



ПРОЦЕССЫ УПРОЧНЕНИЯ И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (Обзор)

В. Ю. ХАСКИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено состояние развития процессов термического упрочнения, легирования, наплавки и нанесения покрытий, в которых основная роль отведена лазерному излучению. Представлены технологические схемы, указанных процессов, отмечены их достоинства и недостатки. На примере практического применения проанализированы перспективы дальнейшего развития этих процессов.

Ключевые слова: лазерные технологии, термообработка, легирование, наплавка, нанесение покрытий, гибридные и комбинированные процессы, достоинства и недостатки, практическое применение, перспективы развития

В области нанесения функциональных покрытий все больший интерес вызывают процессы, в которых используется лазерное излучение [1, 2]. К ним относятся как лазерные (наплавка и поверхностное модифицирование), так и гибридные или комбинированные (лазерно-плазменное нанесение покрытий, лазерная обработка с высокочастотным подогревом и др.). При их практической реализации используется излучение технологических лазеров: газового (CO₂-лазер), твердотельного (Nd:YAG-лазер), диодного (табл. 1) и волоконного [3]. С учетом хронологии появления и расширения технологических возможностей процесса с лазерным излучением можно расположить в следующей последовательности: лазерные термообработка, легирование, наплавка и напыление, гибридная сварка.

Лазерная термообработка заключается в воздействии сфокусированного лазерного излучения на обрабатываемую деталь и осуществляется как с оплавлением упрочняемой поверхности, так и

без него. В последнем случае требуется предварительное нанесение покрытий, поглощающих лазерное излучение [4, 5]. Основными преимуществами этого процесса являются локальность теплового воздействия (размер пятна нагрева обычно составляет 0,1...10,0 мм), гибкий подвод энергии к месту обработки, возможность получения слоев с высокими твердостью и износостойкостью, модифицированных на глубину от нескольких микрометров до 1,0...3,0 мм [6]. За счет происходящего при этом измельчения зерен возможно упрочнение металлов без образования твердых фаз. К недостаткам процесса относятся появление внутренних напряжений в дорожках упрочнения, что может приводить к трещинообразованию, а также вероятность порообразования при упрочнении с оплавлением за счет выделения газов при выгорании неметаллических включений в основном металле [5, 7]. Наличие газов приводит к возникновению пузырьков в жидком металле ванны расплава, а из-за короткого времени существования ванны пузырьки не успевают подняться на ее поверхность.

Одна из первых оригинальных разработок, в полной мере использующая оптические преимущества лазерного излучения для процессов термо-

Таблица 1. Параметры различных типов лазеров высокой мощности, используемых в процессах упрочнения и нанесения покрытий

Параметры лазера	CO ₂ -лазер	Nd:YAG с накачкой		Диодный
		ламповой	диодной	
Длина волны, мкм	10,6	1,06	1,06	0,8...0,94
КПД, %	5...10	1...3	10...12	30...50
Максимальная мощность, кВт	40	4	4	6
Средняя плотность мощности, Вт/см ²	1·10 ⁶ ...1·10 ⁸	1·10 ⁵ ...1·10 ⁷	1·10 ⁶ ...1·10 ⁹	1·10 ³ ...1·10 ⁵
Период между сервисными обслуживаниями, ч	2000	200	10000	10000
Передача излучения по оптическому волокну	Нет	Есть	Есть	Есть
Качество излучения, мм·мрад	12	25...45	12	100...1000



обработки, — это специальная оптика, которая с помощью сегментированного зеркала интегрирует энергию путем наложения множества отдельных элементов пучка [8]. В конце 1980-х годов разработаны и применяли сканирующие головки с микропроцессорным управлением для лазерной термообработки и наплавки. До настоящего времени для равномерного распределения энергии при обработке деталей сложной формы часто используют сканирование лазерного излучения [9], что обеспечивает значительную гибкость процессов термоупрочнения и нанесения покрытий.

Лазерное легирование предполагает создание на обрабатываемой поверхности сравнительно небольшой (примерно диаметром 0,2...0,6 мм при глубине 0,1...3,0 мм) ванны расплава, в которую вводят металлические или неметаллические (например, газообразные) легирующие элементы [4, 5, 10–12]. В результате перемещения теплового источника относительно обрабатываемой поверхности на последней образуется слой с измененными физико-химическими характеристиками. К преимуществам лазерного легирования относят [4, 5] возможность легирования металлических поверхностей на глубину до 2...3 мм с образованием как химических соединений, так и твердых растворов легирующих элементов в структуре металла; получение структур с высокой дисперсностью и минимальной зоной термического влияния (ЗТВ) благодаря минимизации теплового воздействия на подложку; значительное снижение по сравнению с плазменными методами остаточных деформаций. Недостатки данного процесса во многом аналогичны недостаткам лазерной термообработки. Отличие состоит в образовании пор, свищей и выплесков, связанных с подачей в ванну расплава легирующих материалов (в первую очередь газообразных).

Лазерная наплавка как способ нанесения покрытий берет свое начало от появившегося несколько ранее лазерного легирования [4, 5, 10–12]. При наплавке за счет подачи наплавочного материала (в основном в виде порошка, реже — проволоки) в зону действия сфокусированного в пятно диаметром 1,0...5,0 мм лазерного излучения на обрабатываемой поверхности создается покрытие определенной высоты с заданными физико-химическими характеристиками. Возможны также варианты лазерной наплавки по предварительно нанесенным на подложку слоям наплавляемого материала. Эти слои сначала получают газотермическим напылением или обмазкой, состоящей из наплавочного порошка со связующим, а затем переплавляют с помощью лазерного излучения [13]. Наплавку с предварительным напылением слоев обычно называют лазерным переплавом [14]. Полученное покрытие связано с материалом основы переходной зоной сравни-

тельно малых (от 5...10 до 50...200 мкм) размеров [4]. Прочность сцепления покрытия с основным металлом достаточно высока и приближается к прочности последнего.

Одним из важных моментов в технологии наплавки является способ подачи наплавочного материала к подложке. Изучение лазерных способов сварки и наплавки показало, что в то время как в процессах с подачей проволоки обработка осуществляется в основном практически в любом пространственном положении, преимущество порошковых материалов состоит в более эффективном поглощении лазерного излучения [15]. Наплавку в нижнем положении можно выполнять путем предварительного распределения по обрабатываемой поверхности порошка [16]. Применение порошковых материалов в иных пространственных положениях обычно требует нанесения покрытий с помощью газопламенного [17] или плазменного напыления [18] либо печной сушки пастообразной обмазки [19]. Если порошок нельзя распределить по поверхности наплавляемого изделия предварительно, то его подают специальными дозаторами в процессе наплавки. На сегодня широкое распространение получила лазерная наплавка с использованием присадочных порошковых материалов, которые подаются непосредственно в зону действия лазерного излучения посредством специальных порошковых дозаторов различных конструкций [20].

К преимуществам лазерной наплавки относят возможность нанесения наплавляемых слоев с заданными свойствами высотой 0,1...3,0 мм [4, 5]; значительное ослабление эффекта перераспределения компонентов из материала основы в наплавленный слой, что способствует повышению точности прогнозирования результатов и максимальному приближению свойств наплавленного слоя к свойствам наплавляемого материала [4, 19]; получение равноосных мелкокристаллических (высокодисперсных) структур наплавленного металла и ЗТВ малой (до 0,1...0,5 мм) протяженности [21]; минимизация припуска под финишную механическую обработку составляет приблизительно до 0,3...0,5 мм на сторону за счет малой (до 200...300 мкм) шероховатости наплавленной поверхности [22, 23].

Недостатками лазерной наплавки являются наличие поперечных холодных микротрещин в слоях наплавки и легирования, возникновение которых является следствием релаксации высоких внутренних напряжений растяжения [14]; возможность образования как внутренних, так и наружных пор, что связано с наличием неметаллических включений, остаточной влажностью наплавочного порошка, а также с загрязнением наплавляемой поверхности; сравнительная дороговизна процесса, обусловленная высокой себестоимостью ла-

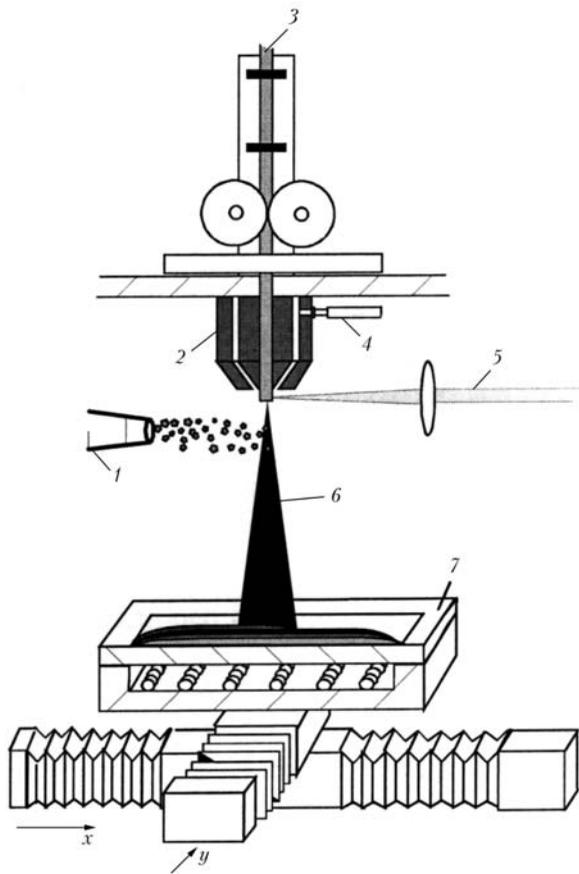


Рис. 1. Схема процесса лазерного напыления путем распыления проволоки с дополнительным введением порошковых материалов для получения композитных покрытий: 1 — подача порошка; 2 — сопло; 3 — распыляемая проволока; 4 — газ; 5 — лазерное излучение; 6 — напыляющая струя; 7 — подложка

зерного оборудования [4, 5]. Вопросы контроля, снижения и полного устранения трещинообразования при лазерной наплавке исследовали в разное время многие авторы (например, [4, 5, 14]). Сравнительно недавно украинскими учеными была предложена математическая модель этого явления, связывающая расстояние между трещинами с механическими свойствами покрытий и их толщинами [24]. Из изложенного выше следует, что к перспективным способам устранения недостатков процесса можно отнести те, которые позволяют снизить остаточные термические напряжения в наносимых слоях в сочетании с тщательной подготовкой присадочных порошков и наплавляемой поверхности. К таким способам, в частности, относится изменение термического цикла процесса наплавки за счет использования дополнительного теплового источника (например, сочетание лазерного излучения с плазменной струей).

С помощью лазерной наплавки получают изнано- и коррозионностойкие микрокристаллические, аморфизированные и аморфные покрытия из достаточно широкой гаммы материалов [21]. Од-

нако в первой половине 1980-х годов лазерную наплавку в основном применяли для восстановления изношенных деталей, работающих в условиях трения-скольжения, ударных нагрузок, абразивного износа и т. д. [4, 5, 22, 23]. Сегодня лазерная восстановительная наплавка не утратила своей актуальности даже в развитых странах [25], более того, разработана технология подводной лазерной наплавки [26].

В 1980-е годы активно проводили исследования процесса лазерного термического напыления [27, 28]. Но поскольку выполненные таким способом покрытия по своим свойствам были близки к покрытиям, выполняемым плазменными способами сварки, в дальнейшем этот процесс получил меньшее распространение, чем лазерная наплавка. В качестве напыляемых в этом процессе используются как порошковые материалы, так и проволоки, которые подаются со скоростью 0,5...11,0 м/мин (рис. 1). Напыление можно выполнять со скоростью 0,5...5,0 м/мин на дистанции между головкой и образцом 50...150 мм при мощности CO_2 -лазера 1...5 кВт [27]. Подаваемый под давлением 0,1...0,5 МПа технологический газ может быть как инертным (например, аргон), так и химически активным (азот, кислород). Возможен также вариант порошкового лазерного напыления с нагревом напыляемого порошка лазерным излучением [28]. Различия между процессами газопламенного напыления, лазерной наплавкой и лазерным порошковым напылением наглядно представлены на рис. 2. При лазерной наплавке пятно нагрева лишь немногим меньше, чем при лазерном напылении, однако в последнем случае отсутствует прямое действие излучения на подложку, что повышает локальность теплового воздействия. Прочность сцепления слоев с подложкой обратно пропорциональна высоте напыляемых слоев. В работе [29], посвященной вопросу математического моделирования лазерного порошкового напыления, расчеты проведены по двум наиболее перспективным вариантам — с основной подачей излучения и порошка и с нагревом порошка излучением (рис. 2, в).

По схеме, представленной на рис. 1, при подаче проволоки без использования порошка проводили лазерное напыление титана и нитрида титана на стальную основу путем распыления титановой проволоки в смеси газов $\text{Ar} + \text{N}_2$ с целью получения жаростойких покрытий [30]. В связи с меньшей по сравнению с порошками стоимостью проволок использование последних для лазерного напыления позволяет снизить себестоимость этого процесса. Но следует отметить, что выполненные таким способом покрытия близки по своим свойствам к получаемым дуговой металлизацией [31]. Достоинства лазерного напыления подобны основным достоинствам процессов газотермическо-

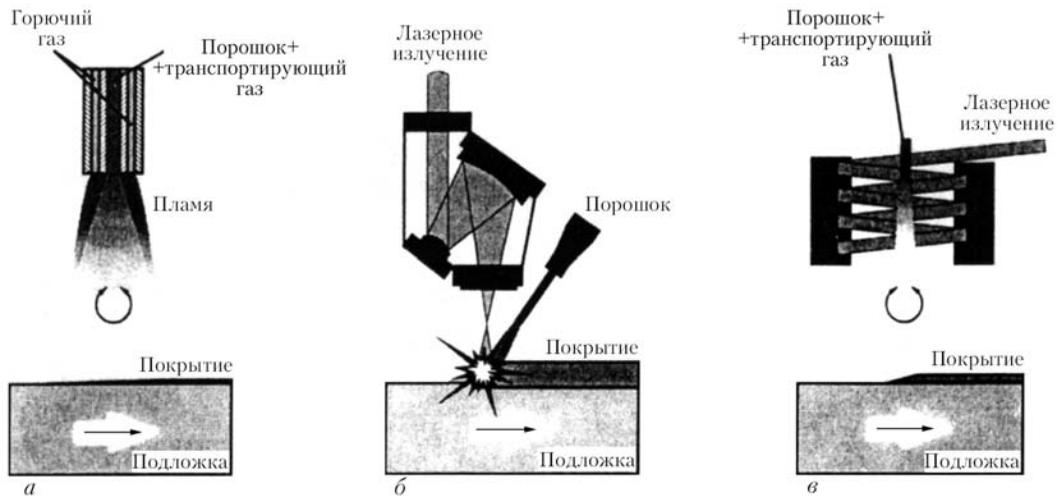


Рис. 2. Схемы технологических процессов газотермического напыления (а), лазерной наплавки (б) и лазерного порошкового напыления (в) [26]

го (например, микроплазменного) напыления [32]. К недостаткам этого процесса в первую очередь относят необходимость предварительной струйно-абразивной подготовки напыляемой поверхности и достижение значительно меньшей по сравнению с лазерной наплавкой прочности сцепления нанесенных слоев с подложкой.

Сегодня способом лазерного напыления получают тонкие покрытия с аморфной и кристаллической микроструктурой, имеющие шероховатость, практически совпадающую с шероховатостью напыляемой поверхности [33]. Такие покрытия характеризуются свойствами как металлов, так и полупроводников. Другим перспективным направлением развития этого способа является нанесение керамических покрытий, в частности, лазерное напыление оксида алюминия [34]. При этом покрытия можно наносить на подслои, например, из никелевых сплавов.

Еще одним аспектом применения лазерного напыления является прецизионный синтез трехмерных изделий. Авторы работы [35] предлагают с помощью робота получать практически любые трехмерные изделия из порошков металлов, керамик или полимеров. Процессы синтеза берут свое начало от лазерного селективного спекания [36]. Одним из наиболее перспективных современных направлений является DMD (direct metal deposition) технология, которая применяется чаще всего для изготовления штампов и пресс-форм (рис. 3). В отличие от процесса, описанного в работе [35], DMD технология может рассматриваться как трехмерная лазерная наплавка, а не напыление. В ходе процесса DMD лазерный пучок фокусируется на металлической заготовке — трехмерной пресс-форме (детали, приблизительно воспроизводящей форму объекта) или на поврежденной металлической детали, где создает зону расплавленного металла. Тонкая струя металлического порошка впрыскивается с помощью тран-

спортирующего газа в зону расплава. Цельнометаллическая деталь создается послойно в результате перемещения лазерного излучения и струи порошка под управлением компьютера по трехмерной CAD (computer aided design) модели.

Еще одним способом лазерного нанесения покрытий является вакуумное лазерное осаждение, называемое также лазерно-плазменным напылением. В случае использования модулированного лазерного излучения длительность его импульсов может составлять 60...350 нс при плотности мощности до 2...5 ГВт/см². Таким способом выполняют напыление тонких (менее микрометра) пленок. Примерами поверхностного осаждения пленок.

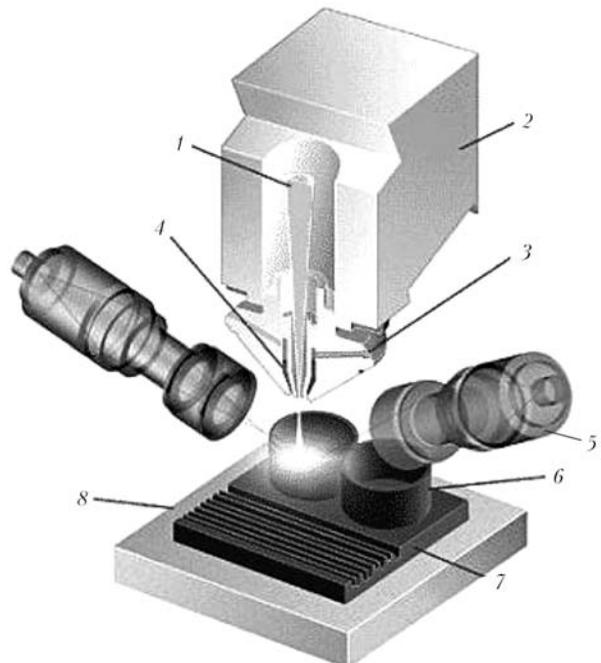


Рис. 3. Схема процесса трехмерного синтеза изделий по DMD технологии: 1 — излучение CO₂-лазера; 2 — фокусирующая оптика; 3 — подача порошка; 4 — защитный газ; 5 — сенсоры оптической системы обратной связи; 6 — создаваемый объект; 7 — заготовка или форма; 8 — платформа

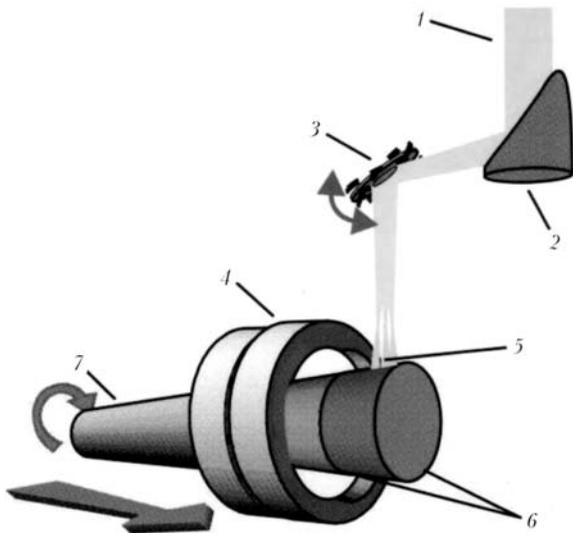


Рис. 4. Схема лазерно-индукционной термообработки и наплавки с сопутствующим ВЧ-подогревом [39]: 1 — лазерное излучение; 2, 3 — соответственно фокусирующая и сканирующая оптика; 4 — индуктор; 5 — сформированный лазерный луч; 6 — нагреваемые посредством индуктора участки образца; 7 — обрабатываемый образец

нок могут служить тонкие пленки высокотемпературных сверхпроводников, пленки из таких материалов, как GaAs, InGaAs, PbTe, Bi, ZrO₂, SrTiO₃, ZnO, а также алмазоподобные [37]. Тонкие поверхностные пленки получают при использовании лазерного излучения в CVD (chemical vapor deposition) и PVD (physical vapor deposition) процессах [38]. Как правило, здесь лазерное излучение выполняет вспомогательную роль для улучшения уже существующих процессов, что отражено в названиях LACVD (Laser asisted CVD) и LECVD (Laser enhanced CVD). К преимуществам этих процессов следует отнести возможность достижения высоких физико-механических свойств покрытия, получение поверхностей, не нуждающихся в финишной обработке и имеющих шероховатость, аналогичную шероховатости подложки; к недостаткам — наличие специальных камер и вакуумной аппаратуры, сложность подготовки поверхности изделия для нанесения покрытия, нежелательное осаждение наносимого материала на поверхности оборудования внутри вакуумных камер.

В последнее время ведутся разработки таких комбинированных технологических процессов, как наплавка, нанесение покрытий и термообработка, выполняемых лазерным излучением с сопутствующим высокочастотным (ВЧ) подогревом [39]. При наличии подающего наплавочный порошок дозатора-питателя по аналогичной схеме (рис. 4) реализуется процесс лазерно-индукционной наплавки.

Одним из примеров применения лазерно-индукционной термообработки является поверхностный переплав чугуновых кулачков с целью по-

лучения износостойкого ледебуритного слоя. ВЧ составляющая позволяет устранять остаточные внутренние напряжения и микротрещины в модифицированном слое. Именно это (наряду с возможностью значительного повышения скорости обработки либо снижения лазерной мощности) и является основным достоинством лазерно-индукционных процессов. К недостаткам относится объемный разогрев обрабатываемой детали до высоких (500...1000 °С) температур, что может привести к термомодеформациям. Поэтому комбинированной лазерно-индукционной обработке целесообразно подвергать осесимметричные изделия (например, тела вращения). Еще одним недостатком можно считать значительную энергоемкость комбинированного процесса. В подобных процессах, помимо ВЧ электромагнитного поля, может также использоваться постоянное электрическое.

Разновидностью комбинированной обработки, при которой используется лазерное излучение, являются лазерно-светолучевые технологии [40]. Светолучевые технологические процессы активно развивались в 1970–1980-е годы [41]. Светолучевые обработки успешно применяют для сварки и пайки (например, автомобильных радиаторов), но больший интерес этот процесс представляет для термообработки, в том числе комбинированной лазерно-светолучевой [40]. В последнем случае светолучевой подогрев выполняет ту же роль, что и индукционный или электрический, но при этом отсутствует такой недостаток, как повышенная энергоемкость.

В последнее десятилетие на смену сугубо лазерным технологиям все чаще приходят гибридные и комбинированные. К ним относятся лазерно-плазменные процессы, в которых используется совместное действие дуговой плазмы и лазерного энергетического источника. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования процессов взаимодействия сфокусированного излучения СО₂-лазера с плазмой столба электрической дуги показали, что в такой системе возможно возникновение особого типа газового разряда — комбинированного лазерно-дугового [42]. Его свойства отличаются от свойств как электрической дуги, так и оптического разряда, поддерживаемого лазерным излучением. Способность комбинированного разряда генерировать высокотемпературную плазму с высокой степенью неравновесности (неизотермичности) даже при атмосферном давлении окружающего газа делает его привлекательным для применения в плазмохимических, в том числе CVD технологиях. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона теоретические и экспериментальные исследования показали, что указанные свойства комбинированного разряда могут быть положены в основу создания нового класса плазменных устройств — интегрированных лазерно-дуговых

плазмотронов [43, 44]. Для таких новых гибридных процессов, как лазерно-микроплазменная сварка, наплавка и напыление, гибридное лазерно-плазменное нанесение алмазных и алмазоподобных покрытий, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, создан ряд не имеющих аналогов в мировой практике интегрированных лазерно-дуговых плазмотронов прямого и косвенного действия [44].

Обычно развитие лазерно-плазменных процессов происходит в направлении модификации поверхностей и нанесения покрытий толщиной 0,1...3,0 мм [45, 46]. Ярким примером модификации поверхностей может служить лазерно-плазменная закалка и термоупрочнение [45]. Во многом этот процесс схож с лазерным термоупрочнением [4–6]. Основным отличием является возможность замены определенной доли лазерной энергии энергией дуговой плазмы. Большой интерес представляют процессы лазерно-плазменного напыления (рис. 5). В этих процессах объединено действие лазерного нагрева поверхности с плазменным нанесением покрытий при совмещении пятна фокусирования лазерного излучения 3 с зоной формирования покрытия 5 (рис. 5) [46]. Эта технология получила название плазменное напыление, сопровождаемое лазерным нагревом (Laser assisted atmospheric plasma spraying) [47]. Применение этого процесса дает возможность получить плотный слой с повышенной прочностью сцепления. Фирмы «LERMPS-IPSe» и «IREPA-Laser» разработали и запатентовали технологию «Протал», которая за счет неполного перекрытия зоной лазерного нагрева зоны плазменного напыления обеспечивает эффект подготовки поверхности путем абляции поверхностного слоя основы, что исключает необходимость струйно-абразивной обработки [47, 48].

Вслед за японскими и французскими учеными [48] исследования процесса лазерно-плазменного напыления проводили в Германии (Институт Фраунгофера), РФ, а также в Украине. В частности, в РФ созданы плазменно-лазерная оснастка и технологии получения покрытий с помощью динамических фокусаторов [49]. Украинскими учеными [50] предложена математическая модель, описывающая движение и нагрев частиц порошка при лазерном, плазменном и гибридном напылении.

Проведены эксперименты по применению комбинированных лазерно-плазменных процессов нанесения на режущий инструмент покрытий, отличающихся повышенными тепло- и износостойкостью, а также пониженным коэффициентом трения-скольжения

при контактных эксплуатационных нагрузках [45].

В Украине приоритет в области комбинированного лазерно-плазменного нанесения покрытий принадлежит ИЭС им. Е. О. Патона, работы в этом направлении ведутся с начала 2000 г. [44]. Первоначально в исследованиях использовали непрерывное излучение CO₂-лазера, в отличие от зарубежных разработок, в которых применяли импульсное излучение Nd:YAG-лазера [46] или непрерывное излучение Nd:YAG и диодного лазеров [51]. В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона осваиваются приемы лазерно-плазменного нанесения покрытий с использованием лазеров узкого типа. Более прогрессивным в плане совместного использования энергии лазерного излучения и плазмы является способ гибридного нанесения покрытий, при котором лазерное излучение пропускается по оси плазмы [42, 43, 52]. При этом транспортирование порошкового материала осуществляют с предварительным подогревом за счет энергии лазерно-плазменного разряда [51]. В отличие от этого гибридного способа, способ, представленный на рис. 5, следует считать комбинированным. В этом случае для подогрева напыляемого порошка используют только энергию плазмы.

Кроме лазерно-плазменного напыления, в настоящее время развивается технология гибридной лазерно-плазменной наплавки. В этом процессе используют плазмотроны прямого действия и в основном порошковые наплавочные материалы [53]. Главным его преимуществом является осуществление дополнительного сжатия плазменной дуги за счет использования сфокусированного лазерного излучения (рис. 6). По мнению авторов работы [54], наиболее перспективным для этой цели является импульсное излучение Nd:YAG-лазеров в связи с возможностью его гибкого подвода по оптическому волокну в оптимизированном пространственном положении. По сравнению с лазерной наплавкой лазерно-плазменная позволяет существенно

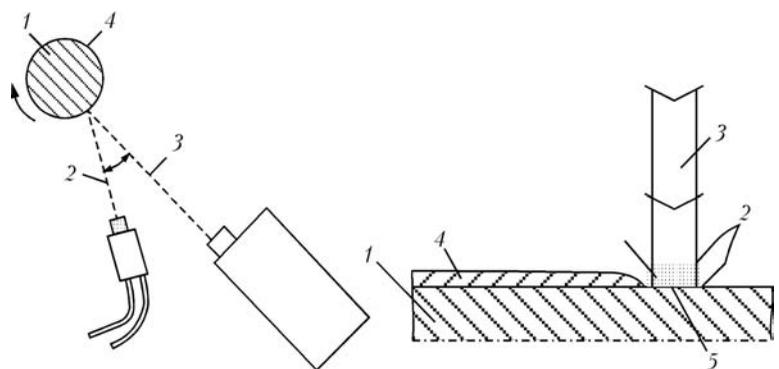


Рис. 5. Схемы процесса комбинированного лазерно-плазменного напыления покрытий [46]: 1 — образец; 2 — плазменная струя, транспортирующая порошок; 3 — лазерное излучение; 4 — нанесенный слой; 5 — зона формирования покрытия

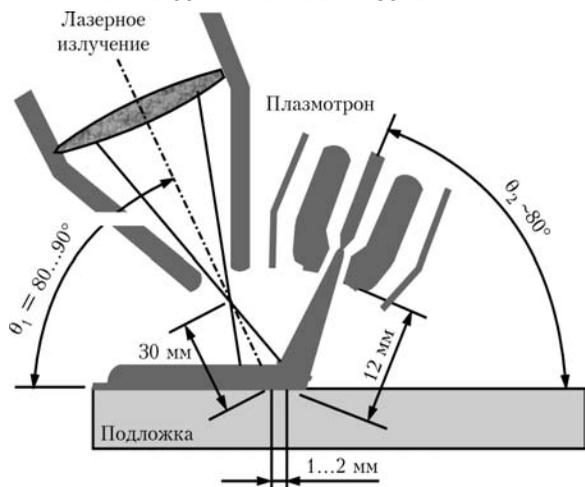


Рис. 6. Схема оптимизированного соотношения геометрических параметров процесса порошковой лазерно-плазменной наплавки, при которой используется излучение Nd:YAG-лазера (деталь — анод) [54]

снизить остаточные напряжения в наплавленных слоях, однако одним из основных ее недостатков остается значительное тепловое воздействие на наплавляемое изделие.

Анализ достоинств и недостатков плазменных, лазерных и лазерно-плазменных процессов наплавки и нанесения покрытий позволяет выявить следующее. Особенности большинства процессов плазменного напыления являются необходимость предварительной (чаще всего струйно-абразивной) подготовки поверхности, применение в ряде случаев подслоев и определенный уровень несплошности (микропористости) покрытий (табл. 2).

В случае плазменной наплавки деталь может испытывать значительный нагрев, что приводит к остаточным термодисторсиям. Лазерные и лазерно-плазменные процессы позволяют минимизировать нагрев детали, повысить прочность сцепления

наносимых слоев с подложкой, отказаться от нанесения подслоев и упростить подготовку обрабатываемой поверхности. Однако в лазерных процессах наплавки есть и определенные недостатки: напряженное состояние наплавленных слоев, наличие в них пор и микротрещин. Гибридные (комбинированные) лазерно-плазменные процессы за счет взаимодействия составляющих либо их совместного влияния на обрабатываемое изделие частично или полностью не имеют указанных недостатков. Так, сжатие и стабилизация плазменной дуги лазерным излучением позволяет повысить скорость процесса обработки и снизить общее тепловложение; предварительный подогрев порошка комбинированным разрядом в сочетании с изменением термического цикла лазерной обработки за счет добавки плазменной составляющей снижает остаточные напряжения, устраняет поро- и трещинообразование; очистка обрабатываемой поверхности за счет лазерной абляции и ее поверхностное оплавление упрощает операцию предварительной подготовки и т. д.

Таким образом, анализ процессов лазерного и гибридного (комбинированного) упрочнения и нанесения покрытий показал, что благодаря их применению стали возможными получение коррозионно- и износостойких покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками, синтез трехмерных объектов, создание тонких покрытий (например, алмазных и алмазоподобных), отличающихся специальными свойствами. Перспективы дальнейшего развития лазерно-плазменных (лазерно-дуговых) процессов модифицирования поверхностей и нанесения покрытий связаны с устранением недостатков, присущих каждой из составляющих в отдельности (лазерному и дуговому тепловым источникам), а также с повышением эффективности их взаимодействия.

Таблица 2. Сопоставление характеристик процессов газотермического и лазерного нанесения покрытий

Характеристики процесса нанесения покрытий	Газотермическое напыление	Лазерное нанесение покрытий
Тепловой источник	Газовое пламя, электрическая дуга или плазма	Лазерное излучение высокой интенсивности
Связь покрытия с основой	Механическая связь низкой или умеренной прочности*	Высокопрочная металлургическая связь
Структура покрытия	Чешуйчатая; от пористой до почти плотной*	Плотные; слои без трещин и пор
Тепловая нагрузка на рабочую зону	Низкая температура нагрева*	Незначительный нагрев
Смещение с металлом основы	Отсутствует	Незначительное
Толщина покрытия	От 0,05 до нескольких миллиметров	0,5...3,0 мм
Материал покрытий	Широкая номенклатура металлов, сплавов, твердых металлов, керамик и полимеров*	Металлы и сплавы; сплавы с твердыми частицами; твердые металлы; керамика
Производительность	От низкой до высокой*	От низкой до умеренной/(высокой)*
Себестоимость	От низкой до высокой*	От умеренной до высокой

* В зависимости от типа процесса.

1. Григорьянц А. Г., Мисюрюв А. И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технол. машиностр. — 2005. — № 10. — С. 52–56.
2. Коваленко В. С. Лазерная технология на новом этапе развития // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 4–10.
3. Vuoristo P., Tuominen J., Nurminen J. Laser coating and thermal spraying — process basics and coating properties // Proc. of ITSC-2005, Basel, Switzerland, May 2–4, 2005. — Basel, 2005. — P. 1270–1277.
4. Лазерная техника и технология: В 7 кн. — М.: Высш. шк. — Кн. 3: Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца, 1987. — 191 с.
5. Технологические лазеры: Справ.: В 2 т. — М.: Машиностроение. — Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абильситов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь и др.; Под ред. Г. А. Абильситова, 1991. — 432 с.
6. Свойства доэвтектидных комплексно-легированных сталей после лазерной термообработки / В. Ю. Хаскин, С. Ю. Павловский, В. П. Гарашук и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 5. — С. 53–57.
7. Канарчук В. С., Чигриниць А. Д., Шапошиников Б. В. Лазерна техніка та технологія для зміцнення і відновлення деталей і апаратів. — К.: Укр. транспорт. ун-т, 1995. — 42 с.
8. Pat. 4195913 US. Optical integration with screw supports / D. Dourte, N. J. Spawr, R. L. Pierce. — Publ. 04.80.
9. Pat. 4387952 US. Single axis beam scanner / R. B. Slusher. — Publ. 14.06.83.
10. Abboud J. H., West D. R. F. Processing aspects of laser surface alloying of titanium with aluminium // Mater. Sci. and Technol. — 1991. — 7, № 4. — P. 353–356.
11. Laser surface alloying using metal salt precursors / M. Pons, A. Hugon, A. Galerie, A. Fasasi // Surface and Coat. Technol. — 1991. — 45, № 1–3. — P. 443–448.
12. Katayama S., Matsunawa A., Arata Y. Laser nitriding and hardening of titanium and other materials // Electron and laser beam weld. // Proc. Intern. conf., Tokyo, July 14–15, 1986. — Oxford, 1986. — P. 323–324.
13. Pokhmurska H. V., Dovhunyk V. M., Student M. M. Wear resistance of laser-modified arc-sprayed coatings made of FMI-2 powder wires // Mater. Sci. — 2003. — 39, № 4. — P. 533–538.
14. Похмурська Г. В. Утворення тріщин у газотермічних покриттях залежно від умов їх лазерного переплавлення // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2003. — № 1. — С. 59–62.
15. Laserstrahlsschweißen mit pulverförmigem Schweißzusatz / Edelstahl-Mechanik GmbH // Praktiker. — 2007. — № 3. — S. 68–69.
16. Steen W. M., Courtney C. G.H. Hardfacing of nimonic 75 using 2 kW continuous wave CO₂ laser // Metals Technol. — 1980. — June. — P. 89–93.
17. Irons G. C. Laser fusing of flame spray coatings // Welding J. — 1978. — № 12. — P. 156–161.
18. Ayers J. D., Schaefer R. J. Consolidation of plasma-sprayed coatings by laser remelting // Laser applications in materials processing. — 1979. — 198. — P. 142–148.
19. Matthews S. J. Laser fusing of hardfacing alloy powders // Lasers in materials proc.: ASM conf. proc., Florida, USA, Nov., 1983. — Florida, 1983. — P. 138–148.
20. Автоматические порошковые питатели и технология лазерной наплавки / Zeng Хаоуан, Zhu Beidi, Tao Zengyi et al. // Chin J. Lasers. — 1993. — 20, № 3. — P. 210–214.
21. Теоретическое исследование процессов лазерной аморфизации и получения микрокристаллических структур / И. Н. Завестовская, В. И. Игошин, А. П. Канавин и др. // Тр. ФИАН. — 1993. — 217. — С. 3–12.
22. Применения лазерной технологии в ремонтном производстве / В. Е. Архипов, Е. М. Биргер, Т. А. Смолонская и др. // Свароч. пр-во. — 1985. — № 1. — С. 7–8.
23. Лазерная наплавка фасок клапанов двигателя внутреннего сгорания / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов, В. В. Шибаев и др. // Там же. — 1984. — № 5. — С. 19–20.
24. Чекурін В. Ф., Похмурська Г. В. Математична модель розтріскування лазерно модифікованих металопорошкови- вих покриттів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2004. — № 5. — С. 18–22.
25. Гофман Я. Восстановление сменных деталей с помощью лазерных технологий // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 37–38.
26. Underwater cladding with laser beam and plasma arc welding / R. A. White, R. Fusaro, M. G. Jones et al. // Welding J. — 1997. — № 1. — P. 57–61.
27. Fundamental study on thermal spraying by laser / M. Yoneda, A. Utsumi, K. Nakagawa et al. // Proc. of ATTAC'88, Osaka, May, 1988. — Osaka, 1988. — P. 137–142.
28. Wolf S., Volz R. Das Laserstrahlbeschichten integrierbarer Oberflächenschutz fuer ein breites Anwendungsspektrum des modernen Maschinenbaus // Proc. of thermal spraying conf. TS'96, Essen, Deutschland, Mar. 1996. — Essen, 1996. — S. 160–163.
29. Бушма А. И., Васенин Ю. Л., Кривцун И. В. Моделирование процесса лазерного напыления керамических покрытий с учетом рассеяния лазерного пучка напыляемыми частицами // Автомат. сварка. — 2005. — № 12. — С. 12–17.
30. Production of compositionally gradient coatings by laser spraying method / A. Utsumi, J. Matsuda, M. Yoneda et al. // Proc. of ITSC'95, Kobe, Japan, May, 1995. — Kobe, 1995. — P. 325–330.
31. Применение металлизации для восстановления деталей авиатехники из сталей 30ХГСП2А и 30ХГСА / С. Н. Юркевич, Е. Г. Прищепов, А. С. Прядко, В. Н. Мышковец // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2006. — № 6. — С. 32–33.
32. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.
33. Pat. 6312768 US. Method of deposition of thin films of amorphous and crystalline microstructures based on ultrafast pulsed laser deposition / A. Rode, E. Gamaly, D. Luther-Davies. — Publ. 06.11.2001.
34. Microstructure of Al₂O₃ nanocrystalline/cobalt — based alloy composite coatings by laser deposition / Mingxi Li, Yizhu He, Xiaomin Yuan, Shihong Zhang // Materials & Design. — 2006. — 27. — P. 1114–1119.
35. Uchiyama F., Tsukamoto K., Fons P. Three-dimensional device fabrication using the laser spray process technique // Proc. of ITSC'95, Kobe, Japan, May, 1995. — Kobe, 1995. — P. 259–262.
36. Ragulya A. V. Selective laser sintering of multilayer oxide ceramics // Functional Materials. — 2001. — 8, № 1. — P. 162–166.
37. Varyukhin V. N., Shalaev R. V., Prudnikov A. M. Properties of diamond films obtained in a glow discharge under laser irradiation // Ibid. — 2002. — 9, № 1. — P. 111–114.
38. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение. — М.: Мир, 2000 — 518 с.
39. Induktiv unterstützte Lasermaterialbearbeitung / B. Brenner, J. Standfuß, V. Fux, S. Bonß. — Dresden, Germany: Fraunhofer-Institut fuer Werkstoff- und Strahltechnik, 2001. — 6 S.
40. Лазерно-световая обработка материалов как новое направление в гибридных процессах / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, С. С. Шилов, Г. М. Алексеев // Технол. машиностр. — 2005. — № 10. — С. 37–45.
41. Хорунов В. Ф., Шань Цзиго. Сварка и пайка с использованием светового луча дуговых ксеноновых ламп (Обзор) // Автомат. сварка. — 1995. — № 5. — С. 48–52.
42. Laser-arc discharge: Theory and applications / V. S. Gvozdetzky, I. V. Krivtsun, M. I. Chizhenko et al. // Welding and Surfing Rev. — 1995. — 3. — 148 p.
43. Seyffarth P., Krivtsun I. V. Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment // Welding and allied processes. — London: Taylor and Francis Books. — 2002. — Vol. 1. — 200 p.
44. Integrated laser-arc plasmatron for laser-plasma spraying and CVD processes / Yu. Borisov, A. Bushma, A. Fomakin

- et al. // Laser technologies in welding and materials processing: Proc. of the Second Intern. conf., vil. Katsiveli, Grimea, Ukraine, May 23–27, 2005. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute NASU, 2005. — P. 57–59.
45. *Лазерно-плазменное упрочнение поверхностных слоев быстрорежущих сталей* / В. В. Мелюков, В. А. Кузьмин, А. В. Частиков и др. // Материалы 7-й Международ. практ. конф.-выставки, Санкт-Петербург, 13–16 апр. 2005 г. — С.-Пб., 2005. — С. 156–164.
 46. *Pat. 5688564 US. Process for the preparation and coating of a surface* / C. L. M. Coddet, T. Marchione. — Publ. 18.11.97.
 47. *Characterization of coatings deposited by laser-assisted atmospheric plasma spraying* / R. Zreris, S. Nowotny, L.-M. Berger et al. // Proc. of thermal spray conf., Orlando, USA, 2003. — Orlando, 2003. — P. 567–572.
 48. *Surface preparation and thermal spray in a single step: the PROTAL process* / C. Coddet, G. Montagon, T. Marchione, O. Freneaux // Proc. of 15th ITSC, Nice, France, 1998. — Nice, 1998. — Vol. 2. — P. 1321–1325.
 49. *Повышение эффективности плазменной обработки материалов при введении дополнительного источника энергии в виде лазерного излучения* / Е. А. Чашин, А. В. Федин, А. А. Митрофанов, И. В. Шилов // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования: Сб. тр. Третьей междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Санкт-Петербург, 14–17 март. 2007 г. — С.-Пб.: Изд-во политехн. ун-та, 2007. — С. 119–120.
 50. *Борисов Ю. С., Бушма А. И., Кривцун И. В. Моделирование движения и нагрева частиц порошка при лазерном, плазменном и гибридном напылении* // Доп. НАН України. — 2005. — № 1. — С. 86–94.
 51. *Pat. 6197386 US. Method for applying a coating by means of plasma spraying while simultaneously applying a continuous laser beam* / E. Beyer, S. Nowotny. — Publ. 06.03.2001.
 52. *Structure and microhardness of coatings of high-chromium cast iron powder in hybrid spraying and plasma spraying with subsequent laser glazing* / O. G. Devoino, M. A. Kardapolova, I. V. Krivtsun et al. // Laser technologies in welding and materials processing: Proc. of the Third Intern. conf., vil. Katsiveli, Grimea, Ukraine, 29 May–27 June, 2007. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute NASU, 2007. — P. 19–23.
 53. *Hai-ou Zhang, Ying-ping Qian, Gui-lan Wang. Study of rapid and direct thick coating deposition by hybrid plasma—laser manufacturing* // Surface & Coatings Technol. — 2006. — 201. — P. 1739–1744.
 54. *Wilden J., Bergmann J. P., Dolles M. Riporti superficiali laser: aumento di efficienza e flessibilita tramite processi ibridi* // Riv. Ital. Saldatura. — 2005. — Nov./Dic., 2005. — P. 809–816.

The paper analyzes the status of processes of heat hardening, alloying, cladding and coating, in which the main role is given to laser radiation. Technological sequences of the above processes are given, their advantages and disadvantages are noted. Prospects of further development of these processes are analyzed based on examples of their practical application.

Поступила в редакцию 19.06.2007



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

VII Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием

21–22 мая 2009 г.

г. Юрга

- Томский политехнический университет
- Юргинский технологический институт (филиал Томского политехнического университета)
- Департамент образования и науки Кемеровской области
- Администрация г. Юрги
- ООО «Юргинский машиностроительный завод»

- Инновационные технологии получения неразъемных соединений в машиностроении
- Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении
- Автоматизация, информатизация, экономика и менеджмент на предприятии
- Защита окружающей среды, безопасность и сохранность здоровья на предприятиях
- Передовые технологии и техника для разработки недр и землепользования

СЕКРЕТАРИАТ КОНФЕРЕНЦИИ

Адрес: ЮТИ ТПУ, 652050, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26.
Телефон для справок: (8-384-51) 6-53-95
Факс: (8-384-51) 6-53-95
E-mail: UTISCIENCE@RAMBLER.RU
Секретарь конференции: Е. Г. Фисоченко