



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ (Обзор)

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

На основании литературных данных рассмотрено развитие промышленных технологий лазерного упрочнения и нанесения покрытий с начала 1980-х гг. до настоящего времени. Проанализирована ситуация в этой области в странах СНГ и Украине. Показаны перспективные направления ведения дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: лазерные и гибридные технологии, наплавка и легирование, термообработка, промышленное применение, лазерное оборудование, новые материалы

К середине 1980-х годов в основном определился ряд областей науки и техники, в которых использование лазеров является наиболее целесообразным: электроника, машино-, приборо-, автомобиль- и судостроение, авиационная и космическая промышленность и др. [1]. Выделились и сформировались такие основные направления развития лазерных технологий, как резка и прошивка отверстий, сварка, наплавка и легирование, термообработка и др. (например, маркировка, доводка резисторов, изготовление конденсаторов и проводящих элементов, осаждение тонких пленок [2]).

Объем применения основных промышленных отечественных лазерных технологий к концу 1980-х годов распределился следующим образом: около 75 % приходилось на процессы резки и прошивки отверстий, 15 % — на сварку, 6 % — на прочие области применения (например, гравировку, маркировку, создание голограмм и др.) и лишь около 4 % — на поверхностное модифицирование и наплавку. Согласно данным 2006 г. доля лазерных процессов термического поверхностного воздействия (термообработки, наплавки, легирования и нанесения покрытий) по отношению к прочим областям применения снизилась с 4 до менее чем 3 % [3], несмотря на неуклонный рост абсолютных показателей объема продукции, в изготовлении которой задействованы указанные процессы.

Согласно данным современной научно-технической литературы лазерные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий можно разделить на следующие технологические поднаправления: лазерная термообработка с оплавлением и без (лазерная закалка); лазерное легирование; лазерная наплавка; лазерное оплавление предварительно нанесенных покрытий; лазер-

ное нанесение покрытий; гибридные и комбинированные процессы лазерной термообработки, наплавки и нанесения покрытий.

Одной из первых разработок в области лазерного поверхностного упрочнения является технология термоупрочнения (закалки) различных деталей — от режущих кромок металло- и деревообрабатывающего инструмента [4] до внутренних поверхностей цилиндров двигателей внутреннего сгорания [5]. При лазерной термообработке обычно происходит упрочнение поверхностного слоя металла на глубину 0,1...2,0 мм. Такую обработку обычно используют для достижения эффекта, который не дают такие способы, как индукционная или пламенная закалка, химико-термическая обработка [6]. В настоящее время в развитых странах с помощью лазерной закалки упрочняют буровые штанги и долота, кулачки чугунных распределительных валов, детали из черных и цветных металлов. Для повышения поверхностной твердости изделий и их формирования используют ударные волны, образующиеся при лазерной обработке [7]. Этот эффект применяют также для обработки диэлектрических материалов.

Параллельно с исследованиями процесса лазерной термообработки разрабатывались технологии повышения эксплуатационного ресурса за счет поверхностного легирования [8], когда при формировании оплавленного поверхностного слоя происходит модифицирование его структуры, которое заключается в образовании матрицы (например, аустенитной), легируемой отдельными элементами (например, хромом) и упрочняющими фазами (например, карбидами). Лазерному легированию подвергают инструментальные и конструкционные низкоуглеродистые стали, а также алюминиевые и титановые сплавы [9].

Одной из основных трудностей, возникающих при промышленном внедрении лазерных процессов термоупрочнения и легирования, является обоснование необходимости введения дополнительной технологической операции в существующий



ющий процесс изготовления серийно выпускаемого изделия. Значительно проще этот вопрос решался при разработке технологий восстановления деталей машин и механизмов, подвергшихся износу (деталей двигателей внутреннего сгорания, ходовой части машин и сельскохозяйственной техники), лазерной порошковой наплавкой или оплавлением покрытий, нанесенных газотермическими способами [10]. При лазерной наплавке чаще используют порошковые присадочные материалы, которые подают с помощью специальных дозаторов-питателей в зону действия лазерного излучения. В настоящее время лазерную наплавку используют как для изготовления новой продукции [11], так и восстановления изношенных деталей и инструмента (в первую очередь штампового) [12]. При лазерном оплавлении предварительно нанесенных покрытий основной задачей является получение проплавления на всю глубину покрытия, чтобы создать металлургический контакт с металлом основы при отсутствии выброса последнего в покрытие. Благодаря такому преимуществу, как отсутствие необходимости подачи присадочного порошка в зону плавления, этот способ получил широкое распространение [13].

В странах СНГ в 1990-е годы возросла потребность в запасных частях для автомобильного, железнодорожного и судового транспорта, а также для оборудования машино- и приборостроительной промышленности, что способствовало значительному прогрессу в развитии технологий восстановления деталей. Увеличилась доля изделий, которые восстанавливают дугowymi, газотермическими и лазерными способами. Многие исследователи (например, в работе [14]) особо выделяют лазерные технологии как достаточно перспективные, позволяющие сочетать характерную для дуговой наплавки прочность сцепления наплавленных слоев с присущим газотермическому напылению отсутствием остаточных термических деформаций. Доля изделий, изготавливаемых с помощью лазерной сварки, постепенно сокращалась. В области лазерной резки в это время наблюдался переход от выпуска крупных серий промышленных изделий, ориентированных на государственные заказы, к изготовлению их мелкими сериями, ориентированными в основном на частного потребителя (например, изделия рекламного и презентационного характера). Такие перемены привели к разработке соответствующего лазерного оборудования, отличающегося меньшей энергоемкостью, более компактного, оснащенного системами компьютерного управления [15].

Основной особенностью в области разработки и внедрения промышленных технологий лазерной наплавки и модифицирования в странах СНГ стало снижение доли процессов лазерной закалки

(термообработки) и легирования. В качестве примеров использования технологий лазерного восстановления, получивших распространение в 1990-е годы, следует отметить наплавку деталей двигателей внутреннего сгорания (седел клапанов [16], шеек коленчатых и распределительных валов [17], шатунных пальцев, разъемных кулачков и др.), деталей ходовой части автомобильного [18] и железнодорожного транспорта, машин для сельского хозяйства [19], пищевой, швейной промышленности и др. Разработка соответствующих технологий рельсов велась в 1980-е годы. Делались попытки внедрения процессов лазерного восстановления в авиационную промышленность (например, автором этой работы в 1995 г.).

В последнее десятилетие XX ст. получили развитие такие процессы лазерного нанесения покрытий, как напыление тепло-, коррозионно- и износостойких металлических покрытий, оплавление предварительно нанесенных керамических покрытий, создание композитных покрытий, осаждение продуктов испарения (абляция), а также осаждение из паровой (газовой) фазы [20] с использованием лазерного химического излучения (CVD — chemical vapour deposition). Последние три способа имеют следующие области применения: получение и ремонт масок микроэлем; производство одноступенчатых омических контактов; нанесение твердых покрытий на контролируемые площади; получение неравновесных материалов и материалов с контролируемым размером зерна. Однако внедрение процессов лазерного нанесения покрытий затруднено в связи с необходимостью устранения следующих недостатков: растрескивания керамических и композиционных покрытий при их оплавлении непрерывным излучением CO_2 -лазеров или нанесении с использованием того же излучения; низких скоростей роста покрытий при абляции и CVD методе; в отдельных случаях необходимостью введения дополнительной технологической операции предварительной (например, струйно-абразивной) подготовки поверхности при напылении.

За рубежом активное развитие технологий лазерной поверхностной обработки началось еще в середине 1990-х годов и продолжается до сих пор. В первую очередь это обусловлено появлением лазерного оборудования нового поколения (табл. 1), к которому можно отнести компактные, но достаточно мощные CO_2 -лазеры и технологические комплексы с компьютерным управлением на их основе. Особый интерес вызывают щелевые CO_2 -лазеры, используемые сегодня в основном для резки. Они имеют огромный потенциал технологических применений благодаря достаточно высокой (до 8 кВт) мощности генерируемого излучения, отсутствию прокачного средства, крайне малому потреблению рабочих газов (полная за-



Таблица 1. Технические характеристики некоторых современных лазерных установок фирмы «Rofin Sinag» (Германия)

Тип лазеров	Серия	Модель	Длина волны излучения, мкм	Режим генерации излучения	Пределы регулирования мощности, Вт	Частота импульсов, Гц	Качество излучения, мм-мрад	Минимальный диаметр/размер фокусирования излучения, мм	Примечания
Щелевые CO ₂ -лазеры	SC (отпаянные)	SC x60	10,6	Непрерывный и импульсный	8...600	0...100000	> 0,8	< 0,1	—
	DC (диффузионно-охлаждаемые)	DC 040	10,6	» »	400...4000	0 или 2...5000	≥ 0,9	< 0,1	—
		DP 080 HP	10,6	Непрерывный	800...8000	—	≥ 0,9	< 0,1	—
Твердотельные с диодной накачкой	DP (Nd:YAG-лазеры)	DP 040 HP	1,06	Непрерывный и импульсный	400...4000	—	25	0,6	Срок службы 10000 ч
	DS (дисковые Yb:YAG-лазеры)	DS 030 HQ	1,06	То же	300...3000	—	≤ 10	0,2	Срок службы 10000 ч (КПД до 20 %)
Диодные	DL-Q	DL 031 Q	0,808, 0,940	» »	300...3100	—	—	0,8×1,3	Рабочая дистанция при минимальном фокусе 66 мм (КПД более 20 %)
	DL-R	DL 036 R	0,940	» »	360...3600	—	—	1,2...3,0	То же при минимальном фокусе 130 мм

мена рабочей смеси — раз в полгода или в год) и малым габаритам. Помимо новых моделей CO₂-лазеров, появились Nd:YAG-лазеры с повышенными эксплуатационным ресурсом и мощностью, имеющие диодную накачку, а также крайне компактные и достаточно мощные диодные и дисковые лазеры (табл. 1). Разработаны также принципиально новые оптоволоконные лазеры [21], позволяющие сочетать высокую (до 100 кВт) мощность непрерывной генерации излучения с особенно длительным (от 100 тыс. до 1 млн ч) ресурсом работы. Характерной чертой лазеров нового поколения является повышение их общего КПД: у CO₂-лазеров — с 5...10 до 8...15 %; у Nd:YAG-лазеров — с 1...2 до 5...8 % и более; у диодных лазеров — до 42...50 %. Повышение КПД в сочетании со снижением себестоимости лазерного оборудования, уменьшением его размера и увеличением экономичности газопотребления снижает себестоимость процессов лазерной обработки, делают это оборудование более доступным для потребителя.

Другим важным моментом, обусловившим перемены в рассматриваемых лазерных технологиях, является активизировавшееся в последнее десятилетие развитие гибридных (или комбинированных) процессов наплавки и нанесения покрытий [22]. Эти процессы направлены на расширение возможностей лазерной обработки за счет сов-

местного использования лазерного излучения с другими тепловыми источниками энергии — электрической дугой, струей плазмы, высокочастотным электромагнитным полем. Под гибридными процессами подразумеваются такие, в которых лазерное излучение, взаимодействуя с другим источником энергии, образует общий энергетический источник с новыми свойствами; комбинированными процессами называют такие, в которых лазерное излучение и второй энергетический источник оказывают совместное воздействие на обрабатываемый материал, но при этом не взаимодействуют друг с другом.

Основной целью разработки гибридных и комбинированных лазерных технологий является сохранение и по возможности усиление характерных для каждого из входящих в них процессов преимуществ при одновременном взаимном устранении их основных недостатков. Так, использование дуговой составляющей при лазерной наплавке повышает общее тепловложение при одновременном их снижении необходимой лазерной мощности путем замены ее мощностью дугового источника [23]. Это позволяет не только значительно уменьшить себестоимость оборудования и эксплуатационные затраты, но и снизить опасность возникновения одного из основных дефектов — трещин в наплавленных слоях. Использование лазерного излучения для предварительного подогрева и очистки напыляемой газотермичес-

кими способами поверхности позволяет обойтись без предварительной струйно-абразивной подготовки поверхности изделий [24].

Рассмотренные особенности развития лазерной техники и технологии послужили основой для модернизации существующих и создания новых процессов лазерного нанесения покрытий и поверхностного упрочнения. Разрабатываются новые способы управления процессом лазерной наплавки и вспомогательное оборудование для этого [25], создаются технологические приемы, позволяющие наплавлять слои на титановые [26] и алюминиевые сплавы [27], а также композиционные на основе магния [28]. При этом по-прежнему развиваются уже известные технологии — например, наплавка на жаропрочные никелевые сплавы [29] или стали [30]. Прогресс в области технологий лазерного восстановления позволил разработать ремонтные технологии штампового инструмента и лопаток турбин реактивных двигателей с использованием ручного лазерного инструмента [31], восстановления и упрочнения инструмента [32], восстановления различного рода авиатехнических деталей и пр. [33]. Продолжаются исследования процессов лазерной обработки импульсным и непрерывным излучением покрытий, предварительно нанесенных газотермическими способами [34]. Так, импульсное излучение Nd:YAG-лазера позволило оплавливать или наносить керамические покрытия без образования в них трещин. Внедрение таких процессов в промышленность обеспечит улучшение свойств теплозащитных керамических покрытий лопаток газотурбинных двигателей, покрытий из гидроксипатита, используемых в медицине для нанесения на имплантанты, а также получение износостойких покрытий из самофлюсующихся сплавов.

Некоторые технологические разработки (например, наплавка с присадочной проволокой) изначально ориентируют на использование нового оборудования (например, диодных лазеров) [35], что связано с особенностями формирования излучения и приводит к качественно новым результатам. Достижение высокого уровня в уже известных процессах порошковой лазерной наплавки обеспечивают также металловедческие и металлофизические подходы к решению задач, возникающих в ходе исследований [29, 30]. Пройден этап изготовления стационарных лазерных комплексов и начат серийный выпуск мобильных лазерных систем, в том числе для восстановления поверхности деталей (например, для ремонтной наплавки литейных форм [36]). Одним из перспективных направлений в развитии процессов лазерной наплавки является разработка способов объемного формообразования деталей машин методом лазерного переплава присадочного металла,

а также восстановления лопаток газотурбинных двигателей [31, 37]. Первое направление актуально при изготовлении деталей, которые невозможно получить другими способами обработки, например, сформировать в теле стальной детали охлаждающие каналы сложной пространственной формы, причем для повышения теплоотвода их стенки следует выполнить из меди.

Поверхности функциональных покрытий, получаемых различными способами наплавки и нанесения покрытий, зачастую нуждаются в финишной механической обработке. При обработке покрытий, полученных с использованием лазерного излучения, к применяемому для этого инструменту выдвигаются повышенные требования. Во-первых, желательнее использовать инструмент с улучшенными служебными характеристиками, что связано с повышением твердости поверхностей, обработанных лазерным излучением. Во-вторых, в связи с характерной для лазерных технологий тенденцией минимизировать припуск, инструмент должен обеспечивать высокую точность финишной обработки. Все это стало предметом исследований последних лет во многих странах, в том числе и в Украине [38].

В настоящее время в Украине научные исследования ведутся в области лазерных и гибридных процессов. Однако развитие последних находится еще на достаточно ранней стадии, а применяемые в промышленности еще с 1990-х годов технологии лазерного восстановления уже в значительной мере утратили свою актуальность по причине насыщения рынка сравнительно недорогими запасными частями от производителей.

В отличие от описанной ситуации в России восстановление деталей с помощью лазера получило более широкое распространение. Одним из последних крупных промышленных внедрений стала разработанная в Иркутске и Нижнем Удинске (Восточно-Сибирская железная дорога) технология лазерной наплавки шеек осей вагонов [39]. Активно также развиваются и применяются гибридные технологии [40], использующие лазерное излучение в CVD процессах [41], технологии лазерного осаждения покрытий [42] и другие процессы. Базой для подобных внедрений является налаженное в России производство технологических лазерных установок (табл. 2, 3). Однако сравнение современного российского оборудования с передовым зарубежным (табл. 1–3) показало, что развитие последнего ушло далеко вперед. Так, из-за характерных для конца XX в. технических решений российские лазеры проигрывают как по общему КПД и отдельным техническим характеристикам, так и по стоимости обслуживания. В перспективе планируется выпуск быстропроточных CO₂-лазеров, имеющих меньший КПД и потребляющих на несколько по-

Таблица 2. Технические характеристики некоторых современных технологических CO₂-лазеров фирмы «Технолазер» (РФ)

Тип лазеров	Модель	Режим генерации излучения	Пределы регулирования мощности, Вт	Частота импульсов, Гц	Апертура, мм	Расходимость излучения, мрад	Минимальный диаметр фокусированного излучения, мм	КПД, %
С поперечной подкачкой	ТЛ-1,5	Непрерывный и импульсный	100...1700	0...1000	∅ 25	1,4	< 0,10	5,0...6,0
	«Тандем»	Непрерывный	100...7000	—	28×28	1,4	—	7,5
	ТЛ-7,5	»	400...10000	—	Кольцо 50/22	1,5	< 0,30	6,0...8,0
Трубчатые с диффузионным охлаждением	ТЛВ-700	Непрерывный и импульсный	70...750	0...2000	∅ 5	—	< 0,05	7,0

Примечание. Здесь и в табл. 3 длина волны излучения составляет 10,6 мкм.

Таблица 3. Технические характеристики некоторых современных импульсно-периодических Nd:YAG-лазеров (ОКБ «Булат», РФ)

Модель	Энергия импульса, Дж	Мощность средняя/пиковая, Вт	Частота импульсов, Гц	Стабильность энергии излучения, %	Диаметр сфокусированного пучка, мм	КПД, %
LRS-200	≤ 80	200/8000	0,5...20	± 2	0,30...2,00	2,5...3,0
HTS-200	≤ 80	200/8000	0,5...100	± 2	0,30...2,00	2,5...3,0
HTF-150	≤ 60	150/6000	0,5...20	2	0,35...2,00	2,5

рядков больше гелия по сравнению со щелевыми диффузионно-охлаждаемыми (табл. 2). Твердотельные лазеры вместо прогрессивной диодной накачки имеют устаревшую ламповую (табл. 3). Заметный прогресс наблюдается лишь в области разработки волоконных лазеров [21]. Однако для российского потребителя использование отечественного оборудования по экономическим причинам предпочтительнее, чем приобретение зарубежного.

Для сравнения рассмотрим ситуацию, сложившуюся с лазерным восстановлением и модифицированием в Республике Беларусь. Применяемые там технологии в основном соответствуют уровню 1980–1990-х годов, но при этом характеризуются значительными объемами промышленного внедрения. Одна из причин этого заключается в том, что в Белоруссии подход к решению практических задач включает не только традиционные технологические позиции, но и применение математического (в том числе теплофизического) моделирования и металлургические разработки [43]. Это относится как к исследованиям в области закалки и упрочнения [43, 44], так и нанесения покрытий и легирования [43, 45]. Кроме того, пристальное внимание уделяется физико-механическим свойствам (в первую очередь износостойкости) покрытий, получаемых с помощью лазерного излучения как наплавкой с порошковой присадкой, так и оплавлением предварительно напыленных покрытий [46]. Такой комплексный на-

учно-исследовательский подход позволяет компенсировать применение устаревших технологических решений и достичь требуемых практических результатов. В сочетании с промышленными потребностями он привел к значительному прогрессу в области лазерных технологий в Белоруссии. Лазерное упрочнение изначально закладывается в производство новой продукции, а не только применяется при восстановлении отработавших свой ресурс деталей.

В последнее время также при выпуске новой продукции начала возрастать заинтересованность украинской промышленности в использовании технологий поверхностного термоупрочнения. Вновь стали актуальными технологии лазерной закалки (термообработки) и легирования [47]. При этом к основным пожеланиям со стороны потребителей относится увеличение эксплуатационного ресурса в 1,5...2,0 раза при повышении себестоимости процесса изготовления упрочненной детали не более чем на 10...30 % [48]. В ряде случаев лазерные технологии позволят продлевать ресурс работы деталей машин и механизмов в 2–3 раза и более, но в плане себестоимости требуемые показатели еще не всегда достижимы.

Выводы

1. Для современной промышленности наибольший интерес представляют такие области использования лазерных технологий, как синтез трехмерных объектов, нанесение тонких пленок и



наноструктурных покрытий, получение покрытий из новых функциональных материалов, а также гибридные процессы обработки, позволяющие благодаря новым технологическим эффектам достигать снижения себестоимости и повышения качества наносимых (модифицируемых) слоев.

2. Активно ведется модернизация существующих и создание новых процессов лазерного нанесения покрытий и поверхностного упрочнения. Разрабатываются новые способы управления процессами лазерного нанесения покрытий и соответствующего вспомогательного оборудования, создаются технологические приемы, позволяющие наплавлять слои на титановые, алюминиевые и композиционные магниевые сплавы. Продолжают развиваться уже известные технологии, например, наплавка на жаропрочные никелевые сплавы или стали.

3. Для повышения доли процессов поверхностной обработки в общем объеме использования лазерных технологий и достижения прогресса в их развитии целесообразным представляется разработка способов устранения поро- и трещинообразования в наносимых или модифицируемых с помощью лазерного излучения слоях, гибридных (комбинированных) технологических процессов, в которых энергия лазерного излучения частично заменяется более дешевой плазменной или дуговой энергией.

4. К наиболее перспективному оборудованию для поверхностной обработки можно отнести щелевые CO₂-лазеры с диффузионным охлаждением, волоконные и диодные лазеры, а также Nd:YAG-лазеры с диодной накачкой. Особо следует отметить мобильные лазерные комплексы, позволяющие осуществлять ремонтную наплавку непосредственно по месту расположения вышедшего из строя изделия.

1. Дьякова Ю. Г., Лукин Э. Л., Стельмах М. Ф. Состояние и перспективы применения лазеров в народном хозяйстве // Электрон. пром-сть. — 1981. — № 5/6. — С. 3–9.
2. Напыление пленок химических элементов с помощью лазера на неодимовом стекле / В. М. Бояков, В. М. Епихин, Б. А. Калинин и др. // Квант. электроника. — 1978. — 5, № 7. — С. 1582–1589.
3. Бернадский В. Н., Шелягин В. Д., Маковецкая О. К. Современный рынок лазерной техники для сварки и обработки материалов // Автомат. сварка. — 2007. — № 10. — С. 53–59.
4. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак / Под общ. ред. В. С. Коваленко. — Киев: Техніка, 1981. — 131 с.
5. Андрияхин В. М., Зверев С. Е., Чеканова Н. Т. К вопросу о выборе режимов лазерного упрочнения гильз блока цилиндров двигателя ЗИЛ-130 // Тез. докл. 1-й Всесоюз. науч. конф. «Научно-техническое сотрудничество «Предприятие — вуз», г. Москва, 9–11 дек. 1980. — М.: Изд-во Москов. ун-та, 1980. — С. 7–8.
6. Messer K., Bergmann H. W. Stand des Laserstrahlhartens // HTM: Mather-techn. Mitt. — 1997. — 52, № 2. — С. 74–82.

7. Niehoff H., Schulze, Vollertsen F. Laser induced shock waves in hardening and forming technologies // J. Technol. Plast. — 2005. — 30, № 1/2. — P. 37–50.
8. Mazumder J., Singh J. Laser surface alloying and cladding for corrosion and wear // High Temp. Mater. and Proc. — 1986. — 7, № 2/3. — P. 101–106.
9. 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.
10. Применения лазерной технологии в ремонтном производстве / В. Е. Архипов, Е. М. Биргер, Т. А. Смоленская и др. // Свароч. пр-во. — № 1. — С. 7–8.
11. Jian L. N., Wang H. M. Microstructure and wear behaviours of laser-clad Cr₁₃Ni₅Si₂-based metal-silicide coatings on a titanium alloy // Surface and Coat. Technol. — 2005. — 192, № 2/3. — P. 305–310.
12. Frank C. Laserstrahlsschweißen von Hand mit dem Nd:YAG-Laser. — Т. 3: Notfallservice fuer Werkzeuge und Formen // Praktiker. — 2005. — 57, № 10. — S. 293–295.
13. Исследование переходной зоны покрытий, оплавленных лазерным лучом / А. П. Пилипчук, О. Г. Девойно, Ю. А. Грибков, М. А. Кардаполова // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения. — Минск: Изд. Полоц. гос. ун-та, 2001. — С. 375–378.
14. Коваленко В. С. Лазерная технология на новом этапе развития // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 4–10.
15. Байко И. Ю., Истомин Е. А., Поизнер Б. Н. Лидеры и аутсайдеры тридцатилетнего марафона газоразрядных лазеров // Квант. электроника. — 1994. — № 11. — С. 1103–1104.
16. Aihua W., Zengyi T., Beidi Z. Laser beam cladding of seating surfaces on exhaust valves // Welding J. — 1991. — 70, № 4. — P. 1065–1095.
17. Backes G. Beschichten von Kurbelzapfen mit CO₂-Laserstrahlung // Maschinenmarkt. — 1995. — 101, № 12. — S. 42–45.
18. Восстановление резьб методом лазерной наплавки / В. Ю. Хаскин, О. А. Величко, И. В. Молчан и др. // Автомат. сварка. — 1995. — № 6. — С. 56–58.
19. Оборудование и технология лазерного восстановления деталей двигателей сельхозмашин / В. Ю. Хаскин, Н. И. Голего, В. Н. Дмитренко и др. // Материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. «Моделирование процессов и технологического оборудования в сельском хозяйстве», г. Мелитополь, 17–19 авг. 1994. — Мелитополь, 1994. — С. 31–32.
20. Хоккинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение. — М.: Мир, 2000. — 518 с.
21. Минаев В. П. Фирма и ее лидер // Лазер-информ: Информ. бюл. Лазерной ассоциации, 2003. — Апрель, № 8(263). — С. 1–5.
22. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю. Тенденции развития исследований комбинированных лазерно-дуговых процессов: Обзор. информ. ИЭС. — Киев, 2002. — 12 с. — (Препр. / НАН Украины, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 1/2002).
23. Сом А. И., Кривцун И. В. Лазер+плазма: поиск новых возможностей в наплавке // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 36–41.
24. Surface preparation and thermal spray in a single step: the PROTAL process / C. Coddet, C. Montaron, T. Marchionne, O. Frencaux // Thermal Spray: Meeting the challenges of the 21st century: Proc. 15th Intern. thermal spray conf., May 25–29, 1998, Nice, France. — Nice: ASM International, 1998. — Vol. 2. — P. 1321–1325.
25. Заявка 10337149 Германия, МПК⁷ В 23 К 26/03, В 23 К 26/34. Способ управления процессом лазерной или плазменной наплавки / E. Bayer, J. Steinwandel, J. Hoschele, B. Stimper. — Заявл. 13.08.2003; Оpubл. 10.03.2005.
26. Liu Rong-xiang, Lie Ting-quan, Guo Li-xin. Последние разработки в области лазерной наплавки на титановые поверхности // Mater. Sci. and Technol. — 2004. — 12, № 5. — P. 524–528.



27. *Technology problems of laser cladding procedure for in-situ TiCp/Al composite layer on aluminum alloy / Ma Nai-Heng, Wang Hao-Wei, Liang Gong-Ying, Su Jun-Yi // J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci. — 2004. — 9, № 1. — С. 15–18.*
28. *Mei Z., Guo L. F., Yue T. M. J. The effect of laser cladding on the corrosion resistance of magnesium ZK60/SiC composite // Mater. Proc. Technol. — 2005. — 161, № 3. — P. 462–466.*
29. *Li Mingxi, He Yizhu, Yuan Xiaomin. Effect of nano-Y₂O₃ on microstructure of laser cladding cobalt-based alloy coatings // Appl. Surface Sci. — 2006. — 252, № 8. — P. 2882–2887.*
30. *Zhang Dawei, Zhang Xinping. Laser cladding of stainless steel with Ni–Cr₃C₂ and Ni–WC for improving erosive-corrosive wear performance // Surface and Coat. Technol. — 2005. — 190, № 2/3. — P. 212–217.*
31. *Handgefuehrt mit dem Laserstrahl an Turbinenbauteilen schweißen / W. Storch, K. Letsch, I. Jokiel, C. Frank // Praktiker. — 2006. — № 6. — S. 170–175.*
32. *Микроструктура и свойства покрытия, нанесенного лазерной наплавкой на рабочий конец фрезы / Lu Wei, Hou Li-Qun, Chen Kai, Zuo Tie-Chuan // Trans. China Weld. Inst. — 2004. — 25, № 6. — С. 51–53.*
33. *Юркевич С. Н., Томашевич А. В., Юркевич А. С. Восстановление деталей авиатехники методом лазерной наплавки // Ремонт, восстановление и модернизация. — 2006. — № 3. — С. 31–32.*
34. *Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек / Под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. — Минск: Бестпринт, 2002. — 480 с.*
35. *Syed Waheed Ul Haq, Li Lin. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition // Appl. Surface Sci. — 2005. — 248, № 1/4. — P. 518–524.*
36. *System zum Laserauftragsschweißen fuer 1400 Euro im Monat leasen / Carl Baasel La GmbH & Co KG // Maschinenmarkt. — 2006. — № 13. — S. 56.*
37. *Григорьянц А. Г., Мисуров А. И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. — 2005. — № 10. — С. 52–56.*
38. *Харламов Ю. А., Будагьянц Н. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учеб. пособие. — В 2 т. — Т. 2. — Луганск: Изд-во Восточно-укр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. — 480 с.*
39. *Георгиев В. В новый век со старым багажом? // Гудок. — 2003. — 13 мая. — С. 4.*
40. *Лазерно-плазменное упрочнение поверхностных слоев быстрорежущих сталей / В. В. Мелюков, В. А. Кузьмин, А. В. Частиков и др. // Материалы 7-й Междунар. практ. конф.-выставки, г. С.-Петербург. — 13–16 апр., 2005 г. — С.-Пб., 2005. — С. 156–164.*
41. *CVD diamond transmissive optics for CO₂ lasers / V. V. Kononenko, V. I. Konov, S. M. Pimenov et al. // New Diamond and Frontier Carbon Technol. — 2000. — 10, № 2. — P. 97–107.*
42. *Лазерное напыление пленок ZnO на кремниевые и сапфировые подложки / А. Н. Жерихин, А. И. Худобенко, Р. Т. Вильямс и др. // Квант. электроника. — 2003. — № 11(33). — С. 975–980.*
43. *Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко и др. — Минск: Беларуская навука, 1998. — 583 с.*
44. *Крайко С. Э. Влияние толщины поглощающего покрытия на распределение микротвердости при лазерной термообработке // Машиностроение. — 2004. — Вып. 20. — С. 124–127.*
45. *Формирование структуры поверхностного слоя при однократном лазерном легировании / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, Н. Н. Дорожкин, О. В. Дьяченко // Инж.-физ. журн. — 2003. — 76, № 1. — С. 98–101.*
46. *Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Дьяченко О. В. Влияние параметров лазерной обработки и легирующих компонентов на физико-механические свойства покрытий // Машиностроение. — 2003. — Вып. 19. — С. 70–75.*
47. *Любченко А. П., Пацкова Г. И. Влияние лазерной обработки и обкатки роликами на сопротивление усталости высокопрочного чугуна // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2005. — № 1. — С. 90–93.*
48. *Канарчук В. С., Чигринцев А. Д., Шапошников Б. В. Лазерна техніка та технологія для зміцнення і відновлення деталей і апаратів. — К.: Укр. транспорт. ун-т, 1995. — 42 с.*

Development of commercial technologies of laser strengthening and coating is considered beginning from the 1980s up to the present based on published data. The situation in this field in CIS countries and Ukraine is analyzed. Promising directions of further research in this field are shown.

Поступила в редакцию 24.10.2007