

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52

ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Берtrand Ф.¹, Мовчан И.¹, Самодурова М.Н.², Джигун Н.С.²¹ Национальная Инженерная Школа в Сент-Етьенне, Франция² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены основные методы упрочнения поверхности инструмента, а именно штамповой оснастки и валков прокатных станов. Среди различных физических методов именно лазерная наплавка привлекает особое внимание ввиду ряда преимуществ, присущих этой современной технологии. В частности, лазерная наплавка является высокопроизводительным процессом (до 150 см³/ч нанесенного покрытия), в то же время универсальным процессом с точки зрения толщины получаемого покрытия (0,1-1,0 мм) и возможности использования различных материалов, например, сложных сплавов на основе железа, кобальта, никеля и т.д. Данная технология позволяет получать многокомпонентные покрытия, обладающие расширенной функциональностью, например износо-, термо- и ударо-стойкостью. Учитывая вышеперечисленные преимущества процесса, была выдвинута гипотеза о возможности получения покрытия методом лазерной наплавки с высокими физическими свойствами. Цель работы состояла в кратком рассмотрении основных методов повышения механических свойств поверхности, а также в исследовании процесса лазерной наплавки порошка на основе кобальта с добавлением армирующей фазы в качестве прогрессивной и перспективной технологии для повышения эксплуатационных свойств оснастки. В экспериментальной части работы проанализирован процесс лазерной наплавки композиционного металлокерамического покрытия. Получены покрытия, состоящие из матрицы на основе сплава кобальта и армирующей фазы карбида титана. Изучены основные физические свойства полученных покрытий. Применение жаропрочных сплавов на основе кобальта для защиты инструментов горячей штамповки является актуальным, однако промышленное применение весьма ограничено. Очевидно, что данное направление в тематике защиты инструмента является перспективным, но необходимо проведение большого количества экспериментов для оптимизации параметров работы лазерной установки и поиска оптимального состава порошковой смеси.

Ключевые слова: порошковая металлургия, штамповая оснастка, термическая обработка, химико-термическая обработка, лазерная наплавка, стеллит, карбид титана.

Введение

Уменьшение себестоимости выпускаемой продукции – стратегическая цель предприятий в современных условиях рынка. Актуальной задачей для машиностроительных предприятий является увеличение ресурса работы штамповой оснастки. Рабочие части инструмента находятся в условиях повышенного износа, высоких удельных давлений, достигающих 2000–2500 МПа, и температурных перепадов, вызванных процессом деформирования.

Износ рабочих поверхностей трения – одна из основных причин выхода из строя деталей машин. При таком виде изнашивания износостойкость увеличивают или по всему объему, или

только в поверхностном слое. В первом случае при получении более высоких характеристик прочности и твердости материала показатели пластичности снижаются. Во втором случае для повышения механических характеристик необходимо достичь параметров высокой твердости и прочности на небольшую глубину от рабочей поверхности. С точки зрения трибологии, этот путь более рациональный, т.к. нет необходимости повышать твердость по всему объему детали [1].

Целью работы является рассмотрение основных методов повышения механических свойств поверхности, а также исследование процесса лазерной наплавки композиционного материала как прогрессивной и перспективной технологии для повышения эксплуатационных свойств инструмента. Применение жаропрочных сплавов на ос-

© Берtrand Ф., Мовчан И., Самодурова М.Н., Джигун Н.С., 2016

нове кобальта для защиты инструментов горячей штамповки является актуальным, однако промышленное использование весьма ограничено.

Методы повышения ресурса работы штампов можно классифицировать на 5 групп: конструкторские, металловедческие, технологические, эксплуатационные и смешанные. Наиболее значимыми для повышения стойкости штампов являются методы из металловедческой группы, т.е. выбор новых материалов и обработка поверхности штампов [2].

Рассмотрим основные методы повышения стойкости штампов. Цементация (науглероживание) – древнейший процесс химико-термической обработки. Суть процесса заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагревании в определенной среде – карбюризаторе и последующая термическая обработка. Такая сталь обладает высокой износостойкостью и контактной прочностью, которая достигает 2000 МПа. Все основные способы цементации имеют один большой недостаток - длительность процесса и применение сложного оборудования [3, 4].

Другой метод химико-термической обработки – упрочнение поверхности способом борирования, что приводит к повышению твердости (до 1800 HV), износостойкости, коррозионной стойкости, окислостойкости и теплостойкости при толщине слоя 100–200 мкм. Однако бориды хрупки, склонны к сколам и растрескиванию. Высокая хрупкость боридного слоя отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий при контактном износе. При этом борирование повышает износостойкость по сравнению с закаленной и низкоотпущенной сталью [3, 4]. Результаты исследований показывают, что штамповую оснастку можно изготовить из углеродистой стали с использованием борирования поверхности [5].

Известен способ упрочнения поверхности горячепрессового инструмента азотированием. Сталь приобретает высокие характеристики твердости на поверхности, сопротивляемость износу, коррозионную стойкость. Свойства азотированного слоя зависят от химического состава стали, от режимов азотирования, температуры и длительности процесса. Твердость азотированной оснастки достигает 450–1000 HV при глубине слоя 0,15–0,55 мм [6]. Однако процесс длительный, требующий сложного оборудования. Он предусматривает несколько

операций: предварительная термическая обработка, механическая обработка, защита участков, не подлежащих азотированию, непосредственное азотирование, доводка изделия [4].

Отдельно выделим процесс нитроцементации. Другое название – карбонитрация, при котором происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя и углеродом, и азотом в газовой среде. Сущность метода заключается в том, что детали машин подвергают нагреву в расплаве солей при температурах 540–600°C с выдержками 1–6 ч в зависимости от требуемой толщины упрочненного слоя. Основное назначение метода – повышение твердости и износостойкости стальных деталей. Толщина слоя составляет обычно 200–800 мкм. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению [4, 3].

Для ремонта и упрочнения штамповой оснастки также применяют электроэрозионный метод. К достоинствам метода относятся: высокая адгезия, возможность локальной обработки поверхности крупногабаритных изделий, относительная простота процесса, отсутствие жестких требований к подготовке поверхности [7]. В результате химических реакций на поверхности образуются износостойкий слой с высокой твердостью, достигающий 1400 HV. Под этим слоем находится переходной слой с переменной концентрацией легирующих примесей, карбидов и нитридов. Из-за наличия переходного слоя в структуре возможно многослойное упрочнение с образованием разнолегируемых слоев [8]. Область применения электроискрового метода: восстановление изношенных поверхностей штампов и деталей машин; нанесение износостойких, жаропрочных и жаростойких покрытий на поверхности деталей машин. Основными недостатками данного метода является низкая производительность, высокий уровень энергопотребления и ограниченная толщина наносимого слоя (0,1–0,3 мм) [9].

Лазерная закалка находит применение в промышленности для поверхностного упрочнения и повышения износостойкости прокатных валков и штампов. Для закалки применяются CO₂ лазеры, Nd:YAG лазеры, волоконные и диодные лазеры. Высокая плотность мощности излучения обеспечивает чрезвычайно быстрый нагрев поверхностного слоя со скоростями до 10⁵–10⁶ град/с с малой продолжительностью воздействия. Охлаждение

происходит путем отвода тепла в глубинные слои теплопроводностью. Нагрев может выполняться без оплавления или с оплавлением поверхности изделия. Прочность после обработки соответствует верхнему пределу мартенситного превращения, глубина проникновения составляет от 0,1 до 0,2 мм при твердости с 35 до 68. Данный метод значительно повышает твердость поверхностного слоя с сохранением вязкой сердцевины. Основные преимущества процесса: возможность локальной обработки с очень высокой точностью; автоматизация процесса; высокая скорость обработки; отсутствие необходимости в последующей обработке; энергоэффективность процесса; отсутствие оборудования для охлаждения при закалке [10, 11].

К самым прогрессивным методам обработки металлических поверхностей относится метод лазерной наплавки. Лазерная наплавка осуществляется следующим образом. На поверхность детали с помощью сопла и газа носителя направляется поток порошкового материала. Излучение инфракрасного лазера, сфокусированное в пятно с высокой плотностью мощности, плавит порошок и поверхностный слой металлической детали. Лазерная головка, конструктивно объединяющая оптические элементы лазера и сопло (обычно от 4 до 6 для равномерной подачи порошка), перемещается по поверхности детали и создает на ней ленточное покрытие (кордон) шириной 0,5–5 мм и толщиной от 100 мкм до 1 мм за один проход [12]. Физико-химические свойства наплавленного слоя определяются, прежде всего, выбором порошкового материала. Качество же покрытия - однородность, плотность, контакт с поверхностью детали – зависят от целого ряда технологических параметров, как-то плотность мощности в лазерном пятне, массовый расход порошка в струе, скорость сканирования по поверхности. Лазерная наплавка позволяет создавать целый спектр функциональных покрытий, устойчивых к износу, коррозии, окислению при высоких температурах и т.д. [13, 14].

Этот процесс наиболее часто применяется для ремонта и восстановления дорогостоящих деталей, в том числе и компонентов газотурбинных двигателей, а также при создании изделий с уникальными свойствами для оборонно-промышленного комплекса. Интеграция системы автоматизированного проектирования (CAD) позволяет программировать движение лазерной головки, что позволяет наносить покрытия на геометрически сложные криволинейные поверхности [15].

Процесс лазерной наплавки имеет ряд преимуществ перед другими методами. Высокая плотность энергии в пятне нагрева дает возможность наносить покрытия при высоких скоростях перемещения лазера и значительных количествах подаваемого порошка [16], т.е. повышать эффективность процесса наплавки. Оптимизация технологических параметров позволяет минимизировать зону перемешивания материала покрытия с подложкой и зону термического влияния, таким образом контролировать микроструктуру и функциональные свойства покрытия [17, 18].

Экспериментальная часть

Основной идеей данного исследования было изучение возможности наплавки композитного покрытия, состоящего из твердой металлической матрицы, усиленной армирующей керамической фазой, распределенной во всем объеме покрытия.

При проведении экспериментов использовались коммерческие порошки Stellite®6 и карбид титана TiC, которые в пропорции 70/30% по объему (80/20% масс.) перемешивались в механическом устройстве до получения однородной порошковой массы.

Метод производства порошка Stellite®6 – газовое распыление. Частицы порошка Stellite®6 имеют форму, близкую к сферической или эллиптической (рис. 1). Размер частиц порошка составляет от $d_{10}=75$ мкм до $d_{90} = 130$ мкм, средний диаметр $d_{50}= 110$ мкм.

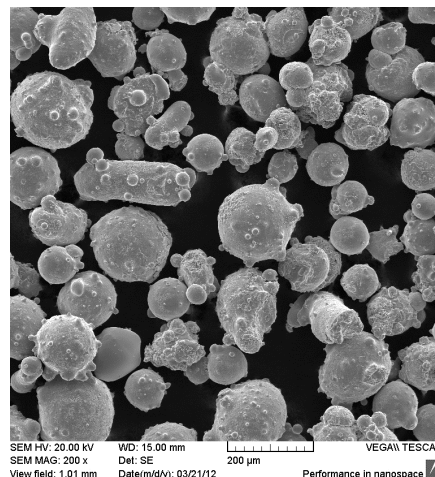


Рис. 1. Типичная форма частиц порошка Stellite®6

Карбид титана получают путем реактивного синтеза титана и избыточного количества графита, затем следует дробление и измельчение. Частицы имеют угловатую нерегулярную форму (рис. 2) с размерами $d_{10}=30$ мкм, $d_{90} = 97$ мкм,

средний диаметр $d_{50} = 70$ мкм. Максимальный размер частиц карбида титана достигал 250 мкм.

Эксперименты проводились в лабораторных условиях на промышленной машине лазерной наплавки, оснащенной CO_2 -лазером с максимальной мощностью 5 кВт. Покрытия наносились на плоские стальные подложки (сталь 45) размером $5 \times 50 \times 15$ мм.

Было проведено несколько серий экспериментов. На начальной стадии было обнаружено, что крупные частицы карбида титана в металлической матрице стеллита приводят к образованию покрытия с сильно неоднородным распределением керамической фазы (рис. 3).

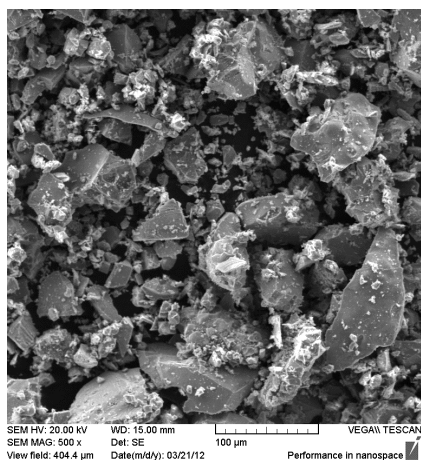


Рис. 2. Типичная форма частиц порошка TiC

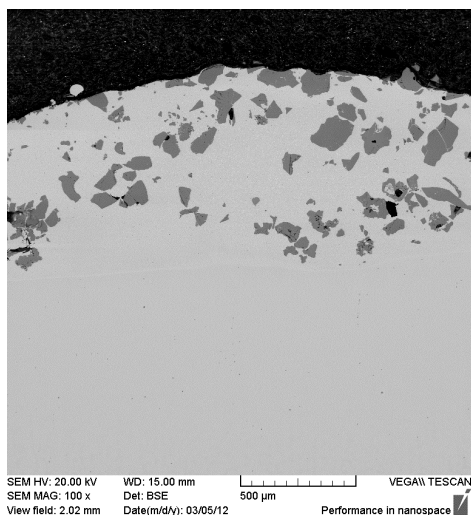


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения кордона Stellite®6+TiC.
Мощность лазера 4,5 кВт,
скорость перемещения пятна 0,45 м/мин

На следующем этапе для повышения степени расплавления карбидов и улучшения однородности покрытия порошок карбида титана

был дополнительно просеян и фракция крупнее 150 мкм удалена.

Вместе с тем для получения расплавленных частиц карбида титана в матрице было решено использовать максимальную мощность лазера, а также уменьшить размер лазерного пятна и тем самым увеличить плотность мощности. Типичная микроструктура кордона представлена ниже (рис. 4).

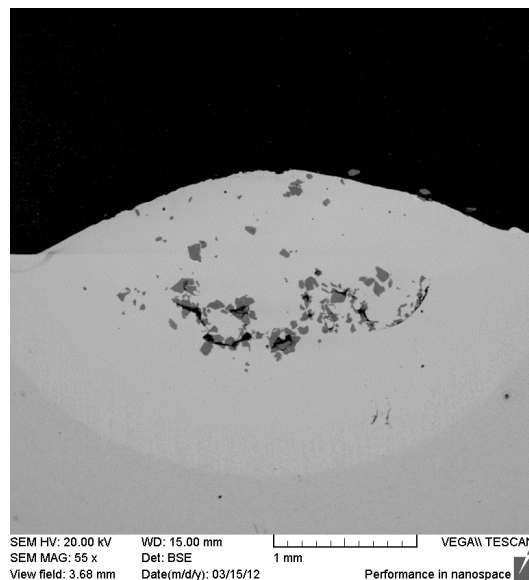


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения кордона Stellite®6+TiC.

Мощность лазера 5,0 кВт, скорость перемещения пятна 0,4 м/мин, меньшая площадь пятна

Видно, что структура наплава остается сильно неоднородной, присутствует значительное количество крупных, по-прежнему не переплавленных частиц TiC. На однородность наплава влияет скорость охлаждения при кристаллизации. В связи с высокой скоростью охлаждения, характерной для лазерной наплавки, перераспределение элементов керамической фазы в расплаве не успевает произойти, происходит сегрегация примесей, в результате чего образуются структуры TiC различных типов.

Видно также, что увеличение мощности привело к значительному увеличению зоны расплава на поверхности подложки. Химический анализ показал высокое содержание железа (26–65%) в матрице покрытия, что говорит об интенсивном перемешивании материала подложки и расплавленного порошка стеллита.

Кроме того, вблизи крупных частиц или агломератов карбида титана заметна значительная пористость. Это связано с большими различиями

в тепловых свойствах TiC и кобальтовой матрицы. Карбид титана обладает низкой теплопроводностью (при 1000°C коэффициент теплопроводности $7,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$), таким образом, чтобы расплавить частицы карбида титана требуется большая мощность. Отсюда следует, что градиент температуры в непосредственной близости от частиц TiC может быть намного выше, чем в зонах, удаленных от крупных частиц TiC.

Для третьей серии экспериментов порошок карбида титана был еще раз просеян, чтобы оставить частицы, не превышающие 100 мкм.

Мощность лазера осталась максимальной – 5 кВт, скорость перемещения лазерного луча варьировалась от 0,3 до 0,5 м/с, а массовая подача порошка – от 0,03 до 0,12 г/мм².

В данном эксперименте было изготовлено 9 образцов при различных технологических параметрах и достигнута цель в получении однородного распределения керамической фазы в металлической матрице, отсутствия трещин и пористости и хорошего металлургического контакта между подложкой и наплавом.

На рис. 5 показана структура кордонов, полученных методом лазерной наплавки.

Образцы имеют монолитный профиль, без трещин и пор. В каждом образце просматриваются три зоны: композиционный наплав Stellite®6+ TiC, зона перемешивания, зона термического эффекта.

Все образцы демонстрируют достаточно обширную зону перемешивания материала подложки и порошка. Расчетные значения зо-

ны перемешивания находятся в диапазоне 35–70%, что связано с накоплением тепла в подложке во время действия лазерного излучения. На рис. 6 показаны отношения между перемешиванием и параметрами лазерной наплавки. Этот эффект нежелательный, поскольку в материале покрытия появляется большое количество железа.

Результаты анализа химического состава покрытия, проведенного на электронном сканирующем микроскопе, указывают на высокий процент железа (30–70%) в матрице покрытия. Эти результаты находятся в согласии с данными расчета перемешивания. Следует отметить, что процентное содержание железа в покрытии уменьшается с увеличением скорости подачи порошка при постоянной мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного пятна, в то время как доля других элементов (Ti, Co, Cr, W и др.) растет с увеличением скорости подачи порошка.

На рис. 7 показаны поперечные сечения образцов. Очевидно, что существует отличная металлургическая связь между покрытием и подложкой, а сам интерфейс характеризуется регулярностью. Наблюдается четкая граница между подложкой и покрытием, это обусловлено ростом зерна в нижней части расплавленного материала [19]. С увеличением расстояния от основания покрытия скорость затвердевания расплава растет, вследствие чего градиент температуры резко сокращается, что, в свою очередь, приводит к изменению микроструктуры.

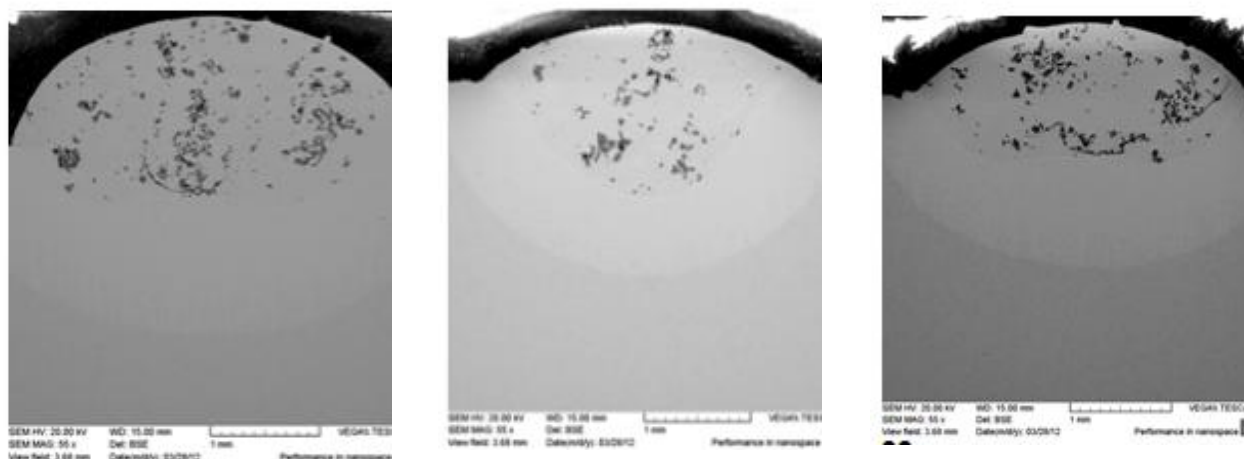


Рис. 5. Поперечные сечения образцов Stellite®6 + TiC, полученные на электронном сканирующем микроскопе

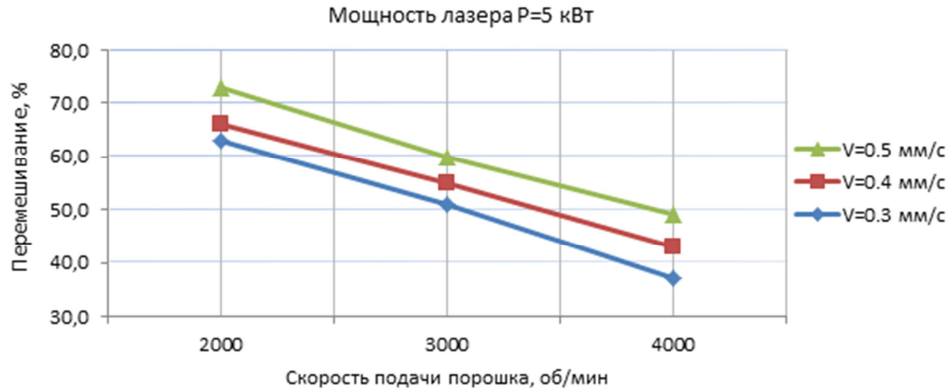


Рис. 6. Отношения между перемешиванием и параметрами лазерной наплавки

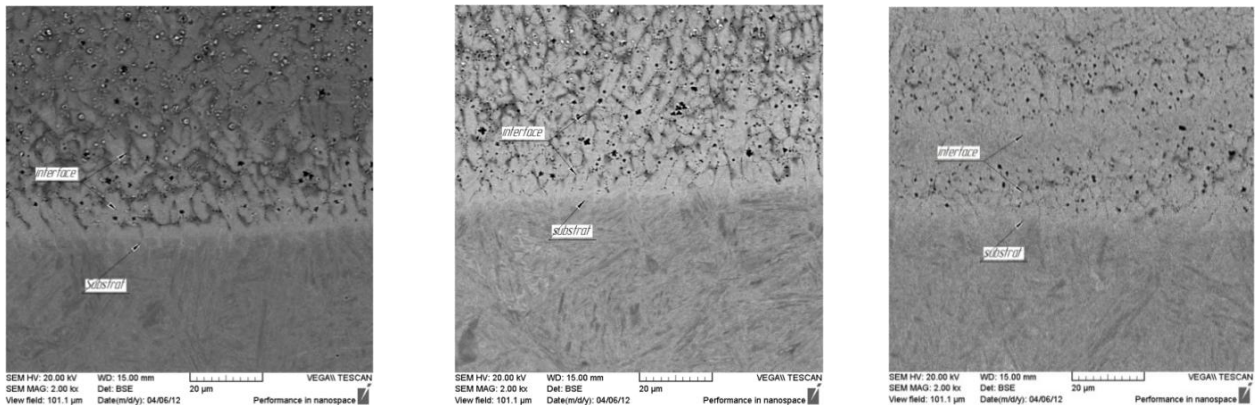


Рис. 7. Интерфейс между подложкой и покрытием кордонов Stellite® 6 + TiC.

Покрyтия наплавлены при постоянной мощности лазера 5 кВт, постоянной массовой подаче порошка и различных скоростях перемещения пятна: 3, 4 и 5 м/с

В структуре частиц TiC можно различить две фазы (рис. 8): первичные частично-расплавленные крупные частицы и вторичный карбид титана (TiC_{sec}).

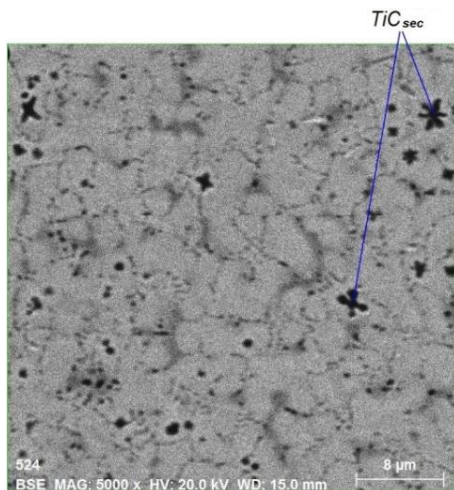


Рис. 8. Типичная микроструктура образцов

Анализ в электронном сканирующем микроскопе подтвердил гипотезу формирования вто-

ричных карбидов (рис. 9). Концентрация титана увеличивается в области первичного карбида титана (нерасплавленных частиц) и в зоне эвтектических колоний.

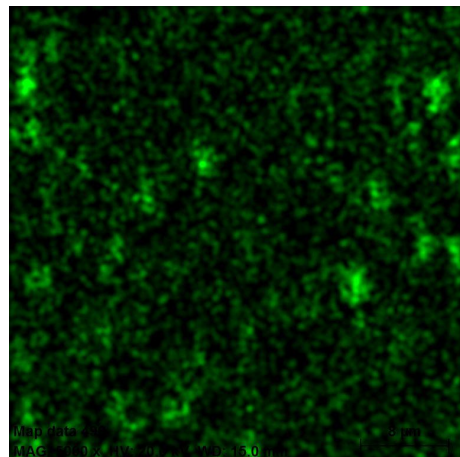
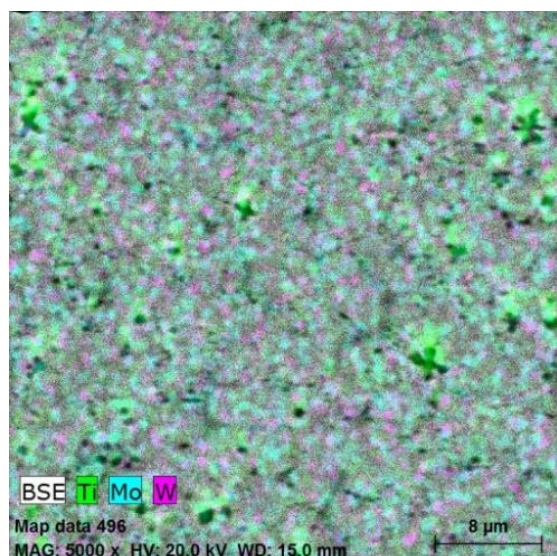


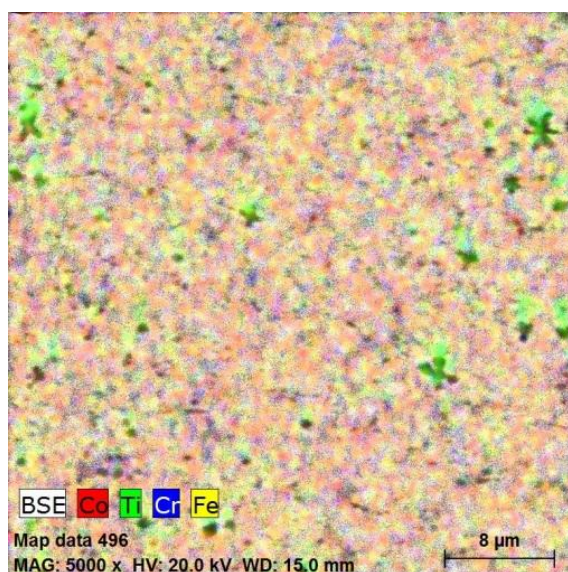
Рис. 9. Распределение Ti в структуре образцов

На рис. 10, а показана большая концентрация вольфрама и молибдена вокруг карбида титана. Предположительно это образование сложных

карбидов. Распределение других элементов в сплаве регулярно, за исключением хрома. Рис. 10, б демонстрирует повышенную концентрацию хрома по периферии образования карбидов.



а



б

Рис. 10. Распределение элементов в структуре образцов:
а – Ti, Mo, W; б – Co, Ti, Cr, Fe

Твердость полученных образцов была измерена от поверхности покрытия к подложке. Результаты показывают значительный разброс по твердости, от 800 до 600 HV. Следует отметить, что твердость зависит от структуры покрытия, чем более равномерное покрытие, тем меньше расхождение значений твердости.

Образование пересыщенного твердого рас-

твора TiC и α -железа с сильным искажением кристаллической решетки значительно повышает твердость. Это наблюдалось в образцах высоким содержанием железа, около 70%. Их твердость порядка 800HV_{0,2}, это значение намного выше, чем твердость остальных образцов.

Тем не менее высокие значения перемешивания оказывают негативное влияние на механические свойства матрицы Stellite®6. Таким образом, возникает необходимость контролировать промежуточный слой между подложкой и покрытием для того, чтобы ограничить содержание железа, даже в небольших количествах.

Выводы и перспективы

В данной работе были кратко представлены основные металлургические методы [2] повышения ресурса работы штамповой оснастки и проведено параметрическое исследование процесса лазерной наплавки покрытия из порошка Stellite®6 с добавлением армирующей фазы карбида титана TiC.

Процесс лазерной наплавки характеризуется чрезвычайно высокой скоростью охлаждения. Это оказывает существенное влияние на микроструктуру и свойства наплавленного покрытия.

Была проведена модификация порошковой смеси и параметрическое исследование технологических параметров лазерной установки для получения качественного покрытия. Отметим хорошую адгезию между покрытием и подложкой, однако, химический анализ показал высокое содержание железа в покрытии, вследствие высокой степени перемешивания материалов покрытия и подложки. Во всех образцах мы можем наблюдать различные по размеру агломерации карбида титана в структуре покрытия. Полученные образцы имеют различную твердость, т.к. она существенно зависит от процентного содержания железа в покрытии, поэтому образцы, имеющие высокую степень перемешивания с материалом подложки, показали более высокие результаты по микротвердости.

Перспективным шагом на следующем этапе этой работы будет оптимизация порошковой смеси. Необходимо применять TiC с более узким распределением частиц по размерам, а также провести оптимизацию параметров наплавки с целью уменьшения степени перемешивания с подложкой и получения покрытия с вторичными карбидами титана, равномерно распределенными в матрице покрытия.

Список литературы

1. Обработка металлов давлением в машиностроении / Полухин П.И., Тюрин В.А., Давидков П.И., Витанов Д.Н. М.: Машиностроение, 1983. 279 с.
2. Иванов В.И., Бурмукулов Ф.Х. Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии // Электронная обработка материалов. 2010. №5. С. 27–36.
3. Блантер М.Е. Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1984. 328 с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1983. 359 с.
5. Упрочнение поверхности штамповой оснастки из доэвтектоидных сталей / Лыгденов Б.Д., Лыгденов Б.Д., Бутуханов В.А., Мэй Шунчи, Цыреторов Б.Ш. // Современные наукоемкие технологии. 2014. №4. С. 76–79.
6. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов: учеб. пособие-справочник. Одесса: НГУ им. Петра Могилы, 2005. 352 с.
7. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А. О применении технологии электроискрового легирования и СВЧ-электродных материалов для повышения стойкости штамповой оснастки // Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство». Рыбинск, 2015, Т. 2.
8. Ольховацкий А.К. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки при восстановлении деталей машин. Челябинск: ВНИИТУВИД-ЧГАУ, 1996. 40 с.
9. Федулов А. П., Миронов В. М. Исследование возможности использования электроэрозийных методов для ремонта и упрочнения штамповой оснастки // Молодой ученый. 2015. Т. 12. №1. С. 86–88.
10. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 494 с.
11. Лазерные технологии повышения стойкости прокатных валков / Гаврилов Г.Н., Костромин С.В., Калинин А.Б., Пейганович В.Н., Ермаков Д.Ю. // Современные проблемы науки и образования. 2013. №4.
12. Ready John F. Industrial Applications of Lasers. San Diego: Academic Press, 1997. Vol. 2. 599 p.
13. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 p.
14. Thivillon L., Pervushin D., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition // International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008), Maastricht, June 2-4, 2008.
15. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser cladding. Boca Raton: CRS Pres, 2005. 280 p.
16. Frolov V.A., Peshkov V.V., Kolomensky A.B., Kazakov V.A. Welding: Introduction. Moscow: Internet Engineering, 2008. 382 p.
17. Grigoriantz A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing. M.: BMSTU, 2006. 664 p.
18. Thivillon L., Bertrand Ph., Laget B., Smurov I. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components. Journal of Nuclear Materials, 2, 2009, vol. 385, pp. 236–241.
19. Ion John C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. 2005, ELSEVIER, pp. 300–301.
20. www.stellite.com.

Материал поступил в редакцию 25.04.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52

LASER CLADDING AS A PERSPECTIVE SURFACE HARDENING TECHNIQUE FOR DIE TOOLING

Philippe Bertrand – Ph.D., Professor, National Engineering School of Saint Etienne. Director of Education and Innovations, Director of Studies in Additive Technologies and Surface Engineering, France. E-mail: philippe.bertrand@enise.fr.

Igor Movchan – Ph.D. (Physics and Mathematics), responsible for research projects at the National Engineering School of Saint Etienne, France. E-mail: igor.movtchan@enise.fr.

Samodurova Marina Nikolaevna – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: mar-samodur@ya.ru.

Dzhigun Nikolay Sergeevich – Postgraduate Student, South Urals State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: tusove@gmail.com.

Abstract. The present study looks at the main surface hardening techniques used for die tooling and mill rolls. Among various physical techniques, laser-assisted coating deposition (or laser cladding) is worth special attention due to its multiple advantages. Laser cladding offers a high efficiency (up to 150cm³/h of the deposit) and versatility in terms of coating thickness (0.1–1.0 mm) and applicable materials (Fe-based, Co-based, Ni-based alloys etc.). Moreover, laser cladding offers the possibility to produce multi-material coatings with enhanced properties such as wear-, heat- and shock-resistance. Considering the afore-

mentioned advantages, a hypothesis was suggested regarding the possibility of obtaining coatings with advanced, physical properties through laser cladding. The purpose of the study is to provide an overview of the key techniques behind enhancing the surface mechanical properties and to study the process of laser cladding with cobalt-based powder containing a reinforcing phase as a perspective technique for enhanced die tool performance. The experimental section of the study is concerned with the laser cladding process used for the production of metal-ceramic composite coatings. Coatings were obtained which consist

of a matrix built with a cobalt alloy and a titanium carbide reinforcing phase. Key physical properties of such coatings were studied. Although the application of heat-resistant cobalt-based alloys for die tool protection is of high relevance, its industrial application is rather limited. It is obvious that such die tool protection techniques will be in high demand in the future. However, a large-scale experiment is necessary to optimize the laser cladding process and to identify the proper composition of the powder mixture.

Keywords: Powder metallurgy, die tooling, thermal treatment, chemical thermal treatment, laser cladding, stellite, titanium carbide.

References

1. Polukhin P.I., Tyurin V.A., Davidkov P.I., Vitanov D.N. *Obrabotka metallov davleniem v mashinostroenii* [Metal forming in the engineering industry]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 279 p.
2. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh. Strengthening and extending the life of objects with the help of the spark erosion technique: Classification and Features. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic materials processing]. 2010, 5, pp. 27-36.
3. Blanter M.E. *Teoriya termicheskoy obrabotki* [Theory of heat treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 328 p.
4. Lakhtin Iu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 359 p.
5. Lygdenov B.D., Lygdenov B.D., Butukhanov V.A., Mey Shunchi, Tsyretorov B.Sh. Surface strengthening of hypoeutectoid steel die tooling. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2014, vol. 4, pp. 76-79.
6. Evdokimov V.D., Klimenko L.P., Evdokimova A.N. *Tekhnologiya uprochneniya mashinostroitel'nykh materialov: Uchebnoe posobie-spravochnik* [Engineering materials strengthening technique: Manual]. Odessa: NNGU im. Petra Mogily, 2005, 352 p.
7. Kudryashov A.E., Levashov E.A. On the application of electrospray doping and SHS electrodes for better die tool durability. *Mezhdunarodnyy tekhnologicheskii forum «Innovatsii. Tekhnologii. Proizvodstvo»* [International Technology Forum on Innovations, Technologies & Manufacturing]. Rybinsk, 2015, vol. 2.
8. Ol'khovatskii A.K. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody razmernoy obrabotki pri vosstanovlenii detaley mashin* [Electrophysical and electrochemical sizing techniques in parts rebuilding]. Chelyabinsk: VNIITUVID-ChGAU, 1996, 40 p.
9. Fedulov A. P., Mironov V. M. A study in the application of electrical discharge machining techniques in rebuilding and strengthening of die tooling. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2015, vol. 12, 1, pp. 86-88.
10. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoy obrabotki stali* [Basics of the heat treatment of steel]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1999, 494 p.
11. Gavrilov G.N., Kostromin S.V., Kalinin A.B., Peyganovich V.N., Ermakov D.Iu. Laser technology for better durability of mill rolls. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Current issues of modern science and education], 2013, 4.
12. Ready John F. *Industrial Applications of Lasers*. San Diego: Academic Press, 1997, vol. 2, 599 p.
13. Ion J.C. *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, 576 p.
14. Thivillon L., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition, International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008), Maastricht, June 2-4, 2008.
15. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. *Laser cladding*. Boca Raton: CRS Pres, 2005, 280 p.
16. Frolov V.A., Peshkov V.V., Kolomensky A.B., Kazakov V.A. *Welding: Introduction*. Moscow: Intermet Engineering, 2008, 382 p.
17. Grigoriants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Technological processes of laser processing*. M.: BMSTU, 2006, 664 p.
18. Thivillon L., Bertrand Ph., Laget B., Smurov I. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components. *Journal of Nuclear Materials*, 2, 2009, vol. 385, pp. 236-241.
19. Ion John C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. 2005, ELSEVIER, pp. 300-301.
20. www.stellite.com

Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки / Берtrand Ф., Мовчан И., Самодурова М.Н., Джигун Н.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 44–52. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52

Bertrand Ph., Movchan I., Samodurova M.N., Dzhigun N.S. Laser cladding as a perspective surface hardening technique for die tooling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 44–52. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52