

МИКРОСТРУКТУРА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ WC/SS316L ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА*

^{1,2}БО ЛИ, ^{1,2}ЧЖИХОНГ ЛИ, ^{1,2}ЛИДЖИНГ ЯНГ, ^{1,2}ДЖИНХУА ЯО

¹Центр исследования технологий лазерной обработки и техники, Чжэцзянский технологический университет.
Чаоанг Род, 18, Ханчжоу, 310014, КНР

²Инновационный центр передового лазерного оборудования провинции Чжэцзян.
Чаоанг Род, 18, Ханчжоу, 310014, КНР. E-mail: laser@zjut.edu.cn

Метод газодинамического напыления с применением лазерного нагрева (ЛГДН) является новым разработанным методом напыления покрытий, который объединяет сверхзвуковую порошковую струю, формируемую путем газодинамического напыления, с синхронным лазерным нагревом зоны формирования покрытия (ЛГДН). Добавка тепловой энергии лазера в процесс газодинамического напыления вносит изменение в термодинамическое состояние напыляемых частиц и подложки, значительно снижая таким путем критические скорости напыляемых частиц, необходимые для эффективного формирования покрытия, что позволяет расширить перечень материалов, напыляемых способом ГДН. В работе, изложенной в этой статье, представлена возможность применения техники ЛГДН для нанесения композитных покрытий с металлической матрицей (КММ), таких как WC/SS316L. Цель этого исследования состоит в сравнении композитных покрытий, полученных методами обычного ГДН и ЛГДН. Формирование структуры, механизмы механической деформации, связь между функциональными свойствами были рассмотрены детально. Результаты экспериментов показали превосходство ЛГДН в сравнении с ГДН, поскольку в этом случае возможно повысить степень использования напыляемого материала, плотность покрытия, его когезионную прочность благодаря повышению пластичности частиц и основы путем лазерного нагрева. Было установлено, что метод ЛГДН пригоден для нанесения высокопрочных КММ покрытий, обладающих высоким качеством и представляющих высокий потенциал в области 3D-печати металлических изделий. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, лазерный нагрев, композитное покрытие с металлической матрицей, микроструктура, состав, износостойкость

Газодинамическое напыление (ГДН) — это быстро развивающаяся технология нанесения покрытий, в которой мелкие частицы порошка в твердом состоянии наносятся на подложку посредством высокоскоростного удара при температуре ниже точки плавления порошка [1–3]. В процессе ГДН мелкие частицы порошка (5...50 мкм) разгоняются до большой скорости в сверхзвуковой газовой струе и затем ударяются о подложку или об уже нанесенный слой для формирования покрытия. Основным преимуществом ГДН является низкое количество подводимого тепла по сравнению с традиционными способами нанесения высокотемпературных покрытий, такими как газотермическое напыление и лазерная наплавка. Единственным тепловложением в процессе ГДН является оптимальный нагрев газа, который может использоваться для увеличения локальной скорости рабочего газа, ускоряющей напыляемые частицы. В результате минимизируется, или устраняется, негативное воздействие высокотемпературного окис-

ления, испарения, расплавления, кристаллизации, остаточных напряжений, отслоений, газовыделений и других проблем, характерных для традиционных способов газотермического напыления и лазерной наплавки.

Устранение вредного воздействия высокой температуры на покрытие и подложку открывает значительные преимущества и новые возможности, что делает газодинамическое напыление многообещающим для многих промышленных применений. Однако для получения высоких скоростей частиц, которые необходимы для успешного нанесения покрытия методом ГДН, часто в качестве рабочего газа используют гелий, который является дорогим и дефицитным. Более того, для подогрева рабочего газа до температуры 900 °С с целью увеличения скорости его и частиц часто используют газонагреватель. Необходимость использования горячего гелия приводит к высоким производственным расходам, которые появляются в

* По материалам доклада, представленного на VII Международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке поверхностей», 14–18 сентября 2015, Одесса, Украина.

© Бо Ли, Чжихонг Ли, Лиджинг Янг, Джинхуа Яо, 2016

результате потребления энергии на нагрев газа и высокой цене на сам газ. Кроме того, нанесение покрытий из твердых материалов с высокой прочностью сцепления и плотностью при помощи ГДН является сложной задачей.

Очевидно, что разработка процесса, в котором можно было бы сохранить механизм нанесения без расплавления, типичный для газодинамического напыления, но сократить затраты и улучшить функциональность покрытия, была бы явным прогрессом. У. О'Нилом и др. был предложен процесс, который комбинирует газодинамическое напыление с лазерным нагревом (ЛГДН) [4–6]. В ЛГДН лазер используется для нагрева зоны нанесения ГДН с целью повышения пластичности как подложки, так и частиц порошка, позволяя частицам деформироваться и формировать покрытие при скоростях в половину меньше, чем ГДН. Исключение необходимости в высоких скоростях удара частиц позволяет использовать холодный или слегка подогретый азот вместо гелия с высокой температурой в качестве рабочего газа, таким образом сокращая величину производственных расходов более чем на порядок. Более того, способ ЛГДН значительно расширяет диапазон материалов частиц и подложек, которые могут быть использованы благодаря снижению критической скорости напыляемых частиц. ЛГДН использовали для нанесения покрытий из разнообразных материалов, таких как Cu, Ti, Stellite 6, Ni60, сплавы Al–Cu и Al–Si и т. д. [7–12].

Композиты с металлической матрицей (КММ), которые, как правило, состоят из твердых упрочняющих неметаллических материалов и металлической матрицы, относятся к полезному классу материалов для нанесения покрытий, которые обладают такими физическими свойствами, как плотность, тепло/электропроводность вместе с механическими свойствами, такими как прочность и износостойкость. На данный момент лазерная наплавка, газотермическое напыление и газодинамическое напыление являются наиболее широко распространенными способами создания покрытий КММ. Высокая температура, характерная для лазерной наплавки и газотермического напыления, может привести к пористости, микротрещинам, растворению, фазовым изменениям, высоким термическим напряжениям и т. д. Основной проблемой покрытий КММ, полученных газодинамическим напылением, является прочность сцепления, поскольку в качестве металлической матрицы часто выступают мягкие материалы, такие как Al, Cu, Ni, что приводит к слабым силам связи между металлической матрицей и упрочняющими частицами. В результате упрочняющие частицы склонны к выкрашиванию из по-

крытия в условиях реального применения, что может ухудшить рабочие характеристики покрытия.

Исходя из характеристик ЛГДН возможно нанесение при помощи этого способа покрытий из твердых материалов при более низкой скорости удара с получением высокой плотности покрытия и его когезионной прочности. Вместе с тем вредные черты способов получения высокотемпературных покрытий могут быть эффективно устранены благодаря относительно низкой температуре нанесения, характерной для ЛГДН. На данный момент большинство исследований, посвященных методике ЛГДН, сфокусированы на покрытиях из одного материала и редко включают покрытия КММ. Поэтому в данном исследовании в качестве процесса для нанесения композитного покрытия из нержавеющей стали, упрочненной карбидом вольфрама (WC/SS316L), на подложку из углеродистой стали выбрали ЛГДН для того, чтобы показать возможность использования этого способа при создании покрытий из композитов с твердой металлической матрицей. Для сравнения композитные покрытия были получены также при помощи газодинамического напыления при тех же условиях, но без применения лазерного нагрева. Микроструктуру, химический состав, когезионную прочность, плотность покрытия и износостойкость композитных покрытий исследовали при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ), оптической микроскопии (ОМ), рентгеноструктурного анализа (РС) и «pin-on-disc» машины для испытаний на износ.

Экспериментальная часть. *Сырьевые материалы.* В качестве сырьевого материала использовали промышленный порошок нержавеющей стали (SS316L) и порошок карбида вольфрама (WC) в состоянии поставки. Частицы порошков SS316L и WC имеют сферическую неправильную форму, как показано на рис. 1. Композитный порошок, состоящий из 30 об. % WC и 70 об. % SS316L, подвергали механическому измельчению в цилиндре, вращающемся со скоростью 200 оборотов в минуту на протяжении двух часов. Процесс размола в шаровой мельнице использовали для получения однородно перемешанного композитного порошка, пригодного для нанесения композитных покрытий с однородно распределенными упрочняющими частицами. Материалом подложки была углеродистая сталь, а образцы подложки имели размер 100×60×10 мм. Перед процессом нанесения поверхность подложки подвергали пескоструйной обработке и ультразвуковой очистке в спирте.

Схема ЛГДН и процесса нанесения покрытия. Принципиальная схема системы ЛГДН, используемой в этом исследовании, представлена на рис. 2,

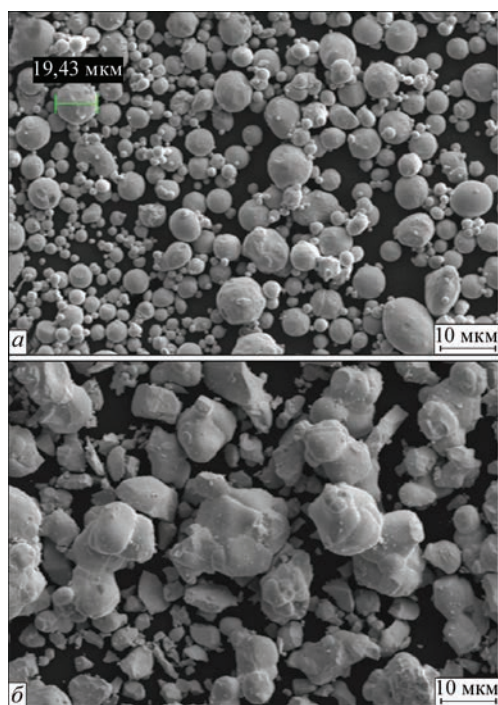


Рис. 1. Микроструктуры исходного сырья: *a* — SS316L; *б* — WC

a. Газ высокого давления подавали в сужающееся сопло двумя способами: один через газовый нагреватель, другой через порошковый питатель, в котором находился порошок. Струя порошка и струя газа высокого давления перемешивались и проходили через сопло, где частицы ускорялись до сверхзвуковой скорости. Частицы, обладающие высокой скоростью, сталкивались с подложкой в области, которая синхронно нагревалась при помощи диодного лазера (Laserline LDF 400-1000, Германия) с длиной волны 960...980 нм и максимальной мощности 4кВт. Для фокусировки лазера на поверхность подложки с диаметром лазерного пятна 5 мм были использованы комбинированные линзы. Высокоскоростной инфракрасный пирометр использовали для температурных измерений в реальном времени и контроля температуры зоны нанесения (далее указываемая как «температура нанесения») в процессе ЛГДН. Данные пирометра подаются через замкнутую систему обратной связи, которая меняет лазерную мощность необходимым образом для поддержания заданной температуры. Сопло, лазерная головка и пирометр были смонтированы с роботом (STAUBLI TX 90, Швейцария). Напыляющее сопло располагалось перпендикулярно основанию подложки. Лазерный пучок был направлен под углом 30° к нормали поверхности. Лазерная энергия и распределение мощности схематически представлены на рис. 2, *б*. В процессе нанесения подложка была неподвижной, а сопло, лазерная головка и пирометр двигались и контролировались роботом. Азот выступал в качестве рабочего газа. Значения

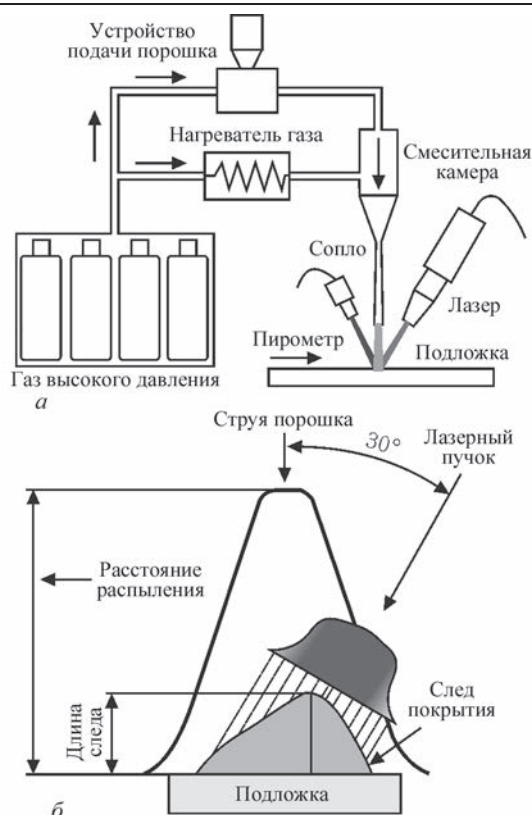


Рис. 2. Схематические изображения системы ЛГДН (*a*) и распространения лазерной энергии и порошка в процессе ЛГДН (*б*)

оптимальных технологических параметров, за исключением температуры, поддерживали постоянными: давление газа 2,5 МПа; скорость передвижения лазера 30 мм/с; скорость подачи порошка 40 г/мин; дистанция напыления 30 мм.

Характеристика покрытия. Образцы покрытия для проведения традиционных процедур металлографических исследований вырезали из поперечного сечения перпендикулярно поверхности покрытия при помощи электроэрозионной проволоочной резки. Для травления использовали водный раствор, состоящий из 45 мл HCl, 15 мл HNO₃ и 20 мл метанола. Анализ микроструктуры покрытия и межфазного сцепления был проведен с использованием изображений в отраженных электронах на ESM (SIGMA HV-01-043, Carl Zeiss) и оптическом микроскопе (OM, Axio Scope, Zeiss). Изображения электронного растрового микроскопа по сигналам вторичной электронной эмиссии были выполнены для максимизации контраста между частицами WC и матрицей из нержавеющей стали. Фазовый состав композитных покрытий изучали при помощи рентгеновского дифрактометра (XRD, D8 Advance, Bruker) с CuK_α-излучением (45 кВ, 40 мА, скорость сканирования 0,02 град/с. Испытание на износ по схеме «штифт–диск» выполняли на композитных покрытиях при комнатной температуре в условиях сухой смазки. В качестве штифта применяли керамический Si₃N₄ шарик диаметром 4 мм, который

имеет твердость $HV\ 2200$ ($HRC\ 90$). В качестве диска использовали образец для испытаний, который отполировали, очистили в ультразвуковой ванне и в конце высушили. Испытания проводили при нормальной нагрузке 500 г со скоростью вращения образца между контактными поверхностями 500 оборотов в минуту, продолжительность скольжения 60 мин.

Результаты и обсуждение. *Эффективность нанесения.* Эффективность нанесения (ЭН) композитных покрытий WC/SS316L при различной температуре сравнивали по толщине слоя покрытия. На рис. 3 показаны изображения, полученные ОМ. Как можно видеть, центральные отметки высоты нанесенных покрытий постепенно увеличиваются с повышением температуры. Пик высоты покрытия WC/SS316L, нанесенного без помощи лазера, составляет 734,04 мкм, тогда как его рост на 43 % (до 1050,91 мкм) наблюдается при достижении температуры нанесения 800 °С, что дает возможность повышения ЭН путем увеличения температуры нанесения.

Улучшение ЭН может быть отнесено за счет снижения критической скорости нанесения из-за повышения пластичности напыляемых частиц лазерным излучением. Одним из наиболее важных параметров процесса ГДН является критическая скорость напыления. Для каждого определенного материала существует критическая скорость напыления, которая должна быть достигнута. Только частицы, скорость которых превысила это значение, могут быть эффективно нанесены, что, в

свою очередь, позволяет получить желаемое покрытие. И наоборот, частицы, которые не достигли этого порога скорости, производят эрозию подложки. Теоретическое моделирование критической скорости напыления (v_{cr} м/с), предложенное Х. Ассади и др., может быть выражено следующей формулой [13]:

$$v_{cr} = 667 - 14\rho + 0,08T_m + 0,1\sigma_u - 0,4T_i$$

где ρ — плотность материала, г/см³; T_m — температура плавления, °С; σ_u — предел прочности, МПа; T_i — начальная температура частицы, °С.

Согласно формуле, предварительный нагрев частицы приведет к снижению критической скорости напыления, поскольку при росте температуры T_p предел прочности материала снижается. Как увеличение T_p , так и уменьшение σ_u будут способствовать снижению v_{cr} .

В данном исследовании напыляющее сопло располагалось перпендикулярно поверхности подложки, а лазерный пучок находился под углом 30° к нормали поверхности (рис. 2, б). Струя порошка и лазерный пучок частично пересекались друг с другом. Хотя напыляемые частицы двигались с высокой скоростью и имели ограниченное время для воздействия лазера, предполагается, что они будут достаточно нагреты лазером в полете до момента столкновения с подложкой благодаря высокой плотности мощности лазера и малому размеру частицы, что может снизить их критическую скорость. В результате, доля частиц, превышающих эту скорость, будет увеличиваться, что приведет к улучшению ЭН (рис. 3).

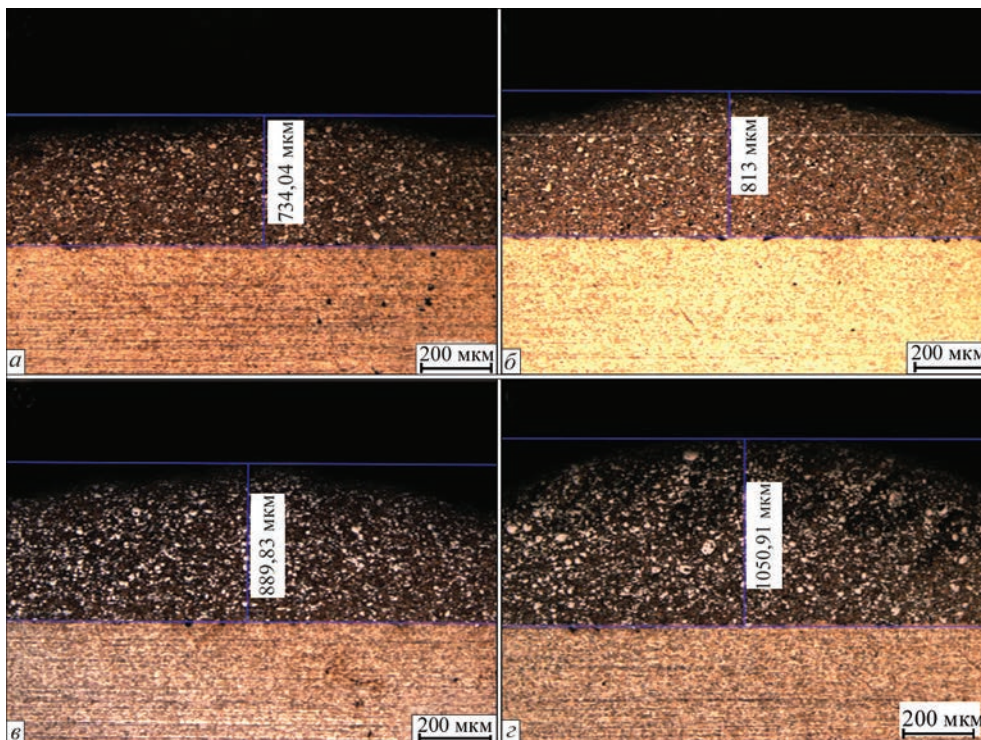


Рис. 3. Сравнение толщины покрытий, полученных при различной температуре нанесения: а — комнатная температура; б — 400; в — 600; з — 800 °С

Распределение и содержание упрочняющих частиц в композитных покрытиях. На рис. 4 видно, что частицы WC равномерно распределены во всех образцах покрытия. Поэтому в каждом образце наугад выбирали одну область и рассчитывали долю участка частиц WC в этих выделенных областях при помощи специального программного обеспечения для оценки зависимости содержания WC от температуры нанесения. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Показано, что доля участков, состоящих из частиц WC в покрытии, полученном ГДН, составляет около 22,55 % и она немного увеличивается до 24,42 % при повышении температуры нанесения до 400 °С. При дальнейшем увеличении до 600 °С доля участков частиц WC значительно возрастает — до 28,55 %. Покрытие, нанесенное при 800 °С, имеет долю площади частиц WC около 29,29 %, что очень близко к объемной концентрации (30 %) частиц WC в исходном композитном порошке. Это указывает на то, что лазерный нагрев способствует эффективному нанесению частиц WC в композитных покрытиях.

Покрытия из КММ, таких как Al/AlN, Ni/Al₂O₃, Cu/Al₂O₃ и т. д., полученные ГДН, состоят в основном из чистой металлической матрицы и керамических упрочняющих частиц. В процессе ГДН упрочняющие частицы не могут деформироваться из-за высокой твердости и они должны быть внедрены в деформируемую металличе-

скую матрицу, чтобы сформировать композитное покрытие. Таким образом, способность к пластической деформации металлической матрицы играет решающую роль в формировании КММ покрытий. В данном исследовании, без применения лазера или с небольшим лазерным нагревом, порошок SS316L не был достаточно пластичен для включения твердых частиц, что привело к относительно низкому содержанию WC. В случае более сильного лазерного нагрева порошок SS316L легко деформируется и благодаря своей значительной пластичности способен захватывать частицы WC, что приводит к высокой их концентрации (рис. 4).

Плотность покрытия. Согласно предыдущим результатам можно было установить, что композитные покрытия, нанесенные при 800 °С, имеют относительно высокую ЭН и содержание частиц WC. Поэтому последующие сравнительные исследования в основном сфокусированы на данном образце и образце ГДН. На рис. 5 представлено сравнение плотности покрытий этих двух образцов. Из рис. 5, а можно видеть, что в покрытиях ГДН присутствует много пор и пустот, что указывает на плохую прочность сцепления между частицами порошка и низкую плотность этого покрытия. Более того, в покрытии, полученном ГДН, также можно наблюдать очевидные дырки, как показано на рис. 5, а. Появление таких дырок возможно из-за нарушения сцепления частиц WC и образования трещин. При применении лазерного

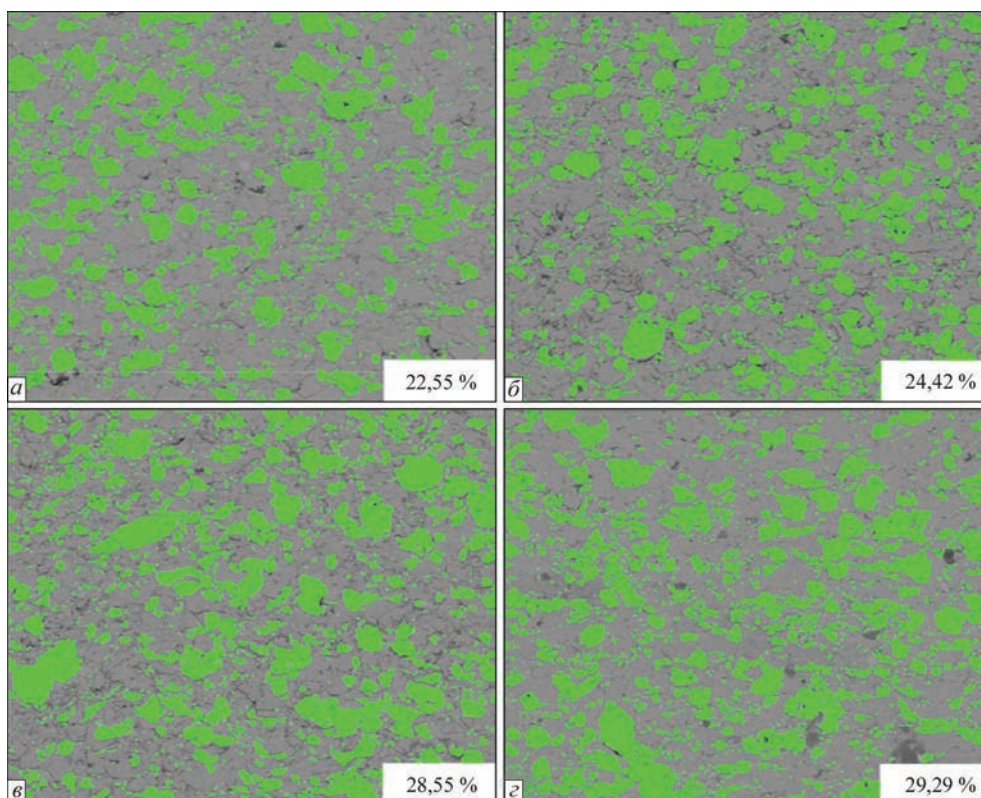


Рис. 4. Сравнение распределения и содержания WC в нанесенных покрытиях, полученных при различных температурах нанесения: а — комнатная температура; б — 400; в — 600; з — 800 °С

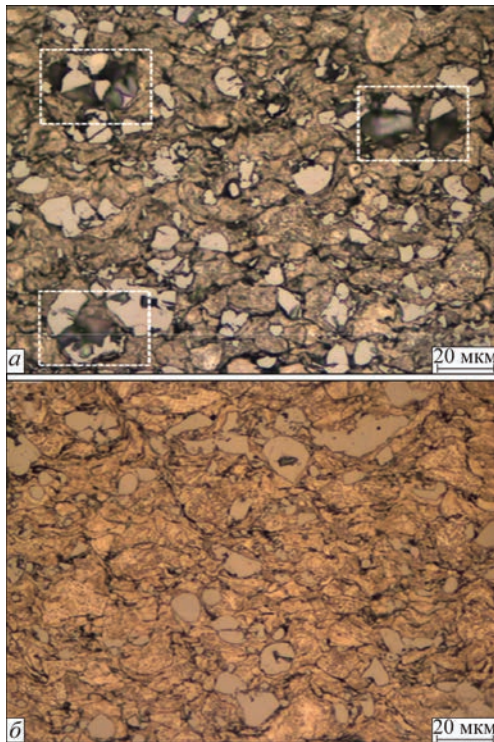


Рис. 5. Сравнение плотности покрытия, полученного ГДН (а) и ЛГДН (б)

нагрева можно получить улучшенную плотность нанесенного покрытия. Пустоты и поры практически не наблюдаются в полученном покрытии ЛГДН, также исчезают дыры. Эти результаты означают, что лазерное излучение имеет положительное влияние на плотность покрытия. М. Брей и др. провели сравнение пористости покрытий Ti, полученных при помощи ГДН, высокоскоростного газопламенного напыления (ВСГН) и ЛГДН [4]. Результаты показали, что уровень пористости покрытий ГДН и ВСГН составлял 3,1 и 5,4 % соответственно, тогда как пористость у покрытия ЛГДН была всего около 0,5 % и это дает возможность говорить, что плотность покрытий ЛГДН выше плотности покрытий ГДН и ВСГН.

Плохую плотность покрытия при ГДН в основном относят на счет ограниченной пластической деформации напыляемых частиц. В процессе

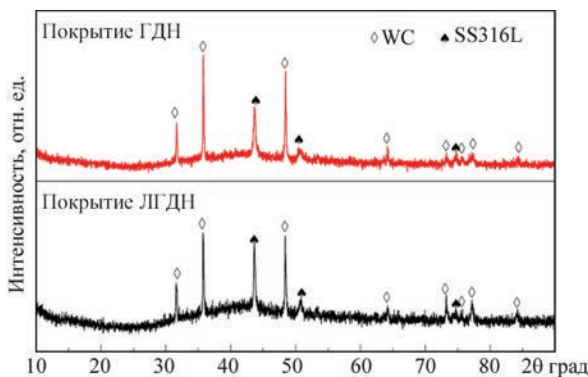


Рис. 6. Результаты рентгеноструктурного анализа композитных покрытий, выполненных ГДН и ЛГДН

ЛГДН синхронное лазерное излучение может эффективно пластифицировать напыляемые частицы, что в свою очередь приведет к их достаточной деформации. Достаточно деформированные частицы соединяются друг с другом, образуя тесный контакт, обеспечивая таким образом высокую плотность покрытия. Более того, из-за пластификации металлической матрицы твердые частицы WC не будут разрушаться и выпадать из композитного покрытия, поскольку они включены в металлическую матрицу, что гарантирует отсутствие дырок в покрытии ЛГДН.

Фазовый анализ. Влияние лазерного нагрева на фазовый состав композитного покрытия WC/SS316L проводили при помощи рентгеноструктурного анализа (РС). Результаты РС анализа композитных покрытий, полученных ГДН и ЛГДН, представлены на рис. 6. Установлено, что образцы покрытий, полученных с применением лазерного нагрева и без него, имеют идентичный фазовый состав, который состоит из SS316L и WC, означая, что ЛГДН сохраняет механизм нанесения в твердом состоянии как и ГДН, несмотря на то, что процесс включает лазерный нагрев. В процессе ЛГДН лазерную мощность тщательно контролируют для того, чтобы только пластифицировать напыляемые частицы и подложку, а не расплавить их. Частицы оставались твердыми во время полета и нанесения и подвергались лазерному излучению только в ограниченный период времени. Таким образом, химический и фазовый состав в покрытиях во время процесса ЛГДН по сравнению с ГДН не изменялись даже при работе с материалами с низкой температурой плавления, такими как Cu и Al. В наших предыдущих исследованиях было обнаружено, что окисление покрытий, полученных ЛГДН, является обычным фактом и его можно игнорировать при сравнении с медными покрытиями, полученными ГДН [9]. Относительно низкая температура нанесения в про-

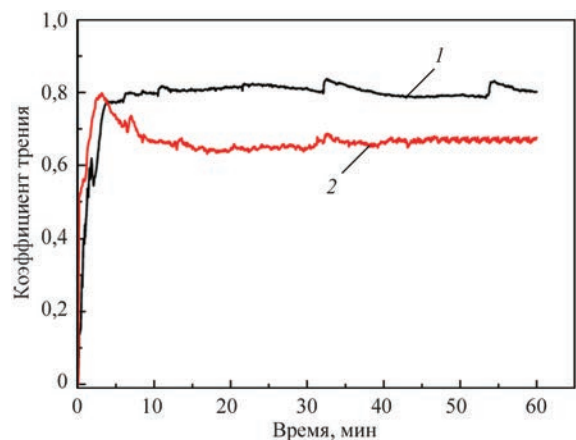


Рис. 7. Изменение коэффициента трения в зависимости от времени скольжения композитных покрытий WC/SS316L, полученных способами ГДН (1) и ЛГДН (2)

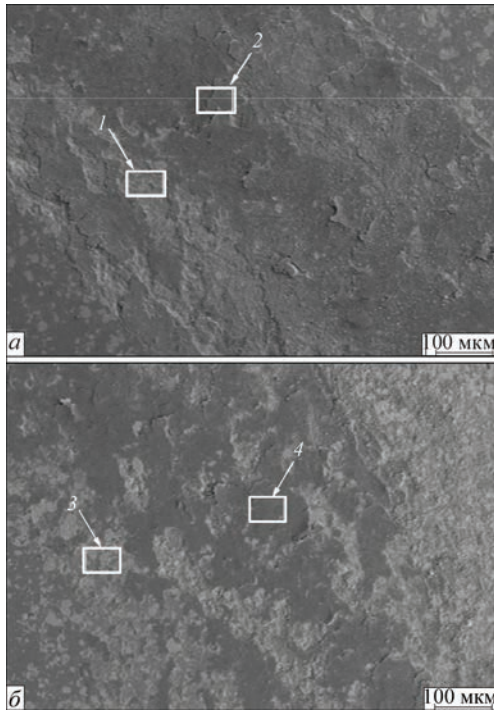


Рис. 8. Изображения изношенных поверхностей композитных покрытий WC/SS16L, полученных ГДН (а), и ЛГДН (б), полученных с помощью РЭМ

цессе ЛГДН может эффективно избежать высоких термических напряжений, окисления, фазовых переходов и роста зерна в нанесенных покрытиях, что делает ее технологией нанесения покрытий, превосходящей газотермическое напыление и лазерную наплавку.

Характеристики износостойкости. Была зарегистрирована динамика величины коэффициента трения на испытуемых образцах в процессе трения и ее колебания во время испытания, что представлено на рис. 7. Показано, что коэффициент трения образца, полученного при ЛГДН, меньше и более стабильный, чем тоже у ГДН образца. Средний коэффициент трения образца, полученного ЛГДН, составляет около 0,65 после 60 мин скольжения, тогда как у ГДН образца — около 0,8 при том же времени.

Для дальнейшего изучения характеристик износостойкости композитных покрытий WC/SS316L изношенные поверхности испытанных образцов были исследованы при помощи РЭМ. Результаты представлены на рис. 8. В обоих случаях на изношенных поверхностях можно наблюдать две характерные области, темную и светлую. Темная область более обширна в покрытии, полученном ГДН, чем в покрытии ЛГДН. В таблице представлены результаты анализа темной и светлой области в следе износа покрытий, полученных способами ЛГДН и ГДН. Показано, что темные области 2 и 4 имеют высокое содержание кислорода, и, наоборот, его низкое содержание обнаружено в светлых областях 1 и 3. Предполагается,

Результаты дисперсионной рентгеновской спектроскопии изношенных поверхностей композитных покрытий WC/SS16L, полученных ГДН и ЛГДН

Номер участка	O	Si	Cr	Fe	Ni	W
1	11,68	1,49	12,95	57,05	7,76	9,07
2	39,38	8,76	5,87	24,55	3,53	17,91
3	7,32	3,63	3,71	12,8	2,5	70,04
4	36,36	10,65	5,44	23,42	4,27	19,86

что окисление происходило в то время, когда образцы покрытий подвергали испытаниям на износ при трении скольжением, а темные области — это остатки процесса окисления при испытаниях. Чем больше остатков окисления в изношенной поверхности покрытия, полученного ГДН покрытия, тем большее количество тепла трения было образовано в ней при износе, что необходимо отнести на счет относительно высокого коэффициента трения, как показано на рис. 7. По результатам испытаний на износ можно резюмировать, что композитные покрытия WC/SS316L, полученные ЛГДН, имеют лучшие характеристики износостойкости, чем покрытия, полученные ГДН. Предполагается, что трение между контактными поверхностями было снижено за счет сопротивления абразивному истиранию твердых частиц WC неправильной формы. Лучшие свойства износостойкости покрытия WC/SS316L, полученного ЛГДН, являются результатом относительно высокого содержания WC частиц в составе покрытия и более высокой его когезионной прочности за счет межфазного сцепления между частицами WC и матрицей SS316L из-за благоприятного воздействия лазерного излучения.

Выводы

Нанесение композитных покрытий WC/SS316L на углеродистую сталь было успешно выполнено в диапазоне температур при помощи способа ЛГДН, который комбинирует газодинамическое напыление с лазерным нагревом. Эффективность нанесения покрытий ЛГДН-способом с ростом температуры нанесения увеличивается благодаря снижению критической скорости нанесения, что является результатом повышения пластичности напыляемых частиц путем лазерного нагрева. Содержание частиц WC и когезионная прочность покрытий также повышаются при увеличении температуры нанесения, что в свою очередь значительно улучшает характеристики износостойкости покрытия ЛГДН. Введение лазерного излучения в ГДН не приводит к изменениям в фазовом составе напыляемого покрытия в процессе ЛГДН благодаря относительно низкой температуре нанесения.

1. Cold spray technology, Elsevier / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov [et al.]. – 2007. – P. 1–32.
2. Champagne V. K. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / V. K. Champagne – Woodhead publishing Limited. – 2007. – P. 11–41.
3. Maev R. G. Introduction to low pressure gas dynamic spray / R. G. Maev, V. Leshchynsky / Wiley-VCH, 2008, P. 1–10.
4. Bray M. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization / M. Bray, A. Cockburn, W. O'Neill // Surface and Coating Technology. – 2011. – № 203. – P. 2851–2857.
5. High speed titanium coating by supersonic laser deposition / R. Lupoi, M. Sparkes, A. Cockburn [et al.] // Materials Letter. – 2011. – № 65. – P. 3205–3207.
6. Solid-state manufacturing of tungsten deposits onto molybdenum substrates with supersonic laser deposition / M. Jones, A. Cockburn, R. Lupoi [et al.] // Materials Letter. – 2014. – № 134. – P. 295–297.
7. Olakanmi E. O. Laser assisted cold-spray corrosion- and wear- resistant coatings: A review / E. O. Olakanmi, M. Doyoyo // Journal of Thermal Spray Technology. – 2014. – № 23. – 765–785.
8. Microstructural and mechanical evaluation of laser-assisted cold sprayed bio-ceramic coatings: potential use for biomedical applications / M. Tlotleng, E. Akinlabi, M. Shukla [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – № 24. – P. 423–435.
9. Beneficial effects of synchronous laser irradiation on the characteristics of cold-sprayed copper coatings / B. Li, L. J. Yang, Z. H. Li [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – № 24. – P. 836–847.
10. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray / J. H. Yao, L. J. Yang, B. Li [et al.] // Applied Surface Science. – 2015. – № 330. – P. 300–308.
11. Simulation analysis of Stellite 6 particle impact on steel substrate in supersonic laser deposition process / F. Luo, A. Cockburn, D. B. Cai [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – №24. – P. 378–393.
12. Performance comparison of Stellite 6 deposited on steel using supersonic laser deposition and laser cladding / F. Luo, A. Cockburn, R. Lupoi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2012. – № 212. – P. 119–127.
13. Bonding mechanism in cold gas spray / H. Assadi, F. Gartner, H. Stoltenhoff [et al.] // Acta Materialia. – 2004. – № 51. – P. 4379–4394.

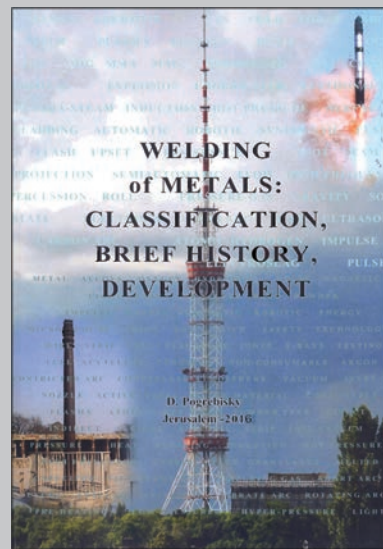
Поступила в редакцию 06.12.2015

NEW BOOK

Pogrebisky D. (2016) *Welding of Metals: Classification, Brief History, Development*, 380 pp., 250 pictures, a dozen tables, 205×290 mm, soft cover, Jerusalem, Israel.

The book price is \$175. In June, 2016 the former collaborator of Paton Welding Institute published in Jerusalem a new book. The book «Welding of Metals: Classification, Brief History, Development» gives a lot of information about metals welding processes, including not listed in American and European normative documents which author tries to lead to the complete match to each other. With the aim of international harmonization, a preliminary attempt was made to produce a unified classification of about 300 welding methods, basing on the abbreviations that are similar to adopted ones of the American Welding Society. At the same time the book author tried to build the impartial review of historical metals welding development against a background of general sciences and adjacent processes progress. Some comparative, economic and other considerations are given too — together with a rich illustrative material and large references.

The book may be useful for different welding specialists, industrial engineers, designers of precision metal structures and various electro-mechanical devices as well as for students of relevant specialties. The main purpose of the book is to contribute to general picture of welding development. There are mentioned much more than 300 welding methods that were developed in the former Russia, USSR, in USA, England, Germany, France, Sweden, Japan, Finland, Austria, China, Australia, Brazil, Switzerland and many other countries.



Orders for book please send to:
 POB 31445, Jerusalem 91313, Israel
 E-mail: davidpogrebis@gmail.com
 www.actualweld.com