

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СПЛАВОВ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

© 2019 А.М.Хакимов^{1,2}

¹ПАО «Кузнецов», г. Самара

²Самарский государственный технический университет

В статье приведено исследование структуры и свойств деталей полученных по технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ) из металлопорошковых композиций (МПК) нержавеющей ПР-08Х15Н5ДТ и жаропрочного ПР-ХН55В5МБТЮ сплавов. Представлены результаты исследований, выбраны оптимальные режимы при которых в готовой детали образуется минимальное количество дефектов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, МПК, дефекты наплавки, режимы.

Введение. Существует множество разновидностей аддитивных технологий, но в настоящее время в международном сообществе, а также и в России устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. [1, С.11] Одной из множества разновидностей является технология ПЛВ. В технологии ПЛВ материал подается непосредственно в место подведения энергии и построения в данный момент фрагмента детали [2; 1, С.12].

Производственный цикл изготовления крупногабаритных корпусных деталей ГТД традиционным методом может составлять порядка 6-9 месяцев, но применение технологии ПЛВ позволяет сократить цикл более чем в 10 раз. Также при изготовлении деталей по технологии ПЛВ выше КИМ и не требуется изготовление дополнительной оснастки.

До настоящего времени в России технология ПЛВ из металлопорошковых композиций еще не внедрена в авиационное двигателестроение.

Целью работы является проведение исследования особенностей технологии ПЛВ с использованием отечественных МПК нержавеющей ПР-08Х15Н5ДТ и жаропрочного ПР-ХН55В5МБТЮ сплавов, для последующего внедрения технологии в авиационное двигателестроение.

Методика исследований:

Для проведения исследований выращивание образцов проводили на стальных подложках толщиной 5 мм. Жертвенный слой образца, по которому производилась отрезка образца от подложки, составляет 10 мм. Под жертвенным слоем понимается часть высоты выращенного образца расположенная возле подложки. В жертвенном слое обычно располагаются трещины, которые образуются в начале процесса выращивания из-за разницы температур и значений КТЛР материала подложки и материала выращиваемого образца.

Выращенные образцы имеют размеры 15x60x15...25мм.

В качестве расходного материала для прямого лазерного выращивания образцов были использованы МПК из нержавеющей ПР-08Х15Н5ДТ и жаропрочного ПР-ХН55В5МБТЮ сплавов отечественного производства АО «Полема» г.Тула фракцией 40-150 мкм.

Выращивание образцов производилось на установке технологической лазерного выращивания УТЛВ отечественного производства ИЛиСТ ФГБОУ ВО СПбГМТУ. УТЛВ предназначена для изготовления крупногабаритных корпусных деталей с максимальным размером до Ø2000мм из нержавеющей и жаропрочных сплавов. Схема процесса ПЛВ представлена на рис. 1.

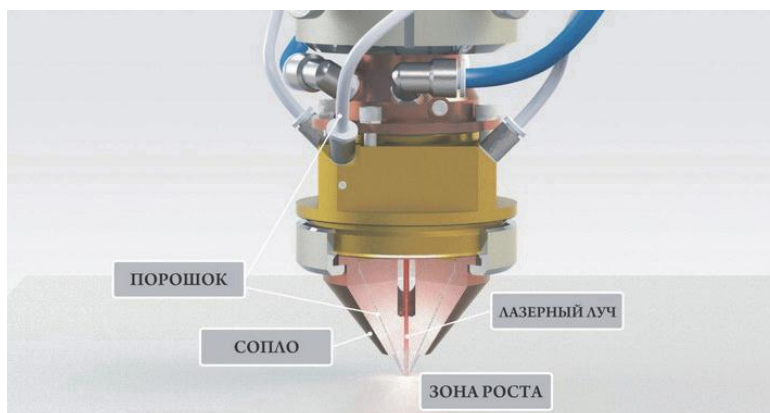


Рис.1. Схема процесса ПЛВ

Морфология частиц МПК и растровая электронная микроскопия проводилась на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA3 LM с модулем Oxford instruments X-Max.

Зерновой состав исходных МПК определялся методом просеивания через сита 016, 014, 004

Металлографическое исследование проводилось при помощи оптического микроскопа CARL ZEISS AXIO OBSERVER

Макро- и микроанализ проводились на поперечных (относительно длины образцов) шлифах, изготовленных в трех сечениях: на расстоянии 10мм от края и по центру образцов. Травление шлифов проводилось электролитическим способом при комнатной температуре в течение 30 секунд в электролите следующего состава: 10г лимонной кислоты + 10г хлористого аммония + 1л воды.

Химический анализ выращенных образцов был выполнен оценочно на портативном рентгеновском анализаторе GRN ProSpector, так как погрешность прибора составляет 30%.

Результаты исследований:

При исследовании морфологии установлено что, МПК из нержавеющей сплава ПР-08X15Н5ДТ имеет частицы различных фракций. Основной объем частиц имеет сферическую форму. На поверхности некоторых частиц незначительное наличие сателлитов. Также отмечается наличие дефекта в виде панциря.

Результаты исследований МПК из нержавеющей сплава ПР-08X15Н5ДТ при различных увеличениях представлены на рис. 2.

При исследовании морфологии МПК из жаропрочного сплава ПР-ХН55В5МБТЮ и сравнении с МПК из нержавеющей сплава ПР-08X15Н5ДТ установлено, что данный порошок имеет более сферичную форму и одинаковую фракцию (рис.3). Также отмечается наличие сателлитов на поверхности некоторых частиц. Оболочка в виде панциря отсутствует. На поверхности прослеживается дендритная структура.

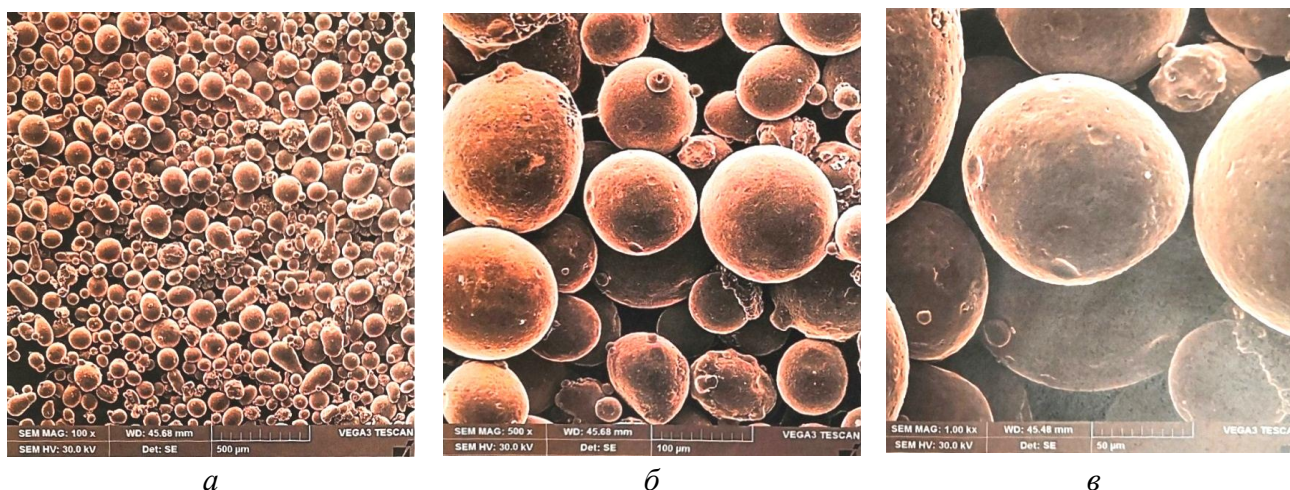


Рис.2. Морфология МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ: а – х100; б – х500; в – х1000

Результаты исследований МПК из жаропрочного сплава ПР-ХН55В5МБТЮ при различных увеличениях представлены на рис.3 а-в.

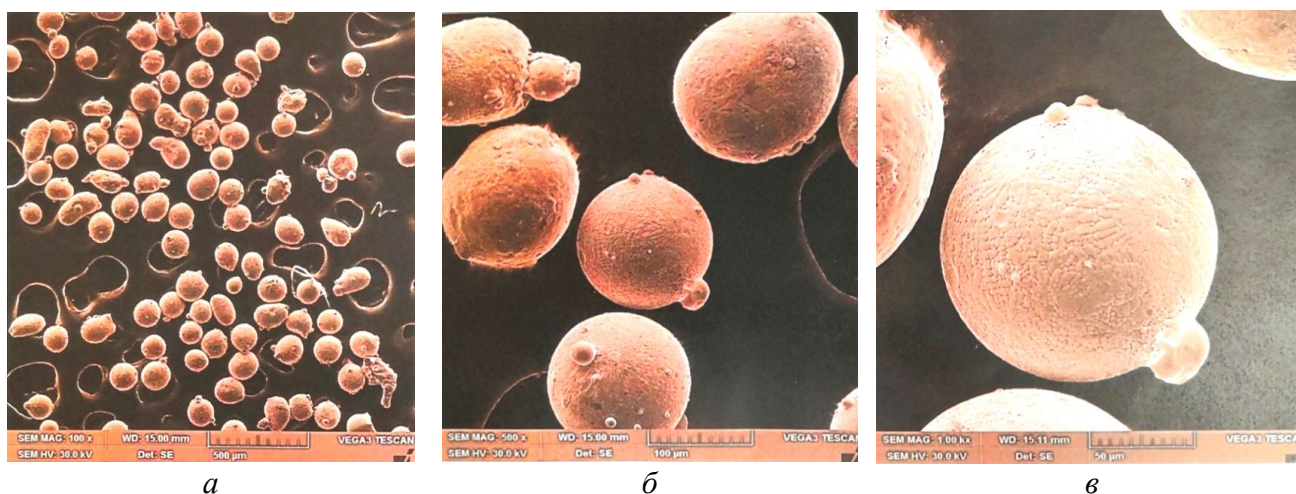


Рис.3. Морфология МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ: а – х100; б – х500; в – х1000

Согласно ГОСТ 57556-2017 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний» такие дефекты как сателлиты и панцирь на поверхности частиц не допускаются.

При микроисследовании МПК из нержавеющей сплава ПР-08Х15Н5ДТ наблюдаются сплавленные частицы в объеме 37% от всей массы (рис. 4 а, б), мелкие частицы, налипающие на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации (сателлиты) (рис. 4, в). Средний размер частиц составляет ~45-69 мкм.

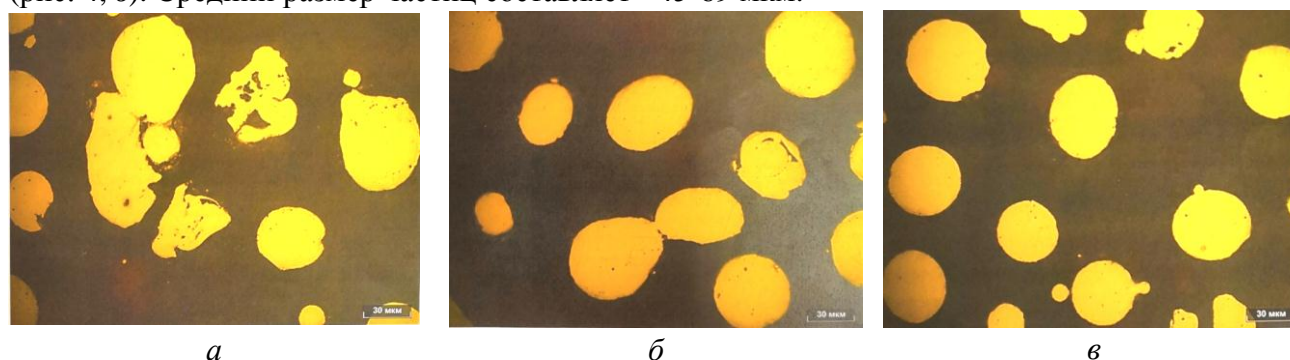


Рис.4. Микроисследование МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ, х500: а, б – участки со сплавленными частицами; в – участок с сателлитами.

При микроисследовании МПК из жаропрочного сплава ПР-ХН55В5МБТЮ также наблюдаются сплавленные частицы в объеме 12% от всей массы (рис.5, а) и частично присутствуют сателлиты (рис.5, б). Средний размер частиц составляет ~42-62мкм.

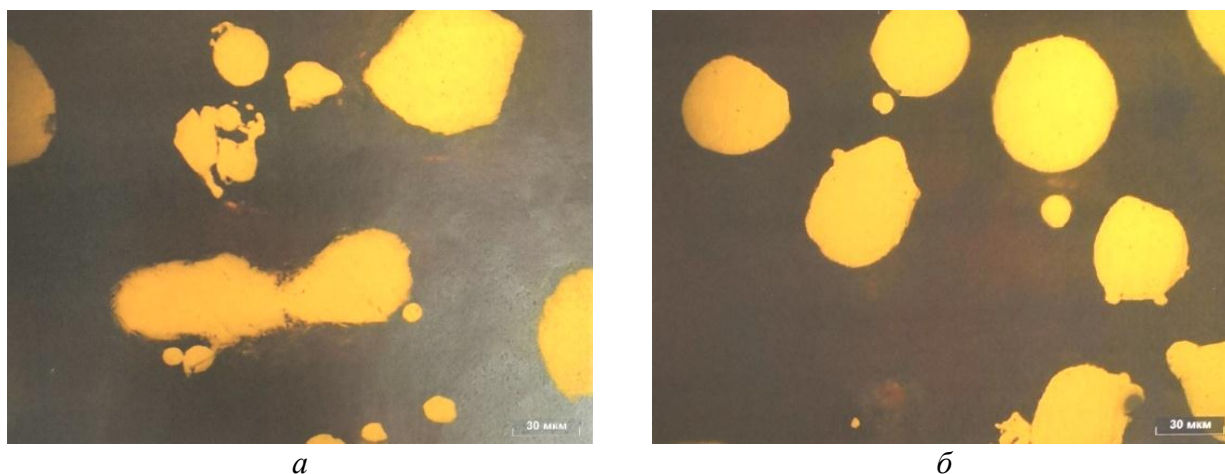


Рис.5. Микроисследование МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ, х500: а – участок со сплавленными частицами; б – участок с сателлитами.

Поры в микроструктуре частиц всех марок материала отсутствуют. Результаты микроспектрального анализа представлены в табл. 1,2.

Таблица 1. Результаты микроспектрального анализа МПК ПР-08Х15Н5ДТ

Массовая доля, %						
Fe - основа	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu
ТТ 08-322-2017	0,44	0,96	15,58	4,67	0,95	1,11
	≤0,80	≤1,0	14,0-16,0	4,0-6,0	0,20-1,0	1,0-2,0

Таблица 2. Результаты микроспектрального анализа МПК ПР-ХН55В5МБТЮ

Массовая доля, %									
Ni - основа	Si	Mn	Cr	Ti	Al	W	Mo	Nb	Fe
	Н.д.	0,3	35,0	0,86	0,6	5,18	3,09	Н.д.	3,98
ТТ 08-323-2017	≤0,40	≤0,5	32,0- 35,0	0,50-1,10	0,50-1,10	4,30-5,30	2,30-3,30	0,5-1,10	≤4,0

По результатам микроспектрального анализа химический состав МПК из нержавеющей ПР-08Х15Н5ДТ и жаропрочного ПР-ХН55В5МБТЮ сплавов по проверенным данным соответствуют требованиям, указанным в технических требованиях.

Результаты определения зернового состава представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты определения зернового состава металлопорошковых композиций

МПК	Зерновой состав порошков			
	Остаток на сите 016	Остаток на сите 014	Остаток на сите 004	Остаток на поддоне
ПР-08Х15Н5ДТ	0,00	8,10	90,60	0,50
ПР-ХН55В5МБТЮ	0,00	13,0	86,00	0,40

Размер частиц основной фракции 40-150мкм. Допускаемые отклонения от основной фракции: плюсовая фракция — не более 5 %, минусовая фракция — не более 10 %.

Режимы прямого лазерного выращивания МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ представлены в табл. 4.

Таблица 4. Режимы прямого лазерного выращивания из МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ

Параметр режима лазерного сплавления	Значение параметра лазерного сплавления						
	Обр. №3	Обр. №2	Обр. №7	Обр. №6	Обр. №5	Обр. №4	
Мощность лазерного излучения, Вт	1850	1750	1500	1300	1100	900	
Диаметр пятна лазерного излучения, мм	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
Скорость наплавки, мм/с	15	35	18	18	15	15	
Подача порошка:	вращение диска, %	40	100	95	95	80	100
	перемешивание, %	40	40	40	40	40	40
	Расход транспортирующего газа Ar, л/мин	10	10	10	10	10	10
Расход защитного газа Ar, л/мин	13	13	13	13	13	13	

ПЛВ производилось с локальной защитой через наплавочное сопло. При металлографическом исследовании выращенных образцов из МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ установлено:

- по длине образцов структура наплавленного материала достаточно однородна;
- на всех образцах обнаружены поры, микрорыхлота, несплавления, расположенные как по границе сплавления валиков, так и в материале валиков. Наименьшее количество и размер несплошностей наблюдается на образцах №3 и 7, наибольшее - на образце №4 (Рис.6);

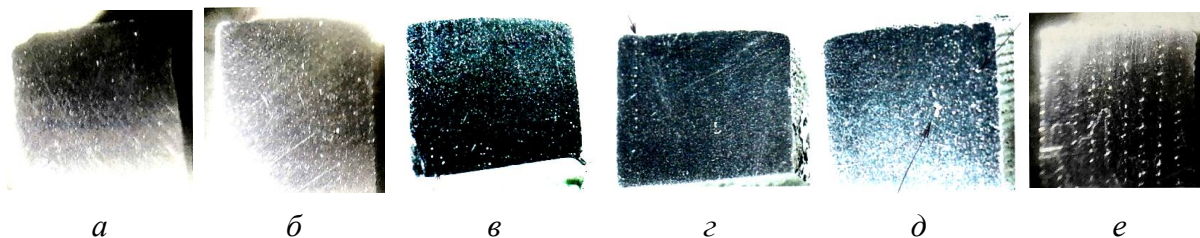
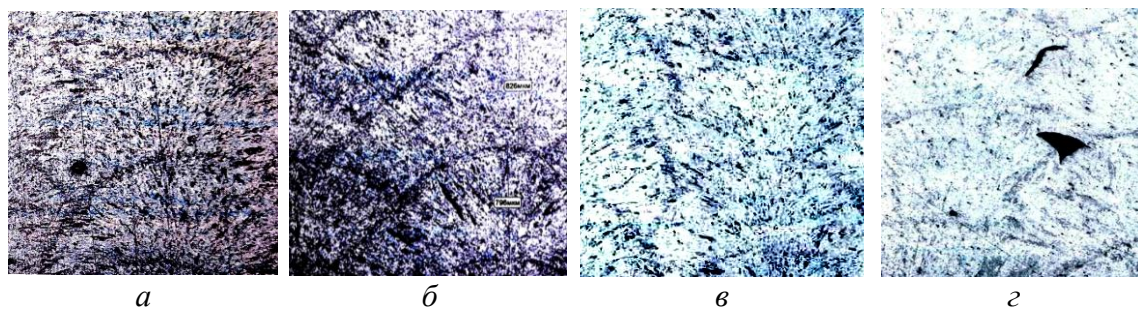


Рис. 6. Пористость материала образцов после ПЛВ из МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ, х2:
а – образец №3, *б* – образец №2, *в* – образец №7, *г* – образец №6, *д* – образец №5,
е – образец №4.

- на образце №3 наблюдаются единичные поры и микрорыхлоты размером 0,015...0,096мм (рис.7, *а*);



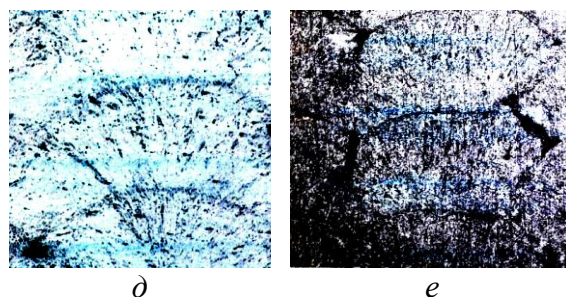


Рис. 7. Микроструктура образцов после ПЛВ из МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ, х25:
a – образец №3, *б* – образец №2, *в* – образец №7, *г* – образец №6, *д* – образец №5,
е – образец №4

- на образце №2 (рис.7 *б*) имеются множественные несплошности в виде пор и микрорыхлоты размером 0,015...0,38мм и обнаружено единичное несплавление длиной 0,15мм. В образце обнаружены также локальные участки инородного материала размером Ø0,08мм, 0,07x0,15мм и 0,16x0,19мм;

- в образце №7 мелкая пористость у верхней поверхности наблюдается только в крайнем сечении;

- в образце №6 в крайнем сечении обнаружена рыхлота размером 0,3x0,7мм, расположенная в центральной части образца ближе к основанию на расстоянии 9мм от верхней поверхности. Мелкая пористость имеется с одного края на всю высоту образца в двух исследуемых сечениях;

- в образце №5 в центральном сечении имеется рыхлота размером 0,4x1мм, расположенная в центральной зоне на расстоянии 6,5мм от верхней поверхности. Наблюдается мелкая пористость с одной стороны образца по всем исследуемым сечениям;

- на образце №4 (рис.7 *е*) наблюдаются множественные несплошности в виде пор, микрорыхлоты, несплавлений, расположенные практически по каждому ряду валиков и по высоте, и по ширине образца. Размер несплошностей составляет 0,040...0,51 мм;

По местам инородных включений был проведен микроспектральный анализ и картирование. При картировании дефектных мест наблюдается коагуляция Ti в местах непроплава (рис.8).

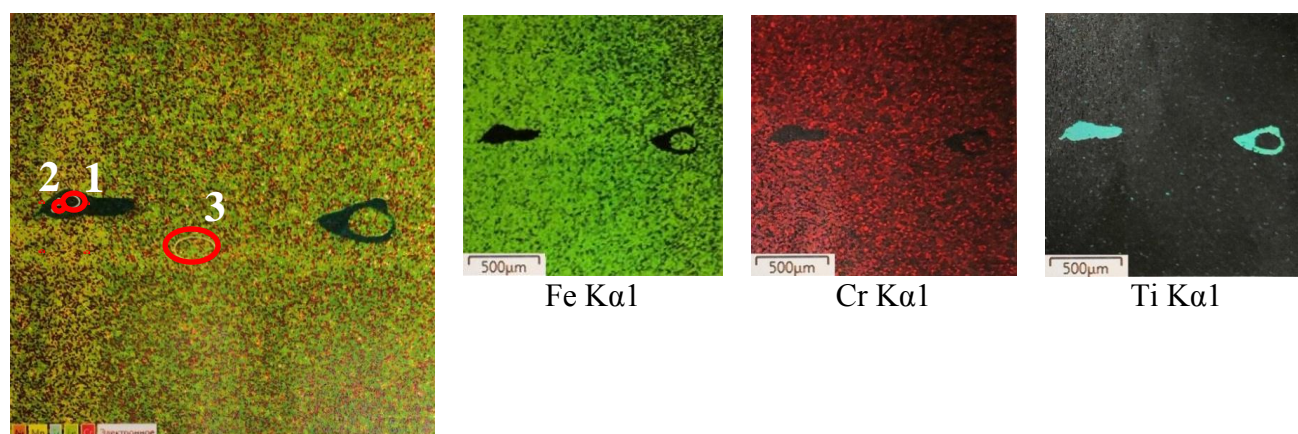


Рис.8. Картирование дефектных мест

Таблица 5. Картирование дефектных мест

Спектр 1	Вес. %	Спектр 2	Вес. %	Спектр 3	Вес. %
O	31,93	N	6,17	Si	0,56
Al	1	O	28,65	Ti	0,95
Ca	0,37	Al	0,54	Cr	15,79
Ti	61,32	Ca	0,13	Mn	0,7

Cr	2,82	Ti	59,86	Fe	75,69
Mn	0,55	Cr	2,59	Ni	4,96
Fe	1,48	Mn	0,61	Cu	1,35
Zr	0,53	Fe	1,44	Сумма:	100
Сумма:	100	Сумма:	100		

Из табл. 5 видно, что инородные включения – это, возможно, расплавленные частицы МПК из сплава на основе титана, попавшего при плохой очистке камеры при смене материала распыления.

Вид и максимальный размер дефектов, обнаруженных на образцах, приведены в табл. 6.

Таблица 6. Вид и максимальный размер дефектов

№ образца	Максимальный размер дефекта, мм		
	пора, \varnothing	несплавление	инородное включение
3	0,015...0,096	-	-
2	-	0,15	$\varnothing 0,8$ 0,07x0,15 0,16x0,19
7	0,098	-	0,08x0,28 0,09x0,11
6	0,056	0,1	0,01x0,15
5	0,096	0,2	0,04x0,16
4	-	0,040...0,51	-

Полученные оценочные результаты определения химического состава представлены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты определения химического состава выращенных образцов из МПК марки ПР-08Х15Н5ДТ

№ образца	Химический элемент, %									
	Fe	Cr	Ni	Cu	Mn	Ti	Si	Al	Mo	V
3	75,8	15,1	5	1,2	0,7	0,6	0,6	0,9	0,1	0,1
2	76	15	4,9	1,2	0,7	0,6	0,6	0,5	0,1	0,1
7	76	15,2	5	1,2	0,7	0,65	0,6	0,7	0,1	0,1
6	76	15,1	4,9	1,2	0,7	0,65	0,6	0,7	0,1	0,1
5	76	15,2	5	1,2	0,7	0,6	0,6	0,4	0,1	0,1
4	76	15	5	1,2	0,8	0,7	0,6	0,6	0,1	0,1
ТТ 08-322-2017	Основа	14,0-16,0	4,0-6,0	1,0-2,0	$\leq 0,8$	0,2-1,0	$\leq 0,8$	-	-	-

Режимы ПЛВ из МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ представлены в табл. 8.

Таблица 8. Режимы ПЛВ из МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ

Параметр режима лазерного спекания	Значение параметра лазерного спекания				
	Обр.4	Обр.3	Обр.1	Обр.2	Обр.5
Мощность лазерного излучения, Вт	1600	1400	1200	1000	800
Диаметр пятна лазерного излучения, мм	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Скорость наплавки, мм/с	12	10	10	8	8
Подача вращения диска (D), %	90...100	95	95...100	95	100

порошка:	перемешивание (S), %	40	40	40	40	60
	Расход транспортирующего газа Ar, л/мин	10	10	10	10	10
Расход защитного газа Ar, л/мин		13	13	13	13	13

Макроструктура и микроструктура выращенных образцов приведена на рис. 9, 10.

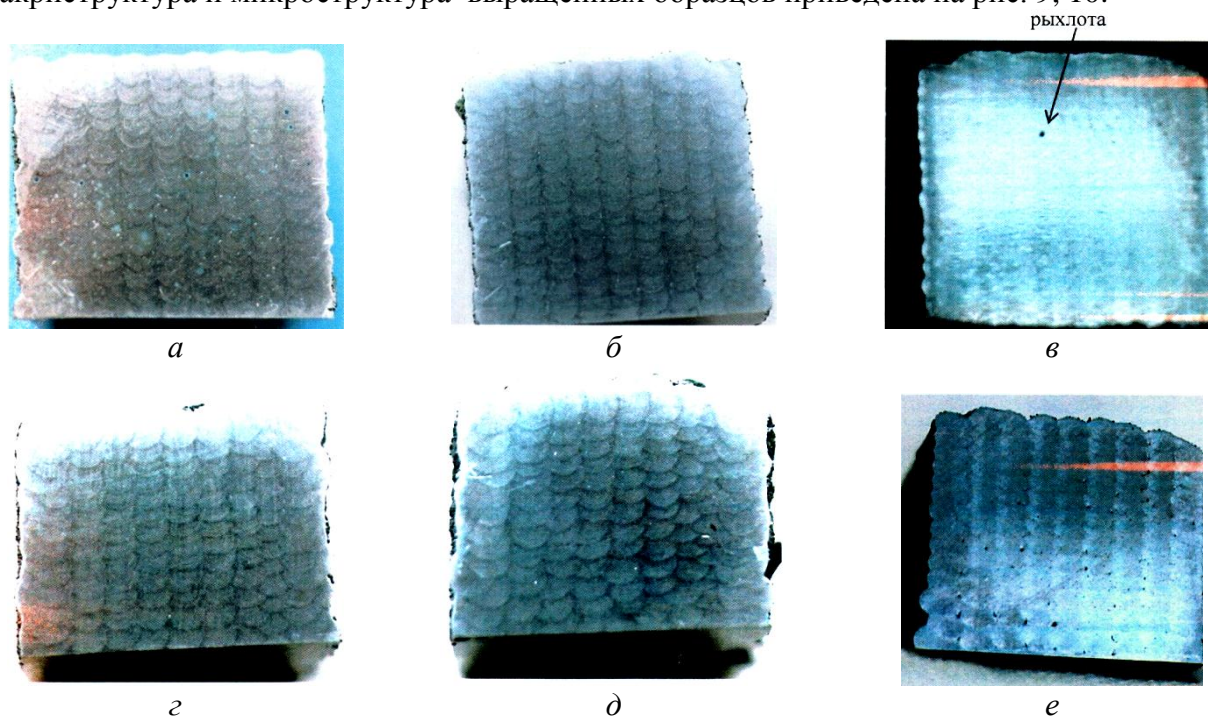


Рис.9. Макроструктура образцов после ПЛВ из МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ в поперечном сечении, х3: *а* – образец №1, *б* – образец №2, *в* – образец №2(крайнее сечение), *г* – образец №3, *д* – образец №4, *е* – образец №5

При анализе макро- и микроструктуры установлено:

- по длине образцов микроструктура наплавленного материала однородна. Четкой границы между наплавленными валиками не наблюдается;
- в материале образцов №1,2,3,4 имеются единичные поры размером до 0,07мм, несплавления, в основном, до 0,11мм (рис. 9, *а-д*).

В крайнем сечении образца №2 имеется рыхлота размером 0,19x0,27мм (рис.9, *в*, рис.10, *б*). В крайнем сечении образца №4 обнаружен единичный спай длиной 0,9мм, расположенный на расстоянии ~2мм от верхней поверхности;

- в материале образца №5 имеются поры размером до 0,09мм, спаи длиной до 0,36мм и множественные участки с микрорыхлотой, имеющей максимальный размер 0,13x0,37мм (рис.10, *г*).

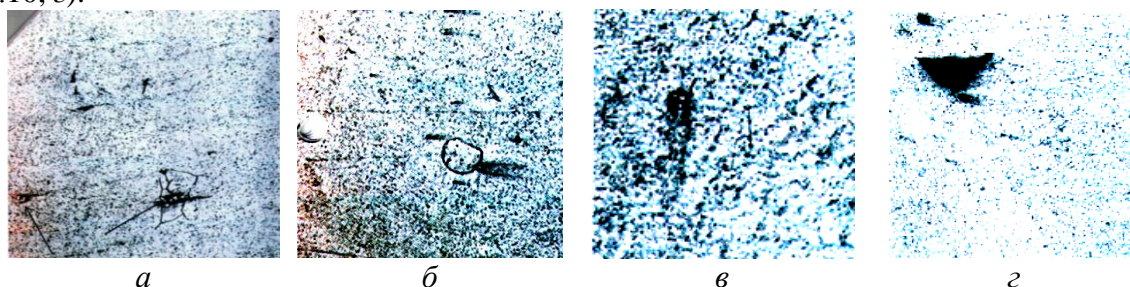


Рис. 10. Микроструктура образцов после ПЛВ из МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ, х200: *а* – образец №1, *б* – образец №2, *в* – образец №4, *г* – образец №5

Полученные оценочные результаты определения химического состава выращенных образцов представлены в табл. 9.

Таблица 9. Результаты определения химического состава выращенных образцов из МПК марки ПР-ХН55В5МБТЮ

№ обр.	Химический элемент, %									
	Ni	Cr	W	Mo	Fe	Al	Ti	Nb	Mn	Si
1	основа	31,8	4,1	2,8	4,9	1,0	0,9	0,7	0,3	0,4
2	основа	32	4,15	2,9	3,2	1,5	0,95	0,7	0,3	0,4
3	основа	31,2	3,9	2,7	6,8	1,5	0,9	0,65	0,35	0,45
4	основа	31,4	4,0	2,8	6,2	1,2	0,9	0,7	0,3	0,3
5	основа	32,1	4,15	2,9	2,5	1,1	0,9	0,7	0,35	0,3
ТТ 08-323-2017	основа	32,0-35,0	4,30-5,30	2,30-3,30	≤4,0	0,50-1,10	0,50-1,10	0,5-1,10	≤0,5	≤0,40

При анализе полученных данных установлено, что в химическом составе материала образцов после ПЛВ обнаружено существенное отличие от данных технических требований по содержанию железа (Fe) у образцов №3,4.

Выводы: На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Все металлопорошковые композиции имеют сферическую форму и, несмотря на наличие сателлитов на поверхности частиц порошка, не допустимых по ГОСТ 57556-2017, процесс выращивания идет стабильно. При этом фракция исследованных порошков соответствует техническим требованиям 40-150 мкм.

2. По результатам микроспектрального анализа установлено, что химические составы порошков из нержавеющей сплава ПР-08Х15Н5ДТ и жаропрочного сплава ПР-ХН55В5МБТЮ соответствуют техническим требованиям.

3. По длине полученных прямым лазерным выращиванием образцов структура наплавленного материала однородна. Однако, в материале выращенных образцов наблюдаются поры и микрорыхлоты, расположенные как по границе сплавления, так и в материале валиков.

4. На основе исследования макро-и микроструктуры наплавленных материалов подобраны наиболее оптимальные режимы лазерного выращивания из представленных МПК. Для нержавеющей сплава ПР-08Х15Н5ДТ это режим, использованный для образца №7 (мощность ЛИ 1,5 кВт и скорость наплавки 18 мм/с). В этом случае в зоне наплавки образуется наименьшее количество дефектов. При выращивании из МПК жаропрочного сплава ПР-ХН55В5МБТЮ оптимальным является режим, использованный для образца №2 (мощность ЛИ 1 кВт и скорость наплавки 8 мм/с).

5. Для качественного выращивания деталей с использованием МПК из сплавов ПР-08Х15Н5ДТ и ПР-ХН55В5МБТЮ требуются дальнейшие исследования свойств материалов, полученных по технологии ПЛВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / ФГАОУ ВО СПбГПУ. СПб. 2013. 222 с.
2. Pinkerton A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition // Journal of Laser Applications, 2015. Vol. 27, N S1. S15001.