



УДК 621.01: 536.75
DOI: 10.12727/18095

М.Л. Хейфец, д.т.н.
(НПО «Центр» НАН Беларуси,
220018, Беларусь, г. Минск, ул. Шаранговича, 19)
E-mail: mlk-z@mail.ru

Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии

Предложен подход, рассматривающий аддитивные методы как синерготехнологии, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений. На основании подхода выбираются источники энергии и материалы для технологий послойного синтеза изделий. Стабилизация толщины формируемых слоев связана с процессами самоорганизации поверхностных явлений и конструктивными особенностями изделий.

Ключевые слова: аддитивные методы; синерготехнологии; послойный синтез; самоорганизация; поверхностные явления.

M.L. Kheifets, D.Eng.
(SPC "Center" NAS Belarus,
19, Sharangovich Str., Minsk, Belarus, 220018)

Additive synergic techniques of layered synthesis of composite products at power flow influence

An approach considering additive methods as synergic techniques ensuring self-organization of surface phenomena is offered. On the basis of the approach the energy sources and material for the techniques of layered synthesis of products are chosen. The thickness stabilization of layers formed is connected with the processes of surface phenomena self-organization and design peculiarities of parts.

Keywords: additive methods; synergic techniques; layered synthesis; self-organization; surface phenomena.

Современный технологический уклад реализует новую парадигму дизайна, в том числе и молекулярного, «снизу–вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху–вниз» [1, 2]. Сущность перспективных аддитивных технологий заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделия по «цифровой модели» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [3, 4].

Передовые технологии, помимо используемых новых аппаратных и программных

средств, оборудования и оснащения, основываются на *послойном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [5, 6]. Так, определяя фундамент наукоёмких нанотехнологий, Ж.И. Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии, *эпитаксиальный рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [7].

Поэтому особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные методы как *синерготехнологии*, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур поверхностных слоев различных материалов и управление их

свойствами при разнообразных физических воздействиях [8, 9]. Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [10, 11].

Расстояние до формируемой поверхности – особо чувствительный фактор при «непосредственном осаждении слоя» по технологиям DD-Direct Deposition, а изменение расстояния особенно важно для стабилизации толщины при «предварительном формировании слоя» материала по технологиям BD-Bed Deposition, подразумевающим наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие [2, 3].

В результате выбор в аддитивной технологии источника энергии или подаваемого материала определяет не только технологическую среду (дискретную или непрерывную), но и

поверхностные явления, обеспечивающие процессы самоорганизации в синерготехнологиях [10, 11].

Распределение плотности мощности потоков энергии. Прямое выращивание изделий послойным синтезом материала возможно в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и в разнообразных высокоэнергетических процессах [5, 8] с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зоной поглощения [10, 11] в зависимости от плотности мощности потоков энергии (таблица).

1. В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл объемная зона поглощения энергии распределена по всей наращиваемой поверхности [12]. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между расплавом и поверхностью изделия и описывается скоростью подъема детали, напряжением поверхностного натяжения и коэффициентом внутреннего трения. Максимальная толщина слоя при обтекании расплавом поверхности ограничивается усло-

Высокоэнергетические процессы послойного синтеза изделий

Процессы разделения и формирования слоев	Агрегатное состояние наносимого материала	Зоны поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см ²	Толщина разделяемого и формируемого слоя, мм
1. Индукционный нагрев с припеканием и наплавка погружением	твердое (порошок), жидкое (расплав)	объемная, 10 ² ...10 ⁴	0,3...3,0 [13]
2. Плазменная резка, напыление и наплавка	твердое (порошок)	объемная, 5·10 ² ...10 ⁵	0,1...10 [14]
3. Электроэрозионная обработка и электромагнитная наплавка	твердое (порошок)	множество локализованных, 10 ³ ...10 ⁵	0,05...0,5 [15]
4. Электронно-лучевая резка, оплавление и поверхностное модифицирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 10 ³ ...10 ⁶	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [16]
5. Лазерная резка, оплавление и легирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 5·10 ³ ...10 ⁷	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [16]
6. Ионная имплантация и осаждение	газообразное	множество локализованных, 10 ³ ...10 ⁵	0,002...0,2 [15]

виями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя, за пределами которого происходит срыв потока [5].

2. При резке и послойном нанесении металлических порошков в твердом состоянии в плазменных процессах образуется объемная зона поглощения энергии [13]. Толщина формируемого слоя определяется совместным действием кинетического и термодинамического факторов, описываемых скоростью движения частиц порошка и термодинамическим потенциалом плазменного потока, а процесс формирования слоя характеризуется соотношением между кинетической и джоулевой энергией потока.

3. В процессах электроэрозионной обработки поверхности и электромагнитной наплавки порошка образуется множество локализованных зон поглощения энергии. Электромагнитная наплавка позволяет наносить покрытие только до определенной толщины, после чего формируемый слой теряет устойчивость, а на поверхности образуются пики, которые при последующих разрядах превращаются в кратеры [14].

Управлять процессом наплавки позволяют электромагнитные потоки. Так, движения и фиксация частиц ферропорошка задаются индукцией магнитного поля, а интенсивное тепловыделение в местах контакта с формируемой поверхностью и плавление порошка определяются напряженностью электрического поля.

В результате роста сопротивления ферропорошковой среды, и электропроводности наносимого покрытия, стабилизируется толщина наносимого слоя [10]. Процесс электромагнитной наплавки определяется электромагнитными и инерционными силами и описывается магнитным взаимодействием частиц и напряженностью электрического поля в рабочей зоне [11].

4. В процессах электронно-лучевой резки, формирования и модифицирования поверхностного слоя целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии, сканируемую по всей формируемой поверхности [10]. При лучевой обработке в результате конвекционной неустойчивости в узком поверхностном слое расплава определенной толщины формируются состоящие из вихрей диссипативные структуры. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется ячеистая структура. Толщина измененного слоя

описывается соотношением свойств металла, его коэффициентами поверхностного натяжения и объемного расширения, плотностью в расплавленном состоянии [15].

5. При лазерной резке, оплавлении и легировании поверхностного слоя, целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии. В процессе кристаллизации материала в ванне расплава также образуется ячеистая структура [11]. Процесс формирования диссипативных структур в расплаве определяется проявлением термокапиллярных явлений и связан с подъемной силой плавучести и силой диссипации в расплаве [6].

6. При ионной имплантации и осаждении покрытия из газообразного состояния поток ионов, не фокусируясь, распределяется по поверхности детали, формируя множество локализованных зон поглощения энергии. Толщина наносимого покрытия определяется в основном толщиной слоя, в котором потенциал, прилагаемый к детали, эффективно воздействует на ионы [14]. Этот слой описывается соотношением величины потенциала электрического поля и плотности ионов плазмы с учетом их заряда и массы. Ионы в результате совместного влияния их потенциальной энергии в электрическом поле и тепловой энергии плазменного потока распределяются по экспоненциальному закону, задавая тем самым толщину осаждаемого покрытия [16].

Рассмотренные высокоэнергетические процессы дают возможность послойно наносить материалы с особыми свойствами и создавать поверхности изделий геометрически сложной формы. Они позволяют направленно изменять физико-механические свойства материала в зависимости от требований эксплуатации деталей в машине [10, 16].

Формирование поверхностного слоя сложного профиля. Высокоэнергетические процессы аддитивных технологий рассматриваются с системных позиций, как последовательности преобразований вещества, энергии и энтропии в материальных и информационных подсистемах, направленные на изменение точности и качества поверхностей и физико-механических свойств изделия [17].

Для анализа путей интенсификации формирования структур и фаз поверхностных слоев деталей в обрабатывающей системе выделяются нестабильные переменные (температура, давление, сила тока, магнитная индукция и др.), которые подчиняют себе развитие, эволюцию стабильных в данном процессе пара-

метров. Такой подход позволяет рассматривать любую структуру, как самостабилизирующийся энергетической обусловленностью комплекс [10, 17]. При эволюции чередование переходов системы из устойчивого в неустойчивое состояние сопровождается сменой масштабного уровня процесса поглощения энергии и образованием диссипативных структур [11, 16].

Для описания процессов модифицирования поверхностных слоев при воздействиях концентрированными потоками энергии исследуется открытая технологическая система с дополнительными термодинамическими степенями свободы и рассматривается формирование диссипативных структур и фаз, рассеивающих избыток подводимой энергии.

Поверхности раздела структур и градиенты свойств слоев при аддитивных синерготехнологиях, формирующих композиционный материал изделия, определяются технологическими барьерами, которые дают возможность установить граничные условия процессов послойного синтеза [18]. Условия создания слоя в высокоинтенсивных процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых оболочек изделия.

Конфигурацию границ позволяет рассмотреть компьютерное поверхностное и твердотельное моделирование, при этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводится к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности и специфические условия технологий, связанные с устойчивостью процессов, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [5, 8].

При индукционной наплавке погружением происходит затекание внутренних полостей, а заполнение пор зависит от условий смачивания расплава [12]. В процессах плазменного напыления и наплавки происходит скругление кромок [13]. На наиболее выступающих участках при электромагнитной наплавке толщина наносимого слоя снижается [14]. Толщина измененного слоя при электронно-лучевом или лазерном оплавлении вследствие концентрационного расслоения расплава в образующихся вихрях неоднородна и зависит от степени присутствия легирующих элементов [15]. При ионном осаждении покрытий, на выступах с малым радиусом при вершине вследствие увеличения потенциала слой наращивается наиболее интенсивно [16].

В результате условия создания слоя в высокоэнергетических процессах целесообразно

связать с особенностями конструирования формируемых изделий, а для создания слоев стабилизированной толщины в физических полях следует обеспечивать устойчивость технологической системы при индукционной, плазменной, электромагнитной, электронно-лучевой, лазерной наплавке и обработке поверхности.

Самоорганизация поверхностных явлений в технологической среде. Особое внимание в технологической системе при обработке следует обращать на технологическую среду, которая в процессах нанесения плоских слоев (по VD-технологиям) и формировании оболочек (по DD-технологиям) создается воздействиями концентрированных потоков энергии.

Из-за рельефа шероховатости на поверхности детали скорость движения потока *непрерывной технологической среды* изменяется. Поэтому существует пограничный слой, находящийся между потенциальным течением и поверхностью детали. Этот пограничный слой, называемый слоем Прандтля, не является безвихревым, так как в нем благодаря вязкости среды действует трение, обусловленное сопротивлением обтеканию в ламинарном течении [19].

Толщина пограничного слоя Прандтля t_{Pr} , внутри которого относительная скорость v падает до нуля, зависит от кинематической вязкости ν технологической среды, и длины l обтекаемого тела [20]

$$t_{Pr} = \sqrt{\frac{6lv}{\nu}}.$$

В результате, неравномерность толщины покрытия, формируемого в расплаве, определяется пограничным слоем Прандтля, а максимальная толщина покрытия зависит от t_{Pr} .

Если при ламинарном обтекании критерий Рейнольдса превышает критическое значение, то часть пограничного слоя отрывается. Это приводит к тому, что часть потока становится турбулентной, и значительно возрастает сопротивление обтеканию.

Задаваемое динамической вязкостью $\eta = \nu\rho$, сопротивление трения переходит в большее по значению, определяемое плотностью среды ρ сопротивление давления [19].

В технологической системе ионно-плазменные, электронные и лучевые воздействия *дискретной технологической среды* не полностью поглощаются формируемыми по-

верхностными слоями. При этом рассеяние потоков не всегда связано с образованием диссипативных структур в поверхностных слоях, а часто обусловлено отражением, преломлением или другими явлениями отвода вещества и энергии из рабочей зоны [10, 11].

В ионно-вакуумных процессах большая часть ионов плазмы бомбардирует катод, что приводит к испарению с его поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые в свою очередь ионизируются в вакуумной дуге и снова возвращаются на катод в виде ионов. Осуществляется, так называемый, процесс самогенерации плазмы [16]. Главным в этом процессе является то, что плазма вакуумной дуги, представляет собой эффективный источник ионов материала катода. Чтобы создать направленный поток ионов к подложке, к ней прикладывается отрицательный потенциал. При этом подразумевается, что подложка является электропроводящей.

Однако зачастую покрытие необходимо наносить на диэлектрическую подложку или же наносимое покрытие не обладает электропроводимостью. В этом случае к подложке прикладывается высокочастотный потенциал. В результате высокоподвижные электроны создают отрицательный по отношению к плазме потенциал самосмещения на поверхности диэлектрика, отбирающий ионы из плазмы.

На формирование ионных потоков к подложке оказывают влияние величина прикладываемого потенциала φ и форма самой подложки, что следует из уравнения движения ионов:

$$m_i \frac{d^2 l}{dt^2} = Z_i E_l = -Z \Delta \varphi,$$

где m_i – масса иона; Z_i – его заряд; E_l – напряженность электрического поля.

Величина $\Delta \varphi$ находится из решения уравнения Пуассона:

$$\Delta \varphi = -\frac{n_i Z_i}{\varepsilon_0},$$

где n_i – плотность ионов плазмы; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Из этого следует, что если подложка представляет собой бесконечно плоскую поверхность, то только в этом случае поток ионов к ней будет однородным, т.е. концентрация ионов в местах, равноудаленных от поверхности, будет одинаковой. Если же на поверхности подложки имеются выступы и углубления различной формы, то это приводит к искрив-

лению траектории движения ионов и соответственно к тому, что количество ионов, попадающих на подложку в единицу времени, неодинаково в разных ее местах. Как следствие, толщина наносимого покрытия будет разной и, с увеличением потенциала неоднородность плотности ионов в плазме повышается.

Область возникающих неоднородностей ограничивается в основном толщиной примыкающего к ней слоя Дебая, т.е. слоя, в котором потенциал, прилагаемый к подложке, эффективно воздействует на ионы. Толщину слоя Дебая t_D можно найти, однако уравнение имеет аналитическое решение только для простых случаев. В частности, для бесконечной, идеально гладкой поверхности [5, 16]:

$$t_D = \sqrt{\frac{\varphi \varepsilon_0}{n_i Z_i}}.$$

Потенциальная энергия иона в электрическом поле равна $Z_i \varphi$. Согласно формуле Больцмана, ионы в единице объема слоя Дебая распределяются по энергиям следующим образом:

$$n_i = n_{i0} e^{\frac{Z_i \varphi}{k_B T}},$$

где n_{i0} – плотность ионов вдали от слоя Дебая; k_B – постоянная Больцмана.

В результате, получаем уравнение:

$$\Delta \varphi = -\frac{Z_i n_i}{\varepsilon_0} e^{-\frac{Z_i \varphi}{k_B T}}.$$

Решение уравнения позволяет найти зависимость $\varphi(l)$ с учетом изменения плотности ионов $n_i(l)$ в слое Дебая и тем самым определить основные особенности формирования ионных потоков.

При решении конкретных задач необходимо учитывать соотношение величины t_D , размеры и форму подложки. Если длина и ширина плоского изделия на подложке значительно превышает t_D , тогда его можно рассматривать как бесконечное, плоское, идеально гладкое тело и краевые эффекты не будут сказываться на толщине и структуре наносимого покрытия. В противном случае краевые эффекты приводят к неоднородности и разнотолщинности наносимого покрытия.

Толщина слоя Дебая t_D зависит от плотно-

сти ионов n_i . С увеличением плотности n_i толщина t_D уменьшается, а следовательно, уменьшается размер изделий, поверхности которых можно рассматривать как бесконечные.

В случае использования вакуумного электродугового источника ионов плотность повышается с увеличением разрядного тока вакуумной дуги, а также при напуске в вакуумную систему инертных или реакционных газов, которые ионизируются. Это необходимо учитывать при оптимизации технологических параметров процесса нанесения покрытий.

Следовательно, можно сделать вывод, что формирование ионных потоков, идущих к подложке, происходит в основном в слое Дебая, толщина которого зависит от плотности ионов n_i , их зарядов, масс и энергии. Развитая поверхность подложки, наличие на ней неровностей вызывают разнотолщинность наносимого покрытия, формирование в нем различных структур [5, 11, 16]. Для снижения разнотолщинности покрытий необходимо стремиться к уменьшению толщины слоя Дебая, что достигается уменьшением прикладываемого к подложке потенциала либо увеличением плотности ионов.

Заключение

Аддитивные процессы прямого выращивания изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых слоев (по VD-технологиям) и оболочек (по DD-технологиям) раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин.

Использование самоорганизации поверхностных явлений позволяет формировать слои определенной толщины по всей сложнопрофильной рабочей поверхности и управлять обеспечением свойств материала потоками энергии.

Наиболее перспективными направлениями развития аддитивных технологий послойного синтеза изделий с управляемым формированием свойств материала являются:

- создание новых функциональных, градиентных материалов, как для каркаса – основы, так и для поверхностных слоев – покрытий;
- проектирование процессов, синтезирующих многослойные, композиционные материалы при послойном формировании изделий потоками энергии или вещества;
- конструирование установок, использующих концентрированные источники энергии или конструкционных материалов для реализации

новых процессов послойного синтеза в автоматическом режиме;

- разработка программного обеспечения, как для моделирования послойных оболочек, так и для управления потоком энергии или материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л., Чижик С.А. и др. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева. Минск: Беларуская навука, 2011. 283 с.
2. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. М.: Машиностроение, 2003. 112 с.
3. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: Изд-в. СПбГУ, 2013. 221с.
4. Логачева А.И., Сентюринна Ж.А., Логачев И.А. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) // Перспективные материалы. 2015. № 5. С.5–15.
5. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк: ПГУ, 2001.156 с.
6. Русецкий А.М., Витязь П.А., Хейфец М.Л. и др. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларуская навука, 2012. 239 с.
7. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников, 1998. Т. 32. № 3. С. 2–7.
8. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л. Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 2(2). С. 3–8.
9. Чижик С.А., Хейфец М.Л., Филатов С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. №4 (29). С. 68–74.
10. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272с.
11. Гордиенко А.И., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П. и др. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки. Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000. 172 с.
12. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В. и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1970.184 с.
13. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления. Минск: Наука и техника, 1993. 296 с.
14. Хейфец М.Л., Акулович Л.М., Мрочек Ж.А., Зевелева Е.З. Электрофизические и электрохимические ме-

тоды обработки материалов. Новополоцк: ПГУ, 2012. 292 с.

15. Эйдельман Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. 1995. Т.165, № 11. С.1279–1294.

16. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 276 с.

17. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.

18. Чижик С.А., Хейфец М.Л., Филатов С.А. Технологические барьеры при высокоинтенсивных воздействиях в процессах послойного синтеза и обработки материалов // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2015. № 3. С. 107–113.

19. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

20. Кнойбуль Ф.К. Пособие для повторения физики. М.: Энергоиздат, 1981. 256 с.

REFERENCES

1. Vityaz' P.A., Ilyushchenko A.F., Kheifets M.L., Chizhik S.A. et al. *Techniques of Constructional Nano-Structural Materials and Coatings* / under the general editorship of P.A. Vityaz and K.A. Solntsev. Minsk: Belarusian Science, 2011. pp.283.

2. Golovin Yu.P., *Introduction in Nano-techniques*. M.: Mechanical Engineering, 2003. pp.112.

3. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N., *Additive Techniques in Mechanical Engineering*. S-Pb.: Publishing House S-PbSU, 2013. pp.221.

4. Logachyova A.I., Sentyurina Zh.A., Logachyov I.A. Additive Techniques in manufacturing critical parts of metal and alloys (Review) // *Promising Materials*. 2015. № 5. pp.5–15.

5. Kheifets M.L. Material Properties Formation at Layered Synthesis of Parts. Novopolotsk: PSU, 2001. pp. 156.

6. Rusetsky A.M., Vityaz P.A., Kheifets M.L. et al. *Theoretical Fundamentals in Technological Complex Design* / under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarusian Science, 2012. pp.239.

7. Alfyorov Zh.I. History and future semi-conductor hetero-structures // *Physics and Techniques of Semi-conductors*,

1998. Т. 32. № 3. pp. 2–7.

8. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Kheifets M.L. Efficient prototyping and production of complex products made of composite materials // *Science intensive technologies in mechanical Engineering*. 2011. № 2(2). pp. 3–8.

9. Chizhik S.A., Kheifets M.L., Filatov S.A. Prospects in development of technological complex of composite material additive synthesis and product shaping // *Mechanics of Machinery, Mechanisms and Materials*. 2014. №4 (29). pp. 68–74.

10. Kheifets M.L. *Combined Processing Designing*. M.: Mechanical Engineering, 2005. pp. 272.

11. Gordienko A.I., Kheifets M.L., Chemisov B.P. et al. *Synergetic Aspects of Physico-Chemical Methods of Processing*. Minsk: FTI; Polotsk: PSU, 2000. pp. 172.

12. Tkachyov V.N., Fistein B.M., Kazintsev N.V. et al. *Induction Hard Surfacing*. M.: Mechanical Engineering, 1970. pp. 184.

13. Vityaz' P.A., Ivashko V.S., Manoilo E.D. et al. *Theory and Practice of Flame Spraying*. Minsk: Science and Technique, 1993. pp. 296.

14. Kheifets M.L., Akulovich L.M., Mrochek Zh.A., Zevleva E.Z. *Electrophysical and Electrochemical Methods of Material Processing*. Novopolotsk: PSU, 2012. pp. 292.

15. Edelman E.D. Excitation of Electric Instability by Heating // *Physical Sciences Successes*. 1995. Vol.165, № 11. pp. 1279–1294.

16. Kheifets M.L., Kozhuro L.M., Mrochek Zh.A. *Self-organization Processes at Surface Formation*. Gomel: IMMS NANB, 1999. pp. 276.

17. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Synergy and Fractals in Material Science*. M.: Science, 1994. pp. 383.

18. Chizhik S.A., Kheifets M.L., Filatov S.A. Technological bars at high intensive effects in processes of layered synthesis and material processing // *Proceedings of NAS of Belarus. Series of Physical Technical Sciences*. 2015. № 3. pp. 107–113.

19. Loitsyansky L.G. *Fluid and Gas Mechanics*. M.: Science, 1987. pp. 840.

20. Knoibyull F.K. *Reference Book for Physics Repetition*. M.: Energoizdat, 1981. pp. 256.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов

