

- Приемлемой дистанцией наплавки, с точки зрения наивысшей микротвердости следует считать дистанцию наплавки 10 мм.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при нанесении мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки.

#### Список литературы

1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski , A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45.
2. Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel/ A.Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski// Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27-43.
3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. - P. 64-79.
4. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С.664.
5. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - С. 424..

### МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ

*Н.А. Сапрыкина, к.т.н. доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц.*

*Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета,  
652055, Кемеровская область, г.Юрга, Ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 7-77-61  
e-mail: [saprikina@tpu.ru](mailto:saprikina@tpu.ru)*

**Аннотация:**Метод селективного лазерного плавления (SLS) позволяет послойно получать изделия любой сложности из металлических порошковых материалов на основе 3D CAD- модели с хорошими механическими свойствами. Номенклатура применяемых порошковых материалов и область применения постоянно увеличивается. Несмотря на преимущества технологии селективного лазерного плавления создание качественных деталей является сложным процессом. Внедрение нового материала сопровождается большим количеством исследований по определению условий селективного лазерного плавления. Фактором, сдерживающим применение различных металлов и сплавов, является наличие дефектов в получаемом изделии. В данной статье рассмотрен механизм образования разбрызгивания с точки зрения внешнего вида и композиций при плавлении медного и кобальт-хром-молибденового порошковых материалов, изучено влияние мощности лазерного излучения на диаметр коагулированных частиц при плавлении кобальт-хром-молибденового порошка. Показано, что с увеличением мощности до 60 Вт, при скорости сканирования 360 мм/мин размер коагулированных частиц увеличивается до 350 мкм. Понимание процесса образования брызг полезно для производства высококачественных изделий методом SLS.

The method of selective laser melting (SLS) allows to obtain products of any complexity from metal powder materials on the basis of 3D CAD - model with good mechanical properties. The range of powder materials used and the scope of application is constantly increasing. Despite the advantages of selective laser melting technology, creating high-quality parts is a complex process. The introduction of the new material is accompanied by a large number of studies to determine the conditions of selective laser melting. A factor hindering the use of various metals and alloys is the presence of defects in the resulting product. This article describes the mechanism of formation of spraying in terms of appearance and compositions in the melting of copper and cobalt-chromium-molybdenum powder materials, studied the effect of laser radiation power on the diameter of coagulated particles in the melting of cobalt-chromium-molybdenum powder. It is shown that the coagulated particle size increases to 350 microns with the scanning speed of 360 mm/min with the power increase to 60 W. Understanding the spray formation process is useful for producing high quality products using the SLS method.

Аддитивные технологии являются самыми быстро развивающимися передовыми технологиями в мире. Инновационным является метод селективного лазерного плавления физической копии различных объектов из металлических порошковых материалов на основе 3D CAD-модели. Объемное изделие образовывается путем послойного плавления порошкового материала лучом лазера в соответствии с контуром каждого сечения. Учеными проводятся работы по повышению качества

формируемого изделия и внедрения новых порошковых материалов и их композиций, можно выделить порядка 130 параметров, влияющих на конечный результат. Получение поверхности хорошего качества является главным вопросом для предотвращения расслаивания, остаточных напряжений, преждевременного разрушения.

Исследования в области SLM в основном сосредоточены на различных материалах и свойствах [1, 2, 3], физических явлениях [4], и образовании дефектов во время плавления порошка [5]. Многие исследовательские работы сосредоточены на разбрызгивании, которое зависит от большого количества факторов, возникающих в процессе изготовления SLM. Технология включает в себя сложные процессы плавления и застывания материала, динамику, теплопередачу и т.д. Поэтому возникает сложность в определении механизма разбрызгивания. В [6] были выделены два типа разбрызгивания: разбрызгивание капель, возникающее при разрыве расплавленного металла и разбрызгивание порошка, возникающее в результате удара металлических паров. Было исследовано влияние энергии на поведение брызг при плавлении порошка нержавеющей стали 316L. Результаты показывают, что энергетический вклад влияет на размер, состояние рассеяния и высоту струи брызг. После выполнения микроструктурного анализа и испытания на прочность было обнаружено, что разбрызгивание сильно ухудшает качество деталей, изготовленной методом SLM.

При селективном лазерном плавлении поверхность образуется плавлением металлического порошкового материала под действием интенсивного лазерного воздействия. Проблемами изготовления методом SLS является быстрое застывание металла после плавления, сложный процесс теплопроводности, поверхностное натяжение и вязкость материала сопровождается нестабильным поведением расплавленного металла в процессе формирования поверхности. Это влияет на стабильность процесса изготовления и качество изготовленных изделий [7]. Выделено несколько типов формирования расплавленного материала (рис. 1):

1. Укладывается в расплавленные треки вдоль перемещения луча лазера,
2. Создаются коагулированные частицы,
3. Формируется в частички неопределенной формы в процессе застывания.

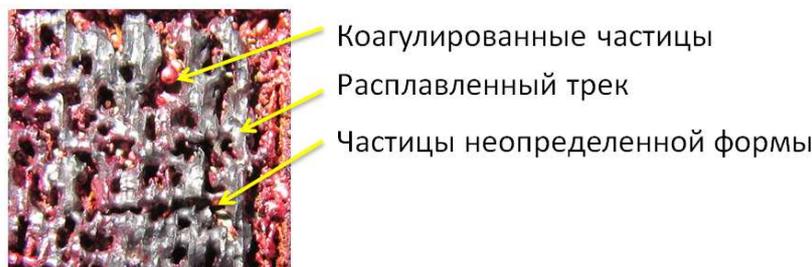


Рис. 1. Расплавленный слой порошка меди

Вытеснение расплава при лазерном воздействии происходит, в основном под действием давления отдачи, вызванного активным испарением и эффектом Марангони. Оба этих эффекта возникают из-за неоднородного распределения энергии в расплавляемой поверхности. Вытеснение расплава давлением обусловлено пространственным изменением напряжения под действием возникающего давления внутри лазерного пятна. В процессе вытеснения образуются капли расплава, которые при затвердевании принимают неопределенную форму размером гораздо больше, чем первоначальный размер порошка. Застывшие капли, попадая на плавящуюся поверхность, влияют на конечные свойства, включая плотность, микроструктуру, механические свойства и на неравномерность нанесения следующего слоя порошка. Только некоторые капли размером больше заданной толщины слоя способны расплавиться при формировании следующего слоя лазерным сканированием.

Под действием поверхностного натяжения жидкий металл стремится уменьшить свободную поверхностную энергию путем образования коагулированных частиц сферической формы. При сильных конвективных потоках расплавленный трек распадается на отдельные капли. Капля расплава затягивает в себя близлежащие частицы порошка, что приводит к образованию впадины вокруг капли и увеличению пористости.

Формирование качественных расплавленных треков и снижение каплеобразования связана с поиском оптимальных режимов плавления. Проведен эксперимент по влиянию режимов плавления на размер коагулированных частиц из кобальт-хром-молибденового порошка. Размер исходного порошка лежит в диапазоне 60 – 100 мкм. В процессе эксперимента лазерный луч перемещался вдоль свободно насыпанной порошковой смеси толщиной около 10 мм, со скоростями 360 мм/мин, 900 мм/мин и 1500 мм/мин. Эксперимент проведен с разным диаметром фокусировки пятна лазера 0,15 мм; 0,37 мм; 0,75 мм. Мощность лазерного излучения варьировалась от 10 до 70 Вт. Для предотвращения окислительных процессов при нагреве была предусмотрена подача аргона. При спекании порошкового материала на воздухе коагулированные частицы окрашивались в зеленый цвет, что показывало на появление оксида хрома. На рисунке 2 показано влияние режимов плавления на внешний вид коагулированных частиц кобальт-хром-молибденового порошка. Плавление кобальт-хром-молибденового порошка характеризуется ярко выраженным процессом образования коагулированных частиц.

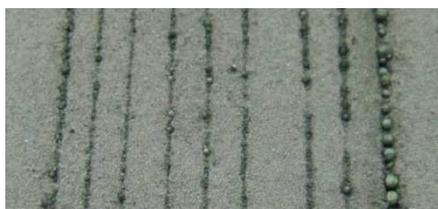


Рис. 2. Фотография спеченных треков на разных режимах (x2)

По результатам эксперимента определен диаметр коагулированных частиц при изменении мощности и скорости перемещения лазера, рисунок 3. Графические зависимости показывают, что увеличение мощности и снижение скорости перемещения лазера приводит к росту диаметра коагулированных частиц.

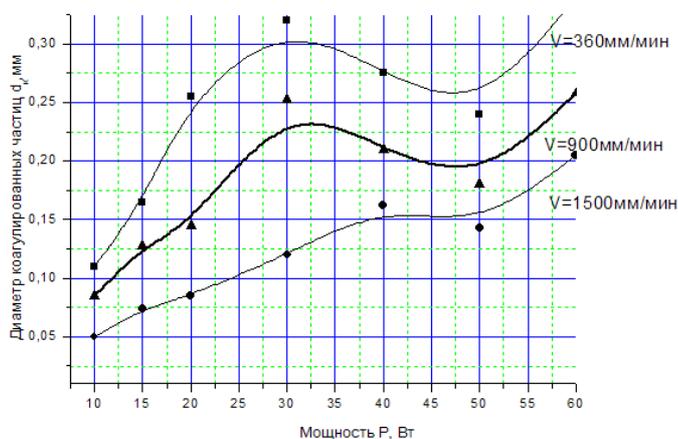


Рис. 3. Влияние мощности  $P$  и скорости перемещения луча лазера  $V$  на диаметр коагулированных частиц при  $t=26^{\circ}\text{C}$ , диаметре пятна лазера  $d=0,37\text{ мм}$

Таким образом, рассмотрено формирование разного типа расплавленного материала при селективном лазерном плавлении. Экспериментально обнаружено явление коагуляции при спекании порошковой кобальтхроммолибденовой композиции, которой можно управлять, изменяя параметры режимов спекания. Уменьшению диаметра коагулированных частиц способствует спекание в защитной среде аргона, подогрев порошкового материала, увеличение диаметра фокусировки пятна лазера, изменение скорости перемещения и мощности лазера. В отличие от рассмотренного порошкового материала плавление медного порошка характеризуется формированием более ровной поверхности.

#### Список литературы

1. A. Takaichi, T. Nakamoto, N. Joko, et al., Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications[J], J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 21 (2013) 67–76.

2. B. Song, S. Dong, B. Zhang, et al., Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J], Mater. Des. 35 (2012) 120–125.
3. D. Dai, D. Gu, Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper-matrix composites: simulation and experiments[J], Mater. Des. 55 (2014) 482–491.
4. A. Simchi, Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features[J], Mater. Sci. Eng. A 428 (1) (2006) 148–158.
5. S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, et al., On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance[J], Int. J. Fatigue 48 (2013) 300–307.
6. Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, et al., Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316 L stainless steel powder[J], Mater. Des. 87 (2015) 797–806.
7. S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, et al., Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J], Acta Mater. 108 (2016) 36–45.

### ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ФРЕЗАМИ С ВОЛНООБРАЗНЫМИ ЛЕЗВИЯМИ

*Г.И.Коровин<sup>1</sup>, С. И. Петрушин<sup>2</sup>, д.т.н., проф., Р.Х. Губайдулина<sup>2</sup>, к.т.н., доц.*

*<sup>1</sup>Промышленная компания МИОН,*

*634034, г. Томск, ул. Вершинина 46/6, Тел: (3822) 99-65-01; 21-30-37*

*<sup>2</sup>Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета*

*652050, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (8384-51)7-77-61*

*E-mail: [korovin9@yandex.ru](mailto:korovin9@yandex.ru), [victory\\_28@mail.ru](mailto:victory_28@mail.ru).*

В работе показано, что обработка титановых сплавов представляет собой наиболее сложную задачу в обработке металлов резанием. Ведущие фирмы мира занимаются этой проблемой, так как титановые сплавы являются основой авиакосмической промышленности. В работе исследованы быстрорежущие фрезы для обработки титановых сплавов, имеющие волнообразную режущую кромку на зубе. Следующий зуб фрезы сдвинут на полшага. Это приводит к уменьшению силовой нагрузки наклепа обработанной поверхности. Предложена аналитическая методика анализа подобных фрез. Установлено на основе проведения силовых и стойкостных исследований волновых фрез их преимущество по сравнению со стандартными, а именно, они имеют меньшую удельную силовую нагрузку, большую стойкость и меньший наклеп поверхностного слоя.

Титановые сплавы, наряду с высокой прочностью и низким удельным весом, обладают значительно пониженной обрабатываемостью резанием [1]. Основная причина низкой обрабатываемости связана с упрочнением (наклёпом) поверхностного слоя в процессе резания [2], когда лезвие инструмента срезает стружку не с основного металла, а с уже упрочнённой предыдущими лезвиями поверхности. Особенно это актуально для зубьев фрез, которые начинают резать с нулевой толщины срезаемого слоя [3].

В настоящее время содержание титановых сплавов в конструкциях современной авиации составляет около 15% [4]. При этом большая часть изделий обладает сложной пространственной формой, имеет множество карманов и тонких стенок, например, стойки шасси самолетов. В результате при обработке резанием в стружку может уходить до 90% обрабатываемого металла, а операции чернового и чистового фрезерования занимают 60-80 % от всей трудоемкости механической обработки. Коэффициент относительной обрабатываемости по отношению к стали 45 в зависимости от марки титанового сплава составляет 0,2 – 0,45. Поэтому, совершенствование режущего инструмента для обработки титановых сплавов представляет собой актуальную задачу.

Наиболее крупными производителями, специализирующихся на производстве фрез для обработки титановых сплавов, являются следующие компании: Minicut International Inc. (Канада), Hanita metal works (Израиль), Melin Tool Company (США), Dauphin Precision Tool (США), ООО «ПК МИОН» (Россия) и др. Так фрезы LIST M фирмы Minicut, предназначенные для черновой обработки титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, имеют заднюю поверхность с выкружками, чередующимися в шахматном порядке от зуба к зубу, что обеспечивает деление срезаемого