-Уральского государственного университета с применением комплекса лазерной наплавки FL-Clad-R-4 [11].

Химический состав исходных порошков приведен в табл. 1 и 2.

Для выращивания образцов в качестве подложки использовалась стальная пластина. Для Стеллита 6 подложка изготовлена из стали 5ХНМА, для БрАЖ10 – из стали 40Х. Толщина наплавленного слоя составила для Стеллита 6 – 0,89 мм, для бронзы – 1,02 мм. Общая толщина образцов, включая наплавленный слой, составила 7,8 и 5,1 мм соответственно.

Режимы наплавки: мощность лазера – 1600 Вт, скорость сканирования лазера – 10 мм/с, расход порошка – 27 г/мин.

Подготовка образцов включала три этапа.

1. Вырезка образца. Образец необходимой величины отрезался от заготовки, при этом необходимо, чтобы процесс отрезки сопровождался охлаждением, так как при высоких температурах образцы могут потерять первоначальные свойства.

Таблица 1

Table 1

Химический состав и размер основной фракции исходного порошка для образца из Стеллита 6
Chemical composition and the size of the initial powder main fraction for the sample Stellite 6

Образец / Sample	Химический элемент / Chemical element				Размер основной фракции, мкм / The powder main fraction size, μm
	C	Cr	Co	W	
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %				
Стеллит 6 / Stellite 6	1,1	28,0	66,9	4,0	53...150

Таблица 2

Table 2

Химический состав и размер основной фракции исходного порошка для образца из БрАЖ10
Chemical composition and the size of the initial powder main fraction for the sample CuAl10Fe4

Образец / Sample	Химический элемент / Chemical element					Размер основной фракции, мкм / The powder main fraction size, μm
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %					
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	82,5	10,0	4,0	1,0	2,0	45...106

2. Заливка смолой. Образцы после отрезки заливались в термостойкую эпоксидную смолу. Она защищает образец от коррозии и повышает удобство при исследовании. После этого образцы проходили процедуру травления.

3. Шлифовка и полировка. Данный этап производился с целью исключения внешних дефектов в виде царапин, рисок и микротрещин, возникающих в результате травления образцов.

Шероховатость поверхности образцов измерялась при помощи профилометра «Абрис ПМ-7» в пяти местах, после чего определялась ее средняя величина.

Исследование микроструктуры и химический анализ проводились с использованием автэмиссионного растрового электронного микроскопа GSM-7001F, по снимкам с которого определялись величина дефектного слоя и его химический состав. Измерение микротвердости

образцов выполнялось с использованием микротвердомера FM-800. По полученным данным строился график зависимости величины микротвердости и расстояния от поверхности наплавленного материала.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения шероховатости поверхности образцов приведены в табл. 3.

При визуальном рассмотрении изображений 50- и 500-кратного увеличения микрошлифов образцов, полученных с помощью электронного микроскопа GSM-7001F, удалось обнаружить следующее.

1. На поверхности образца из материала БрАЖ10 заметна структура, в которой снижается концентрация железа и увеличивается концентрация меди (рис. 1).

Таблица 3

Table 3

Результаты измерения шероховатости поверхности образцов
The results of measuring the surface roughness of the samples

Образец / Sample	Номер измерения / No of measurement					Среднее значение / Average
	1	2	3	4	5	
	Шероховатость поверхности образца Ra, мкм / The surface roughness of the samples, Ra, μm					
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	36,0	34,6	38,3	32,6	32,5	34,8
Стеллит 6 / Stellite 6	24,8	22,5	23,6	25,2	22,9	23,8

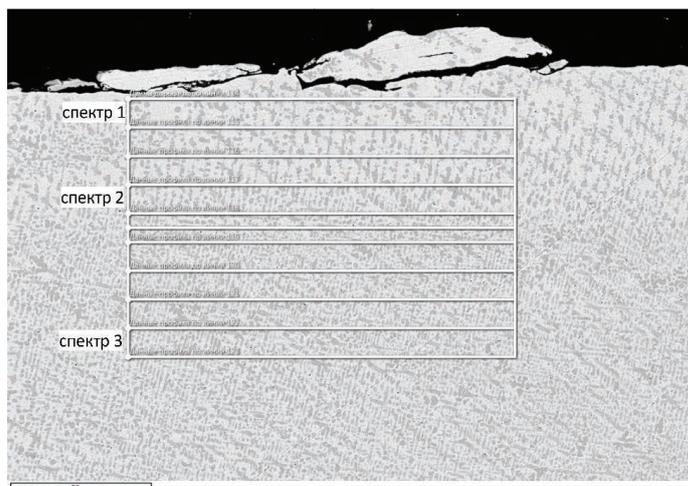


Рис. 1. Выбор спектров для проведения химического анализа образца из БрАЖ10

Fig. 1. Selection of spectra for CuAl10Fe4 chemical analysis

Это связано с отталкивающими свойствами железа по отношению к меди [12]. В связи с тем, что железо является парамагнетиком, а медь – диамагнетиком, железо выталкивает на поверхность медь.

Данное явление подтверждается результатами проведения химического анализа (см. рис. 1). Для каждого из трех спектров в табл. 4 представлен химический состав.

Измеренная величина дефектного слоя с учетом величины шероховатости на поверхности образца из БрАЖ10 изменяется в пределах 44,4...62,8 мкм (рис. 2).

2. Поверхность образца из Стеллита 6 имеет однородную структуру [13], при которой наличие дефектного слоя визуально установить не удалось. На поверхности обнаружены дефекты в виде макронеровностей, величина которых достигает 17,5 мкм (рис. 3). Величина макронеровностей перекрывается допуском на размер и не входит в составляющие для расчета припуска [9].

В области рабочей зоны, где происходит процесс плавления порошка лазерным лучом, формируются вихревые потоки [14–16].

При нагревании поверхности подложки лазером возникает явление переноса вещества

Таблица 4

Table 4

Химический состав образца из БрАЖ10
Chemical composition of a CuAl10Fe4 sample

№ спектра / Спектра No.	Химический элемент / Chemical element					
	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %					
1	7,05	0,23	0,00	28,39	64,32	0,00
2	6,15	0,22	0,02	36,74	56,77	0,10
3	5,79	0,17	0,10	42,01	51,68	0,24

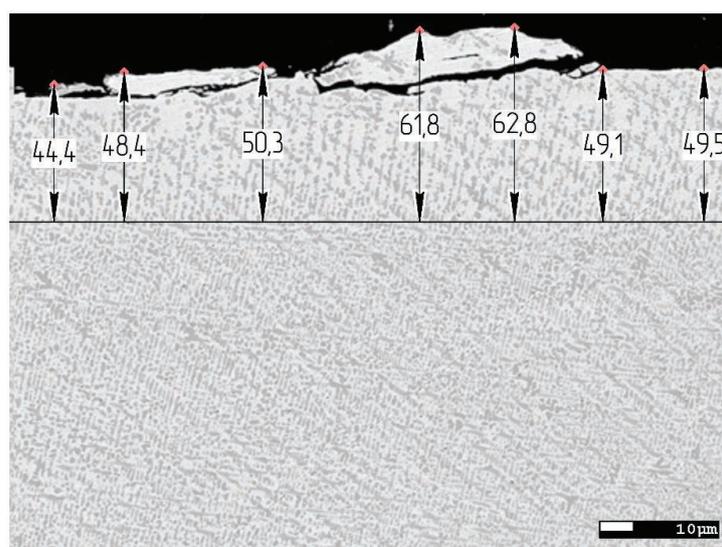


Рис. 2. Структура и величина дефектного слоя образца из БрАЖ10

Fig. 2. Structure and size of the defect layer of a CuAl10Fe4 sample

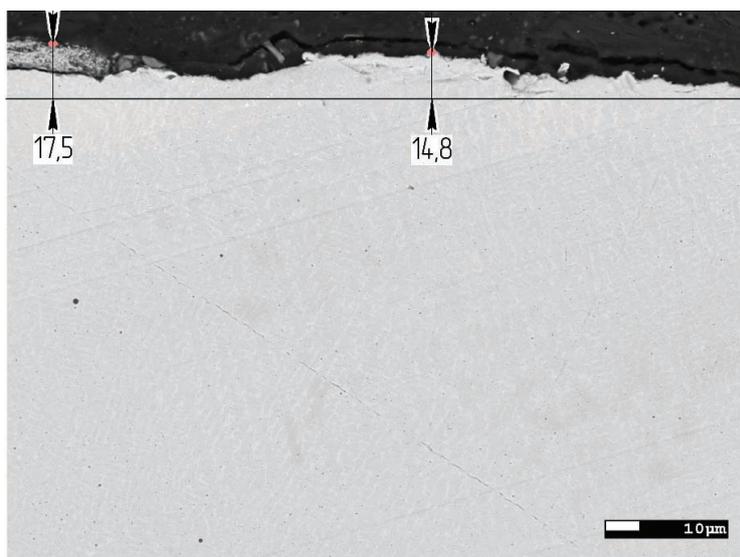


Рис. 3. Структура и величина макронеровностей образца из Стеллита 6

Fig. 3. Structure and macroroughness of a Stellite 6 sample

вдоль границы раздела двух сред, возникающее вследствие наличия градиента поверхностного натяжения и зависимости поверхностного натяжения от температуры [17]. Такое явление представляет собой разновидность конвекции и называется капиллярной конвекцией или конвекцией Марангони (эффектом Марангони или эффектом Марангони – Гиббса) [18].

Явление капиллярной конвекции становится причиной того, что при температуре наплавки выше температуры плавления материала под-

ложки возникают неустойчивости, приводящие к перемешиванию жидкости, т. е. к образованию вихрей [19]. Наличие таких вихрей визуализируется на рассматриваемых образцах.

С целью определения принадлежности областей, образованных вихревыми потоками, материалу подложки или наплавляемому материалу был проведен их химический анализ. Спектры 1 и 2 относятся к материалу подложки, 3 – к материалу вихревых потоков, 4 и 5 – к наплавленному материалу (рис. 4). Результаты приведены в табл. 5.

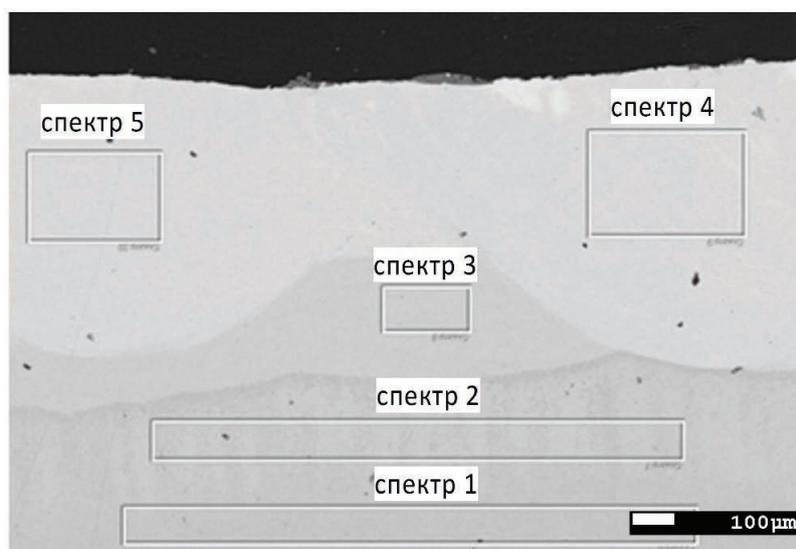


Рис. 4. Выбор спектров для проведения химического анализа

Fig. 4. Selection of spectra for Stellite 6 chemical analysis

Химический состав образца из Стеллита 6
Chemical composition of a Stellite 6 sample

№ спектра / Spectra No.	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %						
	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
	Концентрация, ат. % / Concentration, at. %						
1	0,34	0,74	96,44	0,62	1,52	0,31	0,03
2	0,42	0,71	96,27	0,58	1,60	0,18	0,25
3	0,65	13,82	74,64	0,58	8,42	1,87	0,02
4	0,60	21,42	46,92	18,94	5,56	1,42	5,14
5	0,62	22,43	42,41	22,04	5,25	1,36	5,85

Из данных табл. 5 видно, что химический состав материала в вихревых потоках отличается как от состава наплавленного материала, так и от материала подложки.

Таким образом, можно предположить, что при образовании вихревых потоков в совокупности с высокими температурами и высокой скоростью движения частиц порошка в зоне контакта с поверхностью расплавленного материала подложки попадает в вихревой поток, в результате чего образуется новый материал, в котором сокращается концентрация порошкового материала

за счет его вытеснения материалом подложки. Периодичность образования вихревых потоков материала подложки можно объяснить изменением с течением времени геометрии ванны плавления [20].

Величина слоя со стороны подложки, в котором происходят вихревые потоки, считается дефектной, так как имеет отличные от основного материала свойства. Измеренная линейная величина дефектного слоя достигает 415,8 мкм для Стеллита 6 (рис. 5) и 456,5 мкм для БрАЖ10 (рис. 6).

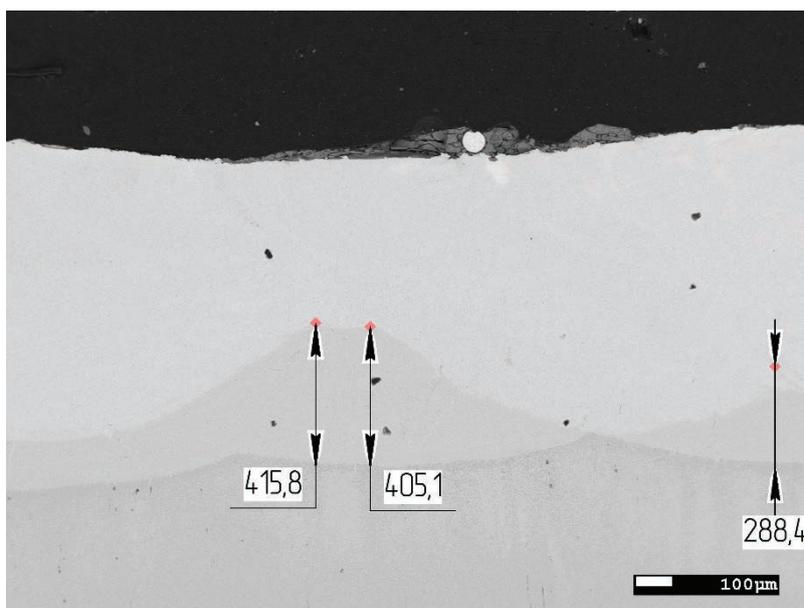


Рис. 5. Линейная величина вихревых потоков образца из Стеллита 6

Fig. 5. The linear magnitude of the vortex flows of a Stellite 6 sample

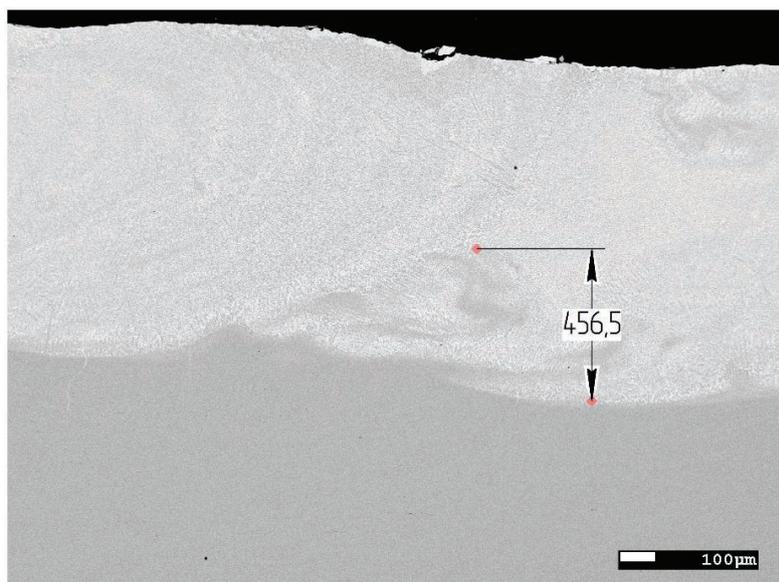


Рис. 6. Линейная величина вихревых потоков образца из БрАЖ10

Fig. 6. The linear magnitude of the vortex flows of a CuAl10Fe4 sample

В связи с тем, что на образце из бронзы не была обнаружена зона с измененной структурой материала, измерение микротвердости проводилось только для образца из Стеллита 6, так как его структура более однородная. Результаты представлены на рис. 7. Микротвердость изменяется от 426 HV у поверхности наплавленного матери-

ала до 282 HV у поверхности подложки. Таким образом, из данных видно, что в зоне вихревых образований микротвердость наплавленного материала уменьшается, что свидетельствует о наличии дефектного слоя со стороны подложки, который необходимо удалить для получения однородных свойств материала готовой детали.

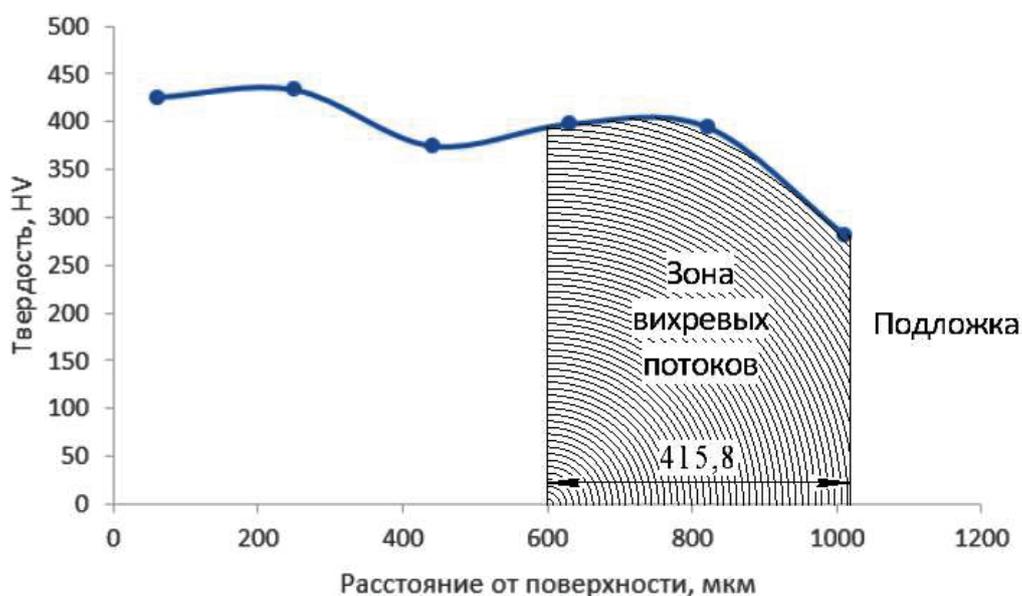


Рис. 7. Микротвердость образца из Стеллита 6

Fig. 7. Microhardness of a Stellite 6 sample

Таким образом, выполненное исследование дефектного слоя образцов из Стеллита 6 и бронзы БрАЖ10 позволило установить средние величины составляющих минимально необходимого припуска. Обобщенные данные приведены в табл. 6.

Данные табл. 6 позволяют определить минимально необходимый припуск и в дальнейшем спроектировать технологический процесс обработки резанием заготовок, выращенных DMD-методом из материалов Стеллит 6 и БрАЖ10.

Таблица 6

Table 6

Составляющие припуска образцов
Sample allowance components

Название образца / Name of sample	Составляющие припуска, мкм / Allowance components, μm		
	Ra	Дефектный слой / Defect layer	Размер вихревых потоков / Vortex flow size
БрАЖ10 / CuAl10Fe4	34,8	62,8	456,5
Стеллит 6 / Stellite 6	23,8	–	415,8

Выводы

1. В результате исследования микроструктуры наплавленного слоя на поверхности образца из материала БрАЖ10 определена линейная величина дефектного слоя, образовавшегося в результате отталкивающих свойств железа по отношению к меди. Величина дефектного слоя превышает величину шероховатости поверхности и изменяется в пределах 44,4...62,8 мкм. Для образца из Стеллита 6 такая структура отсутствует, величина дефектного слоя на поверхности образца находится в пределах шероховатости поверхности и составляет 23,8 мкм.

2. Выполненное исследование химического состава наплавленного материала позволило установить, что при выращивании заготовок со стороны подложки в рабочей зоне наплавки происходит образование вихревых потоков. В результате возникает новый материал, отличающийся по свойствам и от наплавляемого материала, и от материала подложки. Линейная величина вихревых потоков, являющихся дефектным слоем, на образце из Стеллита 6 равна 415,8 мкм, на образце из БрАЖ10 – 456,5 мкм.

3. Установлено, что при приближении к поверхности подложки микротвердость наплавленного материала снижается, что также свидетельствует о наличии вблизи подложки слоя материала, отличающегося механическими свойствами, т. е. дефектного слоя. Измеренная микро-

твердость изменяется от 426 HV у поверхности наплавленного материала до 282 HV у поверхности подложки. Протяженность зоны с измененной микротвердостью составляет 415,8 мкм.

4. В результате выполненного экспериментального исследования на заготовках, выращенных DMD-методом, определены составляющие дефектного слоя, как приповерхностного, так и со стороны подложки. Полученные результаты позволяют в дальнейшем выполнить проектирование технологии обработки резанием генеративных деталей, полученных DMD-методами. Перспективное развитие данного направления видится в разработке теоретических основ расчетного прогнозирования величины минимально необходимого припуска на обработку.

Список литературы

1. Pinkerton A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance // *Advances in Laser Material Processing: Technology, Research and Application*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. – P. 461–491. – DOI: 10.1533/9781845699819.6.461.

2. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD) / M.T. Dalae, L. Gloor, C. Leinenbach, K. Wegener // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – Vol. 384. – P. 125275. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125275.



3. *Aghili S.E., Shamanian M.* Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides single substrate // *Optics & Laser Technology*. – 2019. – Vol. 119. – Art. 105652. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105652.

4. *Leyens C., Beyer E.* Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition // *Laser Surface Engineering*. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. – P. 181–192. – DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8.

5. *Yang Y.H., Wu F.B.* Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings // *Surface and Coating Technology*. – 2006. – Vol. 308. – P. 108–114. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.

6. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering / E. Contreras, Y. Galindez, M.A. Rodas, G. Bejarano, M.A. Gomez // *Surface and Coating Technology*. – 2017. – Vol. 332. – P. 214–222. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.

7. *Дранков А.В.* Изготовление деталей РКТ из отечественного порошка нержавеющей стали // *Аддитивные технологии*. – 2019. – № 2. – С. 50–55.

8. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing / S. Das, M. Wohlert, J.J. Beaman, D.L. Bourell // *JOM*. – 1998. – Vol. 50. – P. 17–20. – DOI: 10.1007/s11837-998-0299-1.

9. *Кован В.М.* Расчет припусков на обработку в машиностроении: справочное пособие. – М.: Машгиз, 1953. – 210 с.

10. *Eguzwu E.O.* Key improvement in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2005. – Vol. 45. – P. 1353–1367. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.

11. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods / M. Samodurova, I. Logachev, N. Shaburova, O. Samoilova, L. Radionova, R. Zakirov, K. Pashkeev, V. Myasoedov, E. Trofimov // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – DOI: 10.3390/ma12193269.

12. *Бурова Д.Н., Цебрук И.С., Классен Н.В.* Исследования и применения влияния магнитного поля на систему «железо-медь-вода» // XVII Всероссийская

с международным участием школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. – Черноголовка, 2019. – С. 134–136. – DOI: 10.24411/9999-004A-2019-10045.

13. Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited stellite 6 alloy / G.P. Rajeev, M.R. Rahul, M. Kamaraj, S.R. Bakshi // *Materialia*. – 2020. – Vol. 12. – DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100724.

14. *Туричин Г.А., Сомонов В.В., Климова О.Г.* Исследование и моделирование процесса формирования наплавочного валика и микроструктуры при лазерной наплавке излучением мощного волоконного лазера // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов V Международной научно-практической конференции*. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 410–415.

15. *Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Третьяков Р.С.* Анализ влияния параметров коаксиальной лазерной наплавки на формирование валиков // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 11. – С. 19–21.

16. *Moosa A.A., Kadhim M.J., Subhi A.D.* Dilution effect during laser cladding of inconel 617 with Ni-Al powders // *Modern Applied Science*. – 2011. – Vol. 5. – P. 50–55. – DOI: 10.5539/mas.v5n1p50.

17. *Веденов А.А.* Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергомашиздат, 1985. – 208 с.

18. Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process / Y. Jiang, Y. Cheng, X. Zhang, J. Yang, X. Yang, Z. Cheng // *Optik*. – 2020. – Vol. 203. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.164044.

19. *Бобученко Д.С.* Численное моделирование газопорошковой лазерной наплавки металлических материалов на подложки // *Математическое моделирование*. – 1991. – Т. 3. – С. 109–122.

20. *Штилев А.И.* Исследование и оптимизация газопорошковых потоков в головках для лазерной порошковой наплавки: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. – Казань, 2018. – 179 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 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



Experimental Study of the Defect Layer on Workpieces, grown by the DMD method

Dmitrii Ardashev^{a,*}, Alexander Dyuryagin^b, Damir Galimov^c

South Ural State University, 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8134-2525>, ardashevdy@susu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6274-1953>, s.dyuryagin@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-6060-5525>, galimovdm@susu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 25 August 2020

Revised: 11 September 2020

Accepted: 14 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Additive technology
Generated workpieces
Defect layer
CuAl10Fe4
Stellite 6

Funding

This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

ABSTRACT

Introduction. At this time, new methods of manufacturing workpieces are gaining great popularity, for example, additive technologies. Methods for growing workpieces by sintering a powder with a laser make it possible to manufacture parts of complex shapes that are impossible or rather difficult to obtain by traditional methods, such as casting, forging, etc. However, the details, obtained by means of additive technologies, in particular the DMD method (Direct Metal Deposition), do not correspond with the accuracy requirements. Consequently, such workpieces require further processing by turning, milling or grinding. To design an operation for machining parts, it is necessary to know the machining allowances, the magnitude of errors formed during the blank operation, so that after its removal the processed part meets the requirements of the drawing. **The purpose of the work:** experimental study of the size of the defect layer in the near-surface layers of generative workpieces made of Stellite 6 and CuAl10Fe4, grown by DMD method, using microstructural methods. In the work, using a microscope, a study is carried out, which consisted in the visual determination of the defective layer, which differs in structure; measuring its size; carrying out a chemical analysis; determining the nature of the change in microhardness. **The research method** is a microscopic examination of deposited materials Stellite 6 and CuAl10Fe4 (CuAl10Fe4). From the pictures taken with a microscope, it is possible to establish the linear size of the defect layer. **Results and Discussion.** Vortex formations are found in the melting zone, its chemical analysis is carried out and it is found that the concentration of chemical elements in these areas changes and includes both elements of the powder material and the substrate material. Measurement of microhardness showed that it decreases with depth from the surface of the deposited material to the substrate. Thus, the use of the technique presented in this paper for microscopic studies of the structure, chemical composition and microhardness of workpieces, grown by the DMD method will allow to predict the value of processing allowances in the future, during the designing of mechanical processing operation of generative workpieces.

For citation: Ardashev D.V., Dyuryagin A.A., Galimov D.M. Experimental study of the defect layer on workpieces, grown by the DMD method. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17. (In Russian).

References

1. Pinkerton A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance. *Advances in Laser Material Processing: Technology, Research and Application*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2010, pp. 461–491. DOI: 10.1533/9781845699819.6.461.
2. Dalae M.T., Gloor L., Leinenbach C., Wegener K. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD). *Surface and Coating Technology*, 2020, vol. 384, p. 125275. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125275.
3. Aghili S.E., Shamanian M. Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides singlesubstrate. *Optics & Laser Technology*, 2019, vol. 119, art. 105652. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105652.

* Corresponding author

Ardashev Dmitrii V., D.Sc. (Engineering), Professor
South Ural State University,
76 Lenin prospekt,
454080, Chelyabinsk, Russian Federation
Tel.: +7 (351) 272-32-94, e-mail: ardashevdy@susu.ru



4. Leyens C., Beyer E. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition. *Laser Surface Engineering*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2015, pp. 181–192. DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8.
5. Yang Y.H., Wu F.B. Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings. *Surface and Coating Technology*, 2006, vol. 308, pp. 108–114. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.
6. Contreras E., Galindez Y., Rodas M.A., Bejarano G., Gomez M.A. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coating Technology*, 2017, vol. 332, pp. 214–222. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.
7. Drankov A.V. Izgotovlenie detalei RKT iz otechestvennogo poroshka nerzhavayushchei stali [Manufacturing of RCT parts from domestic stainless steel powder]. *Additivnye tehnologii = Additive technologies*, 2019, no. 2, pp. 50–55.
8. Das S., Wohler M., Beaman J.J., Bourell D.L. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing. *JOM*, 1998, vol. 50, pp. 17–20. DOI: 10.1007/s11837-998-0299-1.
9. Kovan V.M. *Raschet pripuskov na obrabotku v mashinostroenii* [Calculation of machining allowances in mechanical engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1953. 210 p.
10. Eguzwu E.O. Key improvement in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1353–1367. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.
11. Samodurova M., Logachev I., Shaburova N., Samoilova O., Radionova L., Zakirov R., Pashkeev K., Myasodov V., Trofimov E. Study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods. *Materials*, 2019, no. 12. DOI: 10.3390/ma12193269.
12. Burova D.N., Tsebruk I.S., Klassen N.V. [Research and application of the influence of the magnetic field on the “iron-copper-water” system]. *XVII Vserossiiskaya s mezhdunarodnym uchastiem shkola-seminar po strukturnoi makrokinetike dlya molodykh uchenykh imeni akademika A.G. Merzhanova* [XVII All-Russian School-Seminar on Structural Macrokinetics for Young Scientists named after Academician A.G. Merzhanov], Chernogolovka, 2019, pp. 134–136. DOI: 10.24411/9999-004A-2019-10045. (In Russian).
13. Rajeev G.P., Rahul M.R., Kamaraj M., Bakshi S.R. Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited Stellite 6 alloy. *Materialia*, 2020, vol. 12. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100724.
14. Turichin G.A., Somonov V.V., Klimova O.G. [Investigation and modeling of the process of forming a surfacing bead and microstructure during laser surfacing by radiation of a high-power fiber laser]. *Innovatsionnye tekhnologii i ekonomika v mashinostroenii: sbornik trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [V International Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering”]. Tomsk, 2014, vol. 1, pp. 410–415. (In Russian).
15. Grigor'yants A.G., Misyurov A.I., Tret'yakov R.S. Analiz vliyaniya parametrov koaksial'noi lazernoi naplavki na formirovanie valikov [Analysis of the coaxial laser surface coating condition influence on the bead formation]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Engineering technology*, 2011, no. 11, pp. 19–21.
16. Moosa A.A., Kadhim M.J., Subhi A.D. Dilution effect during laser cladding of inconel 617 with Ni-Al powders. *Modern Applied Science*, 2011, vol. 5, pp. 50–55. DOI: 10.5539/mas.v5n1p50.
17. Vedenov A.A. *Fizicheskie protsessy pri lazernoi obrabotke materialov* [Physical processes in laser processing of materials]. Moscow, Energomashizdat Publ., 1985. 208 p.
18. Jiang Y., Cheng Y., Zhang X., Yang J., Yang X., Cheng Z. Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process. *Optik*, 2020, vol. 203. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.164044.
19. Bobuchenko D.S. Chislennoe modelirovanie gazoporoshkovoi lazernoi naplavki metallicheskih materialov na podlozhki [Numerical simulation of gas-powder laser cladding of metallic materials on substrates]. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*, 1991, vol. 3, pp. 109–122. (In Russian).
20. Shpilev A.I. *Issledovanie i optimizatsiya gazoporoshkovykh potokov v golovkakh dlya lazernoi poroshkovoi naplavki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and optimization of powder flows in heads for laser powder surfacing. PhD eng. sci. diss.]. Kazan', 2019. 179 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.