

УДК.621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СТАЛИ И ТiC В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Колчанова Анна Владимировна⁽¹⁾, Колчанов Дмитрий Сергеевич⁽²⁾

*Аспирант 2 года⁽¹⁾, доцент⁽²⁾,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана*

*Научный руководитель: А.Г. Григорьянц,
доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении»*

Аддитивные технологии в настоящее время проникают во все отрасли машиностроения и представляют большой интерес в научной среде [1-7]. Селективное лазерное плавление (СЛП) позволяет послойно выращивать функциональные изделия сложной формы из металлов и сплавов, что открывает широкие возможности по внедрению данной технологии. В качестве сырья в данной технологии используется порошковый материал с размером частиц 10-50 мкм. Важным следствием является возможность смешивать порошки различного химического состава для получения новых композиционных материалов. Изделие выращивается из формирующегося в процессе композита. Большой интерес представляют металло-матричные композиты (ММК) [8-10]., сочетая свойства матрицы и армирующих элементов: теплопроводность, электропроводность, износостойкость, небольшой коэффициент теплового расширения, хорошее демпфирование. ММК на базе стальной матрицы с внедрением TiC позволяют снизить массу выращиваемого изделия с сохранением, а в ряде случаев, с улучшением исходных свойств стали. Механизм формирования композита в процессе СЛП плохо изучен, а его понимание позволит наилучшим образом использовать необходимое сочетание свойства двух материалов.

В работе [11] исследованы режимы обработки композиции Fe-TiC методом коаксиального лазерного плавления (КЛП). Результаты исследования возможно использовать и для процесса СЛП, основываясь на значениях удельной энергии и плотности мощности излучения, как определяющих механизм плавления и застывания факторах. Выявлено два режима обработки композиции. При переходе от 1-го низкоэнергетического ко 2-ому высокоэнергетическому режиму, т.е. при увеличении лазерной мощности и снижении расхода порошка частицы карбида титана растворяются частично или полностью и по всему объему выделяется упрочняющая фаза разного типа.

Локальная защита процесса не позволяет избежать окисления некоторых легирующих элементов и образования оксидов железа, негативно влияющих на конечные свойства изделия. Процесс селективного лазерного плавления происходит в защитной среде, что позволит избежать данного эффекта.

При СЛП важную роль играет стратегия обхода лазерным лучом слоя порошка. В работе [12] рассмотрены несколько стратегий сканирования, в том числе обработка

слоя двумя сонаправленными проходами лазера и двумя взаимно перпендикулярными проходами в пределах одного слоя. В случае одинарного прохода с поворотом траектории лазера на 90° в последующем слое микроструктура была гомогенной и главным образом состояла из равноосных зерен размером менее 2 мкм. В случае двойного прохода образована структура затвердевания, состоящая из ячеистых дендритов, смешанных с равноосными зернами. В обоих случаях наночастицы TiC присутствовали как внутри, так и на границах зерен.

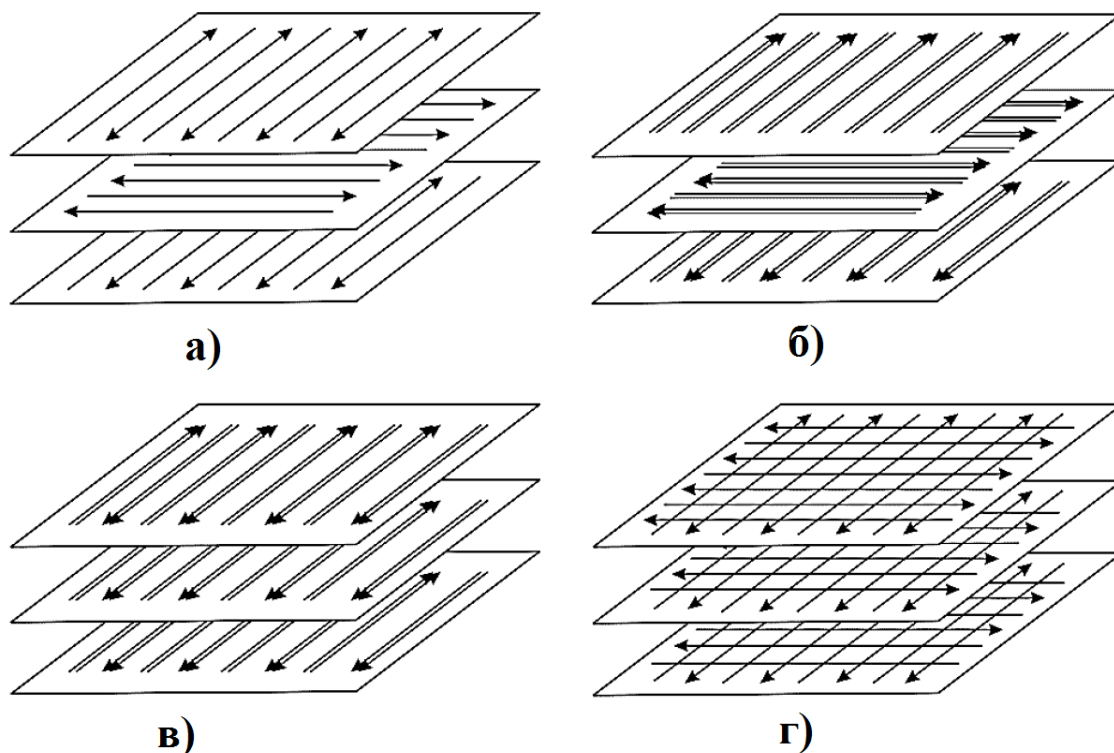


Рис. 1 Стратегии сканирования лазерным лучом: а) однопроходная с поворотом на 90° от слоя к слою; б) двухпроходная с поворотом на 90° от слоя к слою; в) двухпроходная без поворота от слоя к слою, г) двухпроходная с поворотом на 90° в пределах одного слоя.

Ориентация сканирования лазерным лучом оказывала выраженное влияние на плотность образцов, что характерно для процесса СЛП. Переплавление путем повторного лазерного сканирования (рис.1 б-г) формирует однородные и гладкие слои и эффективно уменьшает количество пор, образующихся между соседними ваннами расплава по краям дорожки сканирования. При использовании метода двухпроходного сканирования пустоты между соседними лазерными дорожками в значительной степени залечивались. При двойном сканировании повышается текучесть расплава, а также реологические свойства, что приводит к более однородным и эффективным теплопередаче и массопереносу в расплаве. В целом, стратегии сканирования оказывают влияние на значения твердости. Уровень пористости, измельчение зерна (отношение Холла-Петча) и однородность распределения частиц (большая однородность привела к большему дисперсному упрочнению) играют значительную роль в определении механических свойств изделий, получаемых методом СЛП. Кроме того, двойной переplав приводит к повышению твердости, что обусловлено

дополнительным измельчением зерна композита и улучшением однородности распределения частиц (т. е. эффективным дисперсионным упрочнением), а также увеличением плотности.

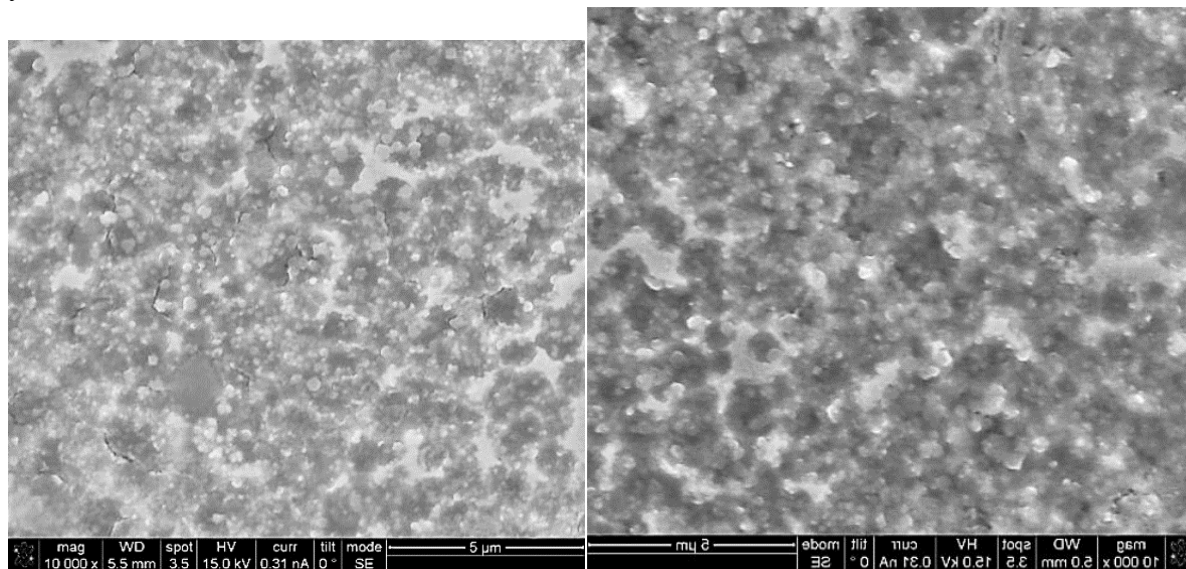


Рис. 2 Травленная микроструктура нанокompозита: Одинарный переплав (слева); двойной переплав (справа) [13].

Исследование [13] показало, что микротвердость композита на основе нержавеющей стали 316L с внедрением 2 % TiC увеличивалась на 13% в сравнении с чистой сталью. Однако увеличение содержания карбида до 4% увеличивала твердость лишь на 8%. Похожая картина наблюдается при исследовании износостойкости и коррозионной стойкости. 2% композиция показала лучшие результаты, чем 4% (снижение коэффициента трения в 3 раза и увеличение на 7,5% соответственно). Стоит отметить, что образцы выращены при повышенной скорости 1200 мм/сек и мощности 200 Вт. На таких режимах растворение карбида не достигается, что может привести к значительному ограничению содержания TiC в композиции. Изучение высокоэнергетических режимов при повышении концентрации карбидов представляет большой интерес для повышения свойств стали при снижении массы.

Большинство работ, посвященных выращиванию методом селективного лазерного плавления композиционных изделий на основе стальной матрицы с армированием TiC рассматривают одну определенную пропорцию составляющих, прослеживают влияние режимов, вводимой энергии и стратегий сканирования на механические и коррозионные свойства образцов. В то же время отсутствует глубокий анализ формирующихся структур, процессы растворения и выпадения карбидов титана, предельные концентрации TiC и их влияние на свойства выращиваемых изделий, тепловые процессы и их влияние на конечный результат выращивания. В литературе рассмотрены различные виды сталей – низко и высоколегированные, но нигде не описано взаимное влияние легирующих элементов и армирующего элемента.

В целом, несмотря на многочисленные исследовательские работы в области производства изделий из металл-матричных композитов с использованием процесса СЛП, существует множество проблем и трудностей:

1. Прежде всего, добавление вторичных фаз может увеличить пористость деталей. Это может быть даже усилено с увеличением размера и доли армирующих элементов. Это происходит вследствие увеличенной вязкости/напряжения расплава из-за присутствия твердых частиц в ванне расплава.
2. Необходим анализ влияния размера и формы армирующих частиц на свойства. Более крупные частицы неправильной формы обычно приводят к меньшему упрочняющему эффекту и более плохому смачиванию. Они также создают больше остаточных напряжений при явлениях уплотнения (разница в тепловых расширениях на границе армирование/матрица приводит к образованию зон остаточных напряжений), ухудшая механические характеристики деталей.
3. Ультрадисперсные, наночастицы и микрочастицы сферической формы могут быть очень дорогими, и их использование обычно требует строгих мер безопасности (так как эти частицы могут быть опасными или реактивными) и налагает экспериментальные трудности (например, достижение однородной порошковой смеси может стать очень трудным).
4. Равномерное включение армирующих элементов в металлическую матрицу является еще одной важной задачей.
5. Межфазная реакция между армирующими частицами и матрицей (которая может быть нежелательной), загрязненные поверхности порошка или плохая смачиваемость между армирующими частицами и матрицей являются другими возможными проблемами, приводя к тому, что вторичные частицы действуют как свободные включения вместо армирования.

Выводы

В соответствии с этими проблемами и трудностями неудивительно, что большинство композитных деталей могут демонстрировать лишь незначительное улучшение или даже ухудшение свойств на растяжение. В результате большинство исследовательских работ сосредоточено только на возможных улучшениях твердости или износостойкости композитов с металлической матрицей, и они избегают обсуждения достижимых свойств при растяжении.

Исследование механизма формирования композита на основе стали и TiC при обработке лазерным лучом в процессе СЛП является актуальной задачей, так как есть предпосылки достигнуть высоких эксплуатационных свойств наряду со снижением веса изделия, что может быть актуальным для авиационной и космической техники.

Список литературы

- 1) Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров, Р.С. Третьяков – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. – 280 с.
- 2) Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур / Григорьянц А.Г. [и др.] Технология Машиностроения. 2015. 10. С. 6-11.

- 3) *Zhao, Z.; Bai, P.; Guan, R.; Murugadoss, V.; Liu, H.; Wang, X.; Guo, Z.* Microstructural evolution and mechanical strengthening mechanism of Mg-3Sn-1Mn-1La alloy after heat treatments. *Mater. Sci. Eng. A* 2018, 734, 200–209.
- 4) *Liu, H.; Sun, F.; Sun, H.* Analysis of microstructure and mechanical properties of ultrafine grained low carbon steel. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2016, 31, 1099–1104.
- 5) *Liu, B.; Bai, P.* Selective Laser Melting Process of Fe-Ni Metal Powder. *Rare Met. Mater. Eng.* 2011, 40, 241–244.
- 6) *Hou, H.; Li, Y.; Xu, X.* Non-equilibrium effects on solid transition of solidification microstructure of deeply undercooled alloys. *Mater. Sci. Technol.* 2017, 34, 1–6.
- 7) *Xu, H.; Deng, X.; Zhang, X.; Zhang, K.; Liu, Y.; Li, S.* Relationship between heat treatment and corrosion behavior of Mg-15Y alloy. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2015, 30, 796–803.
- 8) *Lin, S.; Xiong, W.; Wang, S.* Effect of reinforcing particles content on properties of TiC/316L composites. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, 18, 373–378.
- 9) *AlMangour, B.; Grzesiak, D.; Yang, J.* Nanocrystalline TiC-reinforced H13 steel matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting. *Mater. Des.* 2016, 96, 150–161.
- 10) *AlMangour, B.; Grzesiak, D.; Yang, J.M.* Rapid fabrication of bulk-form TiB₂/316L stainless steel nanocomposites with novel reinforcement architecture and improved performance by selective laser melting. *J. Alloy Compd.* 2016, 680, 480–493.
- 11) *Новиченко Д. Ю., Григорьянц А. Г., Смуров И. Ю.,* Изготовление композиционного материала с металлической матрицей прямым лазерным нанесением, *Технология машиностроения*, 2011 .- № 11 .- С. 14 – 18
- 12) *AlMangour, B.; Grzesiak, D.; Yang, J.M.* Effect of scanning methods in the selective laser melting of 316L/TiC nanocomposites. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium.* 566C.
- 13) *Microstructure and Mechanical Properties of TiC-Reinforced 316L Stainless Steel Composites Fabricated Using Selective Laser Melting.* Zhanyong Zhao, et. al. *Metals* 2019, 9(2), 267C.