

УДК 621.793

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22

Современное состояние лазерных технологий в области нанесения функциональных покрытий*

М. В. Палабугин, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. Г. Калюжный, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассмотрены два основных направления в сфере использования лазерного излучения для нанесения функциональных покрытий – нанесение покрытий с использованием сугубо лазерного излучения и комбинированием лазерных и других технологий. Определены наиболее востребованные технологические лазеры, используемые в обоих направлениях: газовые молекулярные лазеры, диодные, волоконные, а также твердотельные лазеры. Рассмотрены методики упрочняющей термообработки деталей с использованием лазерного пучка как с оплавлением материала, так и без него. Представлен метод внедрения легирующих компонентов металлической и неметаллической природы в материал подложки с использованием лазерных технологий. Приведены методики лазерной наплавки, где в зону воздействия лазерного излучения наплавочный материал подается как в виде порошковой смеси, так и в виде присадочной проволоки. Порошковая смесь наиболее распространена в качестве наплавочного материала, реже используется проволока. Рассмотрены технологии лазерного напыления, используемые в создании трехмерных объектов. Приведены гибридные технологии напыления покрытий – лазерная наплавка с использованием плазменной дуги и высокочастотного подогрева. Выяснено, что при лазерно-плазменной наплавке применяются два вида плазматронов – прямого и косвенного типа действия. Помимо гибридной лазерной наплавки рассмотрен метод гибридного лазерного напыления – плазменное напыление, или LAAPS, сопровождаемое лазерным нагревом и позволяющее получать покрытия с повышенной прочностью сцепления с поверхностью подложки. Рассмотрены основные преимущества (возможность регулировки толщины наплавляемых слоев покрытия, уменьшение зоны термического воздействия) и недостатки (возникновение на поверхности холодных микротрещин, образование в покрытии пор) при нанесении покрытий с использованием лазерного излучения. На примере практического применения проанализированы перспективы развития лазерных и лазерно-плазменных технологий в области нанесения функциональных покрытий. Развитие данных технологий в будущем во многом связано с устранением их недостатков, увеличением эффективности взаимодействия лазерных и плазменных технологий.

Ключевые слова: лазерные технологии, термообработка, наплавка, нанесение покрытий, гибридные и комбинированные технологии.

Введение

Лазерные технологии стали неотъемлемой частью областей, связанных с нанесением функциональных покрытий. Выделяются два основных направления в этой сфере деятельности. Первое направление – это лазерное нанесение функциональных покрытий. К нему можно отнести метод лазерного модифицирования поверхности и лазерную наплавку [1]. Второе направление – это гибридные, или комбинированные технологии по нанесению функциональных покрытий. К ним можно отнести лазерную обработку при использовании высокочастотного подогрева, а также лазерно-плазменную методику по формированию покрытия. В состав наиболее востребованных технологических лазеров для данной отрасли входят: газовые CO₂-лазеры, волоконные, диодные и твердотельные, в частности Nd:YAG-лазеры [2].

Целью работы является изучение технологий в области нанесения функциональных покрытий с использованием лазерного излучения, выявление их достоинств и недостатков, а также определение перспектив их развития.

Лазерные технологии нанесения функциональных покрытий

Термообработка с использованием лазерного излучения заключается в облучении поверхности обрабатываемой детали сфокусированным лазерным пучком. Упрочнение происходит как при оплавлении поверхности, так и без него в зависимости от конкретного материала и конечных свойств, которые должны проявиться после обработки (рис. 1). Если материал имеет высокие показатели отражения, то на него предварительно наносится поглощающее лазерное излучение покрытие [3, 4]. Главными преимуществами данного метода являются: возмож-

ность воздействовать на объект локально (размеры лазерного пятна варьируются от 10^{-1} до 10 мм), возможность подвергать термообработке труднодоступные места на деталях. Слои полученного покрытия получают высокие механические характеристики, при этом модифицированный слой может составлять от нескольких микрометров до 1...3 мм [5]. Основными недостатками являются внутренние напряжения, образующиеся в поверхностном слое обработанного материала. Со временем это может привести к образованию трещин. При таком способе лазерной обработки в материале нередко образуются поры, если материал подвергался оплавлению. Этот процесс связан с тем, что при воздействии лазерного пучка происходит выгорание неметаллических составляющих в обрабатываемом металле. Образовавшийся газ создает пузырьки в ванне расплава, а из-за высокой скорости ее остывания они не успевают подняться на поверхность, в результате чего появляются поры в покрытии [6].

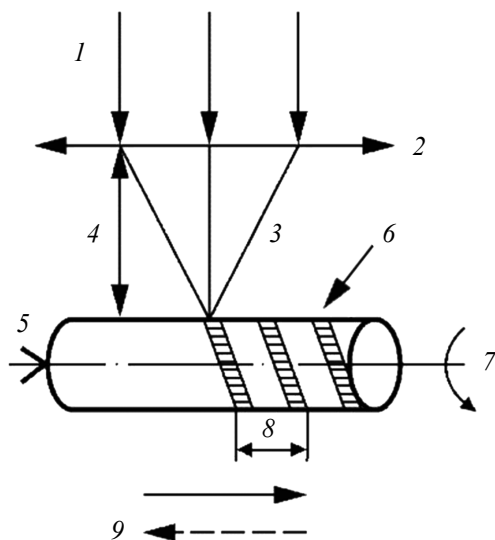


Рис. 1. Схема термообработки детали с использованием лазерного излучения: 1 – лазерный пучок; 2 – фокусирующая линза; 3 – сфокусированный лазерный пучок; 4 – расстояние характеризующее степень фокусировки луча; 5 – цилиндрическая деталь; 6 – обработанная лазером поверхность; 7 – направление поворота цилиндрической детали; 8 – шаг обработки; 9 – возможные направления продольной подачи заготовки [7]

Fig. 1. Scheme of heat treatment of a part using laser radiation: 1 - laser beam, 2 - focusing lens, 3 - focused laser beam, 4 - distance characterizing the degree of focusing of the beam, 5 - cylindrical part, 6 - laser-treated surface, 7 - direction of rotation of the cylindrical part, 8 - processing stage, 9 - possible directions of longitudinal feed from the work piece [7]

Метод лазерного легирования предполагает создание на поверхности обрабатываемого металла ванны расплава. Характерный размер ванны расплава: диаметр 0,2...0,6 мм, глубина 0,1...3 мм. В нее внедряются легирующие компоненты как металлического, так и неметаллического характера [8]. При сканировании лазерным пучком поверхности материала, подвергающегося обработке, образуется слой вещества, чьи физико-химические свойства изменены. Главными преимуществами легирования с использованием лазерного излучения является возможность внедрения химических элементов в металлическую поверхность на глубину 2...3 мм с образованием химических соединений или твердых растворов в поверхностном слое металла (рис. 2). Стоит отметить, что данный метод обработки позволяет получить структуру, имеющую высокую степень дисперсии, в то время как зона термического влияния мала. Это достигается благодаря возможности максимально уменьшить тепловое воздействие на подложку, что приводит к серьезному снижению остаточных деформаций в сравнении с плазменными методами. Недостатки метода лазерного легирования во многом схожи с недостатками термообработки с использованием лазерного пучка. Отличием является образование таких дефектов, как свищи, поры и выплески расплава, что напрямую связано с подачей легирующих компонентов в ванну [9].

Метод лазерной наплавки заключается в подаче в зону лазерного воздействия наплавочного материала. Наплавочный материал представляет собой мелкодисперсный порошок, в редких случаях проволоку, при этом диаметр лазерного пятна варьируется от 1 до 5 мм. В результате на поверхности обрабатываемой подложки образуется покрытие с заданными характеристиками (рис. 3). Существует вариант, когда слои наплавочного материала наносятся и фиксируются на подложке заблаговременно. Их получают с использованием газотермического напыления или наносят на поверхность обмазку, в состав которой входит наплавочный порошок и связующий элемент. После чего происходит переплав элементов с помощью лазера. Наплавка с заблаговременным напылением слоев – это лазерный переплав. Переходная зона между материалом подложки и наплавляемой структурой колеблется от 5 до 200 мкм. Прочность сцепления покрытия с материалом подложки сопоставима с прочностью материала подложки [10].

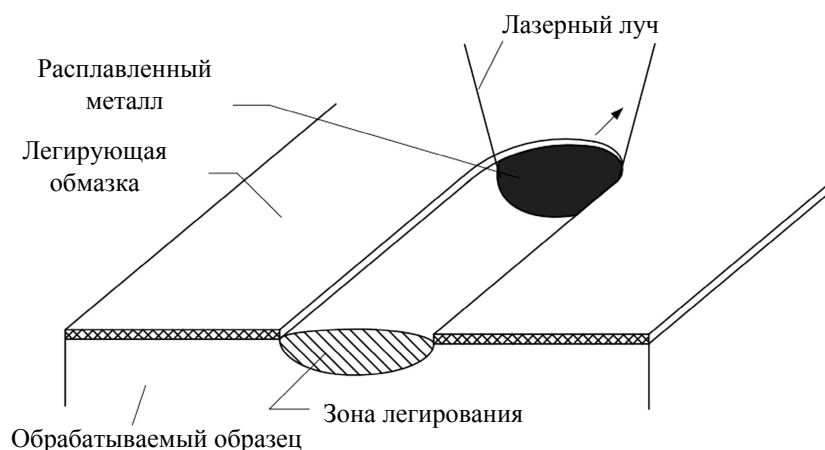


Рис. 2. Принципиальная схема лазерного легирования [11]

Fig. 2. Schematic diagram of laser alloying [11]

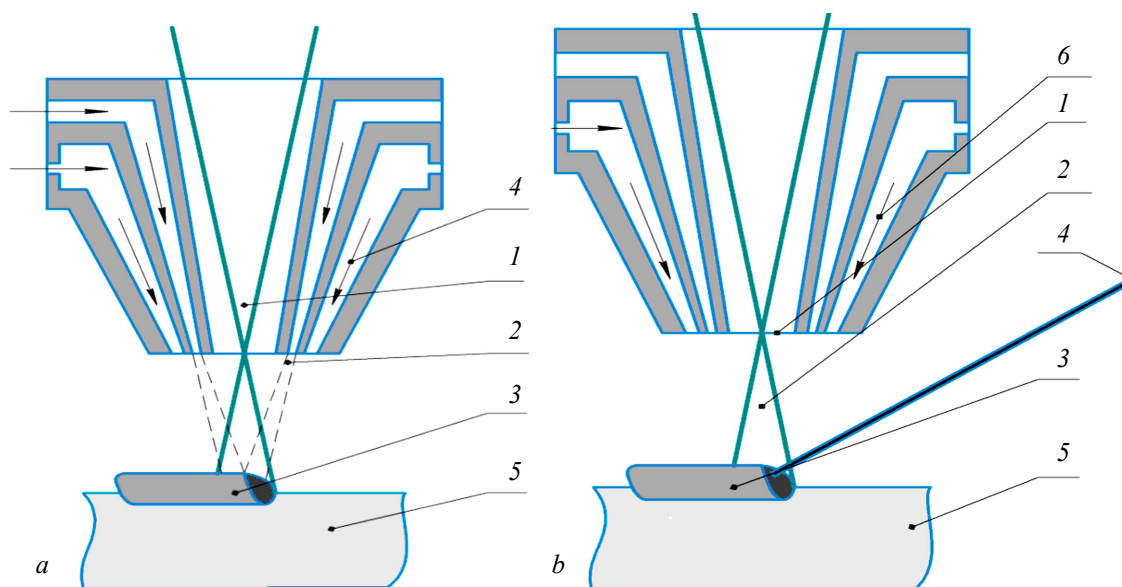


Рис. 3. Схемы процессов лазерной наплавки: *a* – с использованием порошковой смеси (1 – лазерное излучение, 2 – подача порошка, 3 – наплавленный материал, 4 – подача защитного газа, 5 – деталь); *b* – с подачей присадочной проволоки (1 – защитное стекло объектива, 2 – лазерное излучение, 3 – наплавленный материал, 4 – присадочная проволока, 5 – деталь, 6 – защитный газ) [12]

Fig. 3. Schemes of laser surfacing processes: *a* – using a powder mixture (1 - laser radiation, 2 - powder supply, 3 - deposited material, 4 - protective gas supply, 5 - part); *b* – with the supply of filler wire (1 - protective lens glass, 2 - laser radiation, 3 - deposited material, 4 - filler wire, 5 - part, 6 - protective gas) [12]

Важная роль в технологии наплавки отводится методу подачи наплавляемого компонента в зону действия лазерного излучения на подложке. Так, подача наплавочного материала в виде проволоки позволяет осуществлять обработку поверхности объекта в труднодоступных местах и нестандартных пространственных расположениях, в то время как достоинство использования порошковых материалов заключается в их высоком коэффициенте поглощения, что повышает эффективность использования лазерного излучения [13]. При предварительном распределении наплавляемого вещества по по-

верхности подложки появляется возможность использования наплавки в положении снизу. Чтобы успешно использовать порошковые материалы, когда подложка находится в нестандартном пространственном положении, необходимо наносить покрытие с использованием специальных методов. К ним относится плазменное или газопламенное напыление, а также метод обмазки, когда нанесенную на поверхность изделия пасту сушат в печи, а после подвергают лазерной обработке. Если возможность предварительно нанести порошок на поверхность отсутствует, то осуществляется его подача непо-

средственно к месту воздействия лазерного излучения. Для этих целей используется присадочный порошок необходимого состава. Его доставка на поверхность подложки к месту воздействия лазерного излучения производится при помощи порошкового дозатора определенной конструкции [14].

Преимуществами лазерной наплавки являются: возможность регулирования толщины наплавляемого слоя от 0,1 до 3 мм; существенное снижение эвакуации металла основы в наплавляемый слой во время процесса наплавки, что позволяет с большей точностью прогнозировать результат и свести к минимуму изменение свойств материала наплавляемого покрытия. Также стоит отметить, что в данном случае существенно уменьшается зона термического воздействия до 0,1...0,5 мм, а наплавленный металл имеет равноосную высокодисперсную структуру. Это позволяет снизить шероховатость наплавленного покрытия и уменьшить время, выделяемое для финишной механической обработки [15].

К недостаткам данного метода обработки поверхности материалов можно отнести холодные микротрещины, которые возникают из-за возвращения возмущенной системы атомов и молекул обрабатываемого вещества в исходное состояние. Вследствие этого возникают внутренние напряжения между слоями наплавки. Также существует проблема образования пор как внутри покрытия, так и на поверхности. Это происходит вследствие наличия на поверхности материала включений неметаллического характера или иных загрязнений, а также влаги, присутствующей в составе порошка для наплавки. Из сказанного выше следует вывод, что для устранения недостатков, присущих данному методу, в первую очередь необходимо снизить остаточные термические напряжения, которые возникают в наплавляемых слоях. Для этого можно использовать дополнительный источник тепла, например, плазменную струю, что изменит термический цикл в процессе наплавки и уменьшит остаточные термические напряжения [16].

В методе лазерного напыления используются присадочные материалы преимущественно порошкового и проволочного типа, скорость подачи которых варьируется от 0,5 до 11 м/мин, при этом расстояние между лазерной головкой и образцом составляет 50...150 мм. В качестве источника лазерного излучения CO_2 в основном используются лазеры с мощностью в пределах 1...5 кВт [17]. Основными компонентами технологического газа, который подается в рабо-

чую область, могут быть как химически активные газы (азот или кислород), так и инертные газы (гелий или аргон). Также существует вариант, когда напыляемый порошок нагревается с использованием лазерного пучка. Этот процесс называется порошковым лазерным напылением. Стоит отметить, что при лазерном напылении не происходит прямого контакта лазерного пучка с подложкой в отличие от лазерной наплавки, в результате чего степень локализации теплового процесса существенно повышается [18, 19].

Также для получения жаропрочного покрытия на подложку из стали проволока может расплываться в смеси инертных газов посредством ее облучения лазерным пучком. Благодаря тому что себестоимость проволоки намного ниже порошковых материалов, удастся снизить себестоимость всего технологического процесса. С точки зрения получаемого покрытия данный метод достаточно близок к методу дуговой металлизации [20]. Основные преимущества метода по напылению покрытий с использованием лазерного излучения схожи с преимуществами газотермического нанесения функциональных покрытий. Из недостатков стоит отметить потребность в предварительной абразивной обработке поверхности, на которую впоследствии будет наноситься покрытие. В результате сцепления между наносимыми слоями оказывается существенно слабее, если сравнивать с методом лазерной наплавки [21].

Лазерное напыление также можно использовать для создания 3D-изделий. С помощью роботизированной конструкции можно создавать широкий спектр трехмерных изделий из металлических порошков, полимеров или керамики. Данный процесс основан на лазерном селективном спекании (SLS). Технология DMD сосредоточена на создании деталей из металла путем его прямого нанесения [22]. Она является одной из перспективных. В отличие от SLS-технологии, которая по сути является трехмерным лазерным напылением, технология DMD – это технология лазерной наплавки, что позволяет создавать металлические трехмерные изделия. Чтобы создать трехмерную деталь или произвести ремонтные работы на участке с повреждениями с помощью DMD-технологии, необходимо сфокусировать лазерный пучок на соответствующем участке заготовки и создать ванну с расплавом [23]. Для производства трехмерных объектов с нуля сначала необходимо подготовить специальную пресс-форму, которая идентична воспроизводимому объекту. В получив-

шуюся ванночку с расплавом тонкой струей подается порошок из металла. Функцию транспортировки выполняет газ, подающийся под давлением. Цельнометаллическое изделие создается слой за слоем в результате движения лазерного пучка и дозатора с подаваемым металлическим порошком согласно командам, поступающим от компьютера по заранее подготовленной трехмерной модели CAD.

К способам нанесения покрытий с помощью лазерного излучения также можно отнести лазерное осаждение в вакуумной среде (рис. 4), или лазерно-плазменное напыление [24]. Здесь используются импульсные лазеры с длительностью импульса 60...350 нс, при этом плотность мощности варьируется в пределах 2...5 ГВт/см². Используя данный метод, можно получать на поверхности подложки пленки толщиной менее одного микрометра. Высокотемпературные сверхпроводники являются отличным примером использования данной технологии. В качестве материалов для создания тонких пленок данного вида зачастую используется арсенид галлия, арсенид галлия-индия, теллурид свинца, оксид циркония IV, титанат стронция, а также алмазоподобные вещества.

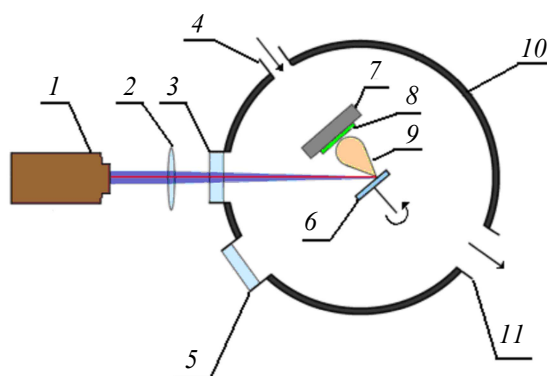


Рис. 4. Схема устройства лазерной вакуумной напылительной установки: 1 – лазерная установка; 2 – линза фокусирующая; 3 – иллюминатор оптический; 4 – подвод технологических газов; 5 – смотровое окно; 6 – мишень; 7 – держатель подложки (с нагревателем); 8 – подложка; 9 – плазменный факел; 10 – камера вакуумная; 11 – подключение вакуумного насоса [25]

Fig. 4. Diagram of the device of a laser vacuum spraying unit: 1 - laser installation; 2 - focusing lens; 3 - optical port-hole; 4 - supply of process gases; 5 - viewing window; 6 - target; 7 - substrate holder (with heater); 8 - substrate; 9 - plasma torch; 10 - vacuum chamber; 11 - connection of vacuum pump [25]

Тонкие пленки на поверхности подложки в основном получают с использованием лазерного пучка в таких процессах, как CVD и PVD. Лазерное излучение в этом случае игра-

ет вспомогательную роль, что позволяет улучшить уже существующий процесс. Таким образом, имеются следующие названия методов: LACVD (для процесса CVD) и LECVD (для процесса PVD). Преимуществами данных методов является получение покрытий с высокими физико-механическими свойствами. Также стоит отметить, что необходимость в финишной обработке данного покрытия отсутствует, так как итоговая шероховатость соответствует шероховатости поверхности, что использовалась в качестве подложки. Использование специального оборудования, а также постоянное осаждение на нем материалов для создания покрытий является недостатком данного метода [26, 27].

Гибридные технологии нанесения функциональных покрытий

Существуют комбинированные технологии наплавки с использованием лазерного излучения, где вспомогательную роль играет высокочастотный подогрев. Лазерная индукционная наплавка осуществляется при наличии специального дозатора-питателя, который поставляет наплавочный порошок к месту нанесения покрытия.

В качестве примера использования лазерной индукционной наплавки можно привести поверхностную термообработку чугуновых кулачков. Вследствие этого на поверхности объекта образуется износостойкий ледебуритовый слой. Устранение остаточных внутренних напряжений обуславливается использованием высокочастотной составляющей данного метода наплавки. Основным достоинством метода лазерно-индукционной обработки является возможность значительно ускорить процесс обработки поверхности, не пожертвовав качеством, либо снизить мощность лазерной установки, что должна использоваться на производстве. Недостатком данной технологии является возможность появления термических деформаций на детали из-за объемного разогрева до 500...1000 °С. В связи с этим такие комбинированные технологии, как лазерная индукционная термообработка целесообразно применять к изделиям, которые имеют несимметричную структуру [28].

К комбинированным технологиям по созданию покрытий также можно отнести лазерную наплавку с применением плазмы. Она также называется лазерно-плазменной наплавкой. Технология основана на совместном использовании лазерного пучка и плазменной дуги. При взаимодействии лазерного пучка CO₂-лазера с плазмой возникает лазерно-дуговой разряд комбинированной природы (рис. 5). Высокотемпера-

турная плазма, что возникает в результате данного явления, имеет высокую степень неравномерности, которая достигается в том числе и при атмосферном давлении [29].

В гибридной лазерной наплавке с использованием плазменной дуги применяются плазмотроны двух видов действия: прямого и косвенного. В качестве материалов, которые используются для наплавки, выбираются материалы порошкового типа. В плазмотронах прямого типа плазменная дуга подвергается дополнительному сжатию за счет воздействия на нее сфокусированным лазерным пучком, что является преимуществом использования плазмотрона данного вида. С другой стороны, благодаря отсутствию прямого контакта электрической дуги с поверхностью металлической подложки преимуществом использования плазмотрона косвенного типа выступает локальность термического воздействия на материал. Лазерная наплавка с использованием плазменной дуги позволяет минимизировать остаточные напряжения, которые возникают в нанесенных на подложку слоях. Однако стоит отметить наличие существенного воздействия тепла на область изделия во время процесса наплавки [30].

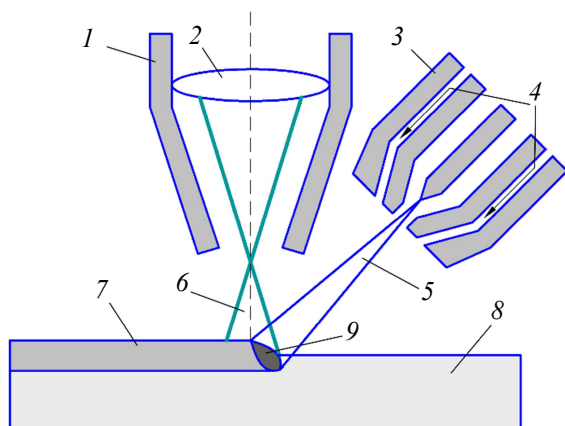


Рис. 5. Схема процесса порошковой лазерно-плазменной наплавки с использованием плазмотрона прямого действия: 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазмотрон прямого действия; 4 – подача газа с наплавочным порошком; 5 – плазменный факел; 6 – лазерный пучок; 7 – наплавленное покрытие; 8 – металлическая подложка; 9 – область воздействия плазменного факела и лазерного пучка

Fig. 5. Diagram of the process of powder laser-plasma surfacing using a direct-acting plasma torch: 1 - laser; 2 - focusing lens; 3 - direct-acting plasmatron; 4 - gas supply with surfacing powder; 5 - plasma torch; 6 - laser beam; 7 - surfaced coating; 8 - metal substrate; 9 - the area of influence of plasma torch and laser beam

Помимо гибридной лазерной наплавки, где совместно применяется плазменная дуга и ла-

зерный пучок, существует гибридное лазерное напыление. Лазерный пучок используется для нагрева поверхностного слоя подложки, а покрытие наносится с использованием плазменной дуги. Это технология плазменного напыления, сопровождаемого лазерным нагревом, или LAAPS. Благодаря данному методу появилась возможность получать плотные функциональные покрытия, имеющие повышенную прочность сцепления с подложкой. При использовании этого подхода зона, в которой происходит плазменное напыление, и зона нагрева подложки с помощью лазерного пучка перекрываются не полностью, в результате чего лазерное излучение производит подготовку подложки посредством испарения части материала с поверхности, что позволяет исключить струйно-абразивную обработку.

Исследования, связанные с LAAPS, проводились во Франции, Японии, Германии, а также в России. В частности, в Российской Федерации разработана технология нанесения функционального покрытия с применением динамического фокусатора. Был выявлен прогрессивный метод использования излучения лазера и плазмы, согласно которому лазерное излучение необходимо пропускать вдоль оси плазмы. Наплавляемый порошок при этом доставляется предварительно нагретым. Для этого используется энергия от плазменного и лазерного разрядов [31].

Анализ результатов

Рассмотрение процессов лазерной, плазменной и лазерно-плазменной наплавки, а также процессов, позволяющих наносить покрытия по вышеуказанным методикам, помогло установить следующее. При использовании плазменной методики напыления поверхность необходимо подвергнуть обработке перед нанесением покрытия с использованием струйно-абразивных методов. Также некоторые задачи требуют нанесения подслоев, а в самих покрытиях могут присутствовать поры. В свою очередь, плазменная наплавка подвергает материал детали значительному нагреву, что вызывает остаточные деформации. Использование лазерных технологий, а также совмещение их с плазменными процессами сводит к минимуму нагрев материала детали. Использование таких технологий позволяет исключить нанесение подслоев, что упрощает процесс нанесения покрытия, а также увеличивает сцепление наносимых слоев с подложкой. Однако лазерные процессы нанесения покрытий в чистом виде имеют определенные недостатки, а именно напряжения, сохраняющиеся в наплавленных слоях, поры и микро-

трещины. Комбинирование лазерных и плазменных технологий позволяет избавиться практически от всех вышеуказанных недостатков, присущих этим методам. Так, например, с помощью лазерного излучения можно сжать и стабилизировать плазменную дугу, что повышает скорость обработки изделия и приводит к снижению энергозатрат, направленных на процесс нанесения покрытия. Заблаговременный нагрев порошковой смеси с использованием комбинированного разряда, а также изменения в термическом цикле обработки поверхности лазерным пучком с дополнительным источником тепла в виде плазменной струи позволяют снизить количество областей, в которых возникают остаточные термические напряжения, и их размеры, исключить образование пор и трещин. Предварительное испарение части приповерхностного слоя с помощью лазерного излучения позволяет упростить предварительную подготовку изделия к нанесению покрытий.

Выводы

Таким образом, получение покрытий с высокими физико-механическими свойствами, которые имеют устойчивость к коррозии и износу и обладают рядом специальных свойств, стало возможно благодаря использованию лазерных и гибридных технологий. Перспективы развития данных технологий в будущем во многом связаны с устранением их недостатков, а также увеличением эффективности взаимодействия между собой.

Библиографические ссылки

1. Хаскин В. Ю., Шелягин В. Д., Бернацкий А. В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (обзор) // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6(762). С. 30–33.
2. Ходыкин Л. Г., Няфкин А. Н., Косолапов Д. В. Лазерная сварка металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного тугоплавкими частицами SiC (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). С. 63–75. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
3. Ким В. А., Аунг Н. Т., Белова И. В. Лазерное упрочнение металлических материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 12 (192). С. 547–553.
4. Алексеев В. И., Барахтин Б. К., Жуков А. С. Химическая неоднородность как фактор повышения прочности сталей, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 191–196. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.
5. Маринин Е. А., Гаврилов Г. Н., Лисовская О. Б. Сравнение возможностей лазерной закалки и лазерной цементации для повышения механических свойств и износостойкости поверхности низколегированных инструментальных сталей // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 158–162.
6. Жабрев Л. А., Чуппина С. В., Шамиурин А. И. Оценка склонности покрытий к образованию пор и неметаллических включений в сварном шве // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2020. № 9. С. 67–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-67-80.
7. Девойно О. Г. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки : монография. Минск: БНТУ, 2020. 280 с.
8. Казаков С. С., Федосеев А. В., Матвеев Ю. И. Упрочнение среднеуглеродистых сталей за счет микролегирования поверхностей // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 51–61. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-51-61.
9. Уридия З. П., Токарев М. С., Леонов А. А. Тенденции развития современных технологий изготовления и методы усовершенствования свойств поверхности магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 37–47. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-37-47.
10. Кубанова А. Н., Сергеев А. Н., Добровольский Н. М. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, № 3 (71). С. 453–477. DOI: 10.22405/2226-8383-2019-20-3-453-477.
11. Табаков В. П., Рандин А. В. Применение импульсной лазерной обработки для повышения работоспособности быстрорежущего инструмента с многослойными покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 11. С. 18–21.
12. Бертранд Ф., Мовчан И., Самодурова М. Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2016. Т. 14, № 2. С. 44–52. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52.
13. Барыгин В. В. Цифровые технологии для изделий авиационно-космической отрасли // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 2 (107). С. 76–83. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-107-2-76-83.
14. Дружнова Я. С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). С. 100–115. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.
15. Голубовский Е. Н., Жаткин С. С., Паркин А. А. Исследование и отработка технологии восстановления лопаток ГТД после эксплуатации лазерной наплавкой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 3 (101). С. 29–34. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-29-34.
16. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2 (30). С. 85–95. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-2-9.

17. Девецкий О. В., Никулин Д. А., Сысоев И. А. Импульсное лазерное напыление тонких пленок нитрида алюминия на сапфировые подложки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 2. С. 177–184. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184.

18. Москвитин Г. В., Биргер Е. М., Поляков А. Н. Использование методов инженерии поверхности в современном оборудовании для лазерной наплавки износостойких и коррозионно-стойких материалов // Инновации и инвестиции. 2019. № 6. С. 228–233.

19. Радионова Л. В., Самодурова М. Н., Быков В. А. Повышение эксплуатационных свойств поверхности штока гидроцилиндра аддитивными технологиями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18, № 3. С. 34–41. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41.

20. Коломейченко А. В., Горленко А. О., Логачев В. Н. Оборудование и технологические рекомендации для нанесения покрытий электродуговой металлизацией // Транспортное машиностроение. 2022. № 4 (4). С. 44–50. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-44-50.

21. Лоцинин Ю. В., Размахов М. Г., Пахомкин С. И. Влияние состава и технологии нанесения многослойных теплозащитных покрытий, изготовленных газотермическим напылением, на теплопроводность // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). С. 95–103. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-95-103.

22. Алексеев В. И., Барактин Б. К., Жуков А. С. Химическая неоднородность как фактор повышения прочности сталей, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 191–196. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.

23. Чащин Е. А., Балашова С. А. Взаимодействие импульсного лазерного излучения с плазменным потоком, содержащим мелкодисперсную фазу // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 5-1 (95). С. 80–86. DOI: 10.23670/IRJ.2020.95.5.013.

24. Кривошеев А. В., Пономаренко С. Л. Создание массочувствительных пьезоэлементов методом импульсного лазерного осаждения // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 6 (35). С. 1–9. DOI: 10.18698/2541-8009-2019-06-492.

25. Булаев С. А. Сущность импульсного лазерного напыления в вакууме как способа получения пленок нанометровых толщин // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 18. С. 25–28.

26. Çoşğun A., Taşcıoğlu A., Yılmaz G. İnceFilm Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemine Çeşitli. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2021, no. 12 (2), pp. 351-363. DOI: 10.29048/makufebed.861301.

27. Ki Hyun Kim, Ki Seok Kim, You Jin Ji. Silicon Nitride Deposited by Laser Assisted Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition for Next Generation Organic Electronic Devices. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 541, pp. 1-6. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148313.

28. Калиниченко В. А., Калиниченко М. Л., Андрушевич А. А. Технологические аспекты создания композиционных износостойких покрытий на железосодержащих сплавах индукционной наплавкой // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 122–128. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-122-128.

29. Ходакова Е. А., Свиридов А. В., Скупов А. А. Создание неразъемных соединений методом плазменной сварки (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). С. 3–13. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-3-13.

30. Dubourg L., Lima R., Moreau C. Properties of alumina–titania coatings prepared by laser-assisted air plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 14, pp. 6278-6284. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.026.

31. Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Куменов С. Н. Использование защитных износостойких покрытий для повышения долговечности литейных пресс-форм // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 2. С. 8–25. DOI: 10.21869/2223-1528-2022-12-2-8-25.

References

1. Khaskin V.Yu., Shelyagin V.D., Bernatskii A.V. (2015) [Current State and Prospects for the Development of Technologies for Laser and Hybrid Cladding (Review)]. *Avtomaticheskaya Svarka*, 2015, no. 5-6 (762), pp. 30-33 (in Russ.).

2. Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Kosolapov D.V. (2022) [Laser Welding of Metal Composite Materials Based on Aluminum Alloy Reinforced with Refractory SiC Particles (Review)]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 63-75 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.

3. Kim V.A., Aung N.T., Belova I.V. (2020) [Laser hardening of metal materials]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2020, vol. 16, no. 12 (192), pp. 547-553 (in Russ.).

4. Alekseev V.I., Barakhtin B.K., Zhukov A.S. (2020) [Chemical heterogeneity as a factor in increasing the strength of steels manufactured using selective laser melting technology]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 191-196 (in Russ.). DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.

5. Marinin E.A., Gavrilov G.N., Lisovskaya O.B. (2019) [Comparison of the possibilities of laser hardening and laser cementation to improve the mechanical properties and wear resistance of the surface of low-alloy tool steels]. *Polzunovskii vestnik*, 2019, no. 1, pp. 158-162 (in Russ.).

6. Zhabrev L.A., Chuppina S.V., Shamshurin A.I. (2020) [Assessment of the tendency of the coating to the formation of pores and non-metallic inclusions in the weld]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2020, no. 9, pp. 67-80 (in Russ.). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-67-80.

7. Devoino O.G. (2020) *Tekhnologiya formirovaniya iznosostoykikh pokrytii na zheleznoi osnove metodami*

lazernoi obrabotki [Technology of forming wear-resistant coatings on an iron base by laser processing methods]. Minsk: BNTU Publ., 2020, 280 p. (in Russ.).

8. Kazakov S.S., Fedoseev A.V., Matveev Yu.I. (2021) [Hardening of medium-carbon steels due to micro-alloying of surfaces]. *Vestnik NGIEI*, 2021, no. 4 (119), pp. 51-61 (in Russ.). DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-51-61.

9. Uridiya Z.P., Tokarev M.S., Leonov A.A. (2022) [Trends in the development of modern manufacturing technologies and methods for improving the surface properties of magnesium alloys (Review)]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 37-47 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-37-47.

10. Kubanova A.N., Sergeev A.N., Dobrovol'skii N.M. (2019) [Features of materials and technologies of additive manufacturing of products]. *Chebyshevskii sbornik*, 2019, vol. 20, no. 3 (71), pp. 453-477 (in Russ.). DOI: 10.22405/2226-8383-2019-20-3-453-477.

11. Tabakov V.P., Randin A.V. (2005) [The use of pulsed laser processing to improve the performance of high-speed tools with multilayer coatings]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2005, no. 11, pp. 18-21 (in Russ.).

12. Bertrand F., Movchan I., Samodurova M. (2016) [Laser surfacing as a promising method of hardening of die tooling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 44-52 (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52.

13. Barygin V.V. (2021) [Digital technologies for the manufacture of the aerospace industry]. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2021, no. 2 (107), pp. 76-83 (in Russ.). DOI: 10.30981/2587-7992-2020-107-2-76-83.

14. Druzhnova Ya.S. (2022) [Development of methods of gas-thermal spraying of reinforcing coatings based on tungsten and chromium carbides (Review)]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), pp. 100-115 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.

15. Golubovskii E.N., Zhatkin S.S., Parkin A.A. (2021) [Research and development of the technology for restoring the blades of the gas turbine engine after operation by laser surfacing]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, vol. 23, no. 3 (101), pp. 29-34 (in Russ.). DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-29-34.

16. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. (2020) [Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2020, no. 2 (30), pp. 85-95 (in Russ.). DOI: 10.21685/2307-4205-2020-2-9.

17. Devitskii O.V., Nikulin D.A., Sysoev I.A. (2020) [Pulsed laser deposition of thin films of aluminum nitride on sapphire substrates]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 177-184 (in Russ.). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184.

18. Moskvitin G.V., Birger E.M., Polyakov A.N. (2019) [The use of surface engineering methods in modern equipment for laser surfacing of wear- and corrosion-resistant materials]. *Innovatsii i investitsii*, 2019, no. 6, pp. 228-233 (in Russ.).

19. Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A. (2020) [Improving the operational properties of the hydraulic cylinder rod surface by additive technologies]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 34-41 (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41.

20. Kolomeichenko A.V., Gorlenko A.O., Logachev V.N. (2022) [Equipment and technological recommendations for coating with electric arc metallization]. *Transportnoe mashinostroenie*, 2022, no. 4 (4), pp. 44-50 (in Russ.). DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-44-50.

21. Loshchinin Yu.V., Razmakhov M.G., Pakhomkin S.I. (2019) [Influence of composition and technology of application of multilayer heat-protective coatings made by gas-thermal spraying on thermal conductivity]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6 (78), pp. 95-103 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-95-103.

22. Alekseev V.I., Barakhtin B.K., Zhukov A.S. (2020) [Chemical heterogeneity as a factor in increasing the strength of steels manufactured using selective laser melting technology]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 191-196 (in Russ.). DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191.

23. Chashchin E.A., Balashova S.A. (2020) [Interaction of pulsed laser radiation with a plasma stream containing a finely dispersed phase]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2020, no. 5-1 (95), pp. 80-86 (in Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2020.95.5.013.

24. Krivosheev A.V., Ponomarenko S.L. (2019) [Creation of mass-sensitive piezoelectric elements by pulsed laser deposition]. *Politeknicheskii molodezhnyi zhurnal*, 2019, no. 6 (35), pp. 1-9 (in Russ.). DOI: 10.18698/2541-8009-2019-06-492.

25. Bulaev S.A. (2014) [The essence of pulsed laser spraying in vacuum as a method for producing films of nanometer thicknesses]. *Vestnik Kazanskogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 18, pp. 25-28 (in Russ.).

26. Çoşğun A., Taşcıoğlu A., Yılmaz G. İnceFilm Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemine Çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2021, no. 12 (2), pp. 351-363. DOI: 10.29048/makufebd.861301.

27. Ki Hyun Kim, Ki Seok Kim, You Jin Ji. Silicon Nitride Deposited by Laser Assisted Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition for Next Generation Organic Electronic Devices. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 541, pp. 1-6. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148313.

28. Kalinichenko V.A., Kalinichenko M.L., Andrushevich A.A. (2019) [Technological aspects of creating composite wear-resistant coatings on iron-containing alloys by induction surfacing]. *Lit'e i metallurgiya*, 2019, no. 2, pp. 122-128 (in Russ.). DOI: 10.21122/1683-6065-2019-2-122-128.

29. Khodakova E.A., Sviridov A.V., Skupov A.A. (2022) [Creation of permanent joints by plasma welding (Review)]. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 3-13 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-3-13.

30. Dubourg L., Lima R., Moreau C. Properties of alumina-titania coatings prepared by laser-assisted air

plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 14, pp. 6278-6284. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.026.

31. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N. (2022) [The use of protective wear-resistant coatings

to increase the durability of foundry molds]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 8-25 (in Russ.). DOI: 10.21869/2223-1528-2022-12-2-8-25.

The Current State of Laser Technologies in the Field of Functional Coatings

M.V. Palabugin, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

D.G. Kalyuzhny, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Two main directions in the field of laser radiation application for functional coatings are considered – the application of coatings using purely laser study and the combination of laser and other technologies. The most popular technological lasers used in both directions are identified: gas molecular lasers, diode, fiber, and solid-state lasers. Methods of hardening heat treatment of parts using a laser beam both with and without melting of the material are considered. A method of introducing alloying components of metallic and non-metallic nature into the substrate material using laser technologies is presented. The methods of laser surfacing are given, where the surfacing material is fed into the zone of exposure to laser radiation both in the form of a powder mixture and in the form of a filler wire. Powder mixture is most commonly used as surfacing material, wire is less often used. Technologies of laser-assisted evaporation used in the creation of three-dimensional objects are considered. Hybrid technologies of coating deposition are presented - laser surfacing using a plasma arc and high-frequency heating. It was found out that two types of plasmotrons are used in laser-plasma surfacing - direct and indirect types of action. In addition to hybrid laser surfacing, the method of hybrid laser-assisted evaporation is considered - plasma sputtering, or LAAPS, accompanied by laser heating and allowing to obtain coatings with increased adhesion strength to the substrate surface. The main advantages (the ability to adjust the thickness of the deposited coating layers, reduction of the thermal impact zone) and disadvantages (occurrence of cold microcracks on the surface, formation of pores in the coating) in the application of coatings using laser radiation are considered. The prospects for the development of laser and laser-plasma technologies in the field of functional coatings are analyzed on the example of practical application. The development of these technologies in future is largely due to the elimination of their shortcomings, increasing the efficiency of interaction between laser and plasma technologies.

Keywords: laser technologies, heat treatment, surfacing, coating, hybrid and mixed technologies.

Получено 17.02.2023

Образец цитирования

Палабугин М. В., Калюжный Д. Г. Современное состояние лазерных технологий в области нанесения функциональных покрытий // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 13–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22.

For Citation

Palabugin M.V., Kalyuzhny D.G. (2023) [The Current State of Laser Technologies in the Field of Functional Coatings]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 13-22 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-13-22.