

УДК 621.002:536.75

П. И. ЯЩЕРИЦЫН, Н. Ф. ЛУТАКОВ, М. Л. ХЕЙФЕЦ, С. В. КУХТА

**ПРЯМОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСЛОЙНЫМ СИНТЕЗОМ
 С УПРАВЛЯЕМЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА
 ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

Изготовление деталей машин из композиционного материала с рабочими поверхностями сложного профиля без использования дорогостоящей формообразующей оснастки, сокращая стадию технологической подготовки производства, наилучшим образом удовлетворяет требованию снижения материальных и трудовых затрат.

Существо большинства применяемых технологий прямого выращивания заключается в быстром переводе тонкого слоя жидкого или порошкообразного плавкого сырья в твердое, сохраняющее форму состояние и в послойном синтезе изделия [1—3]. Такой перевод осуществляется обычно лазерным излучением или плазменными потоками, при этом движение луча или концентрированного потока управляется по программе. В качестве сырья в настоящее время широко используются при быстром прототипировании фоточувствительные полимеры, а при формировании трехмерных деталей — металлические порошки и порошки керамики с металлическими связующими [1—3].

Однако существующие технологии прямого выращивания деталей реализуются только для определенных материалов и формируют плоские непротяженные поверхностные слои. Последовательное формирование по всей сложнопрофильной, фасонной поверхности слоев из различных материалов и управление их свойствами в разнообразных высокоэнергетичных полях позволяют применять технологии, использующие самоорганизацию поверхностных явлений [4]. Последняя обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии до формируемой поверхности, а также позволяет посредством взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои.

Высокоэффективные процессы прямого выращивания деталей машин послойным синтезом

Процесс формирования слоя детали	Агрегатное состояние наносимого материала	Зона поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см ²	Толщина формируемого слоя, мм
Плазменное напыление и наплавка	Твердое (порошок)	Объемная, 10 ² —10 ⁵	0,1—10 [5]
Электромагнитная наплавка	Твердое (порошок)	Множество локализованных, 10 ³ —10 ⁵	0,05—0,5 [7]
Индукционная наплавка погружением	Жидкое (расплав)	Объемная, 10 ² —10 ⁴	0,3—3,0 [9]
Лазерное и электронно-лучевое оплавление	Жидкое (расплав)	Единая сфокусированная, 10 ³ —10 ⁷	1,0—10 (при термоэлектрической конвекции 0,01—1,0) [12]
Ионное осаждение	Газообразное	Множество локализованных, 10 ² —10 ⁵	0,002—0,2 [13]

Рассмотрим прямое выращивание деталей машин синтезом слоев материала (таблица) в различных агрегатных состояниях (твердом, жидком, газообразном) и в разнообразных высокоэффективных процессах с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зонами поглощения концентрированных потоков энергии [4].

Так, при нанесении металлических порошков в твердом состоянии в процессах плазменного напыления или при наплавке образуется объемная зона поглощения энергии [5]. Тол-

щина формируемого слоя определяется совместным действием кинетического и термодинамического факторов, описываемых скоростью потока частиц порошка и термодинамическим потенциалом плазменного потока. Сам процесс формирования слоя описывается энергетическим критерием Si , определяемым соотношением между энергией, которая несет поток, и джоулевой энергией [6].

При электромагнитной наплавке ферропорошка 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 [7]. Управлять процессом наплавки позволяют электромагнитные потоки. 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 возрастает сопротивление ферропорошковой среды, электропроводность наносимого покрытия и стабилизируется толщина наносимого слоя [8]. Процесс электромагнитной наплавки определяется соотношением критериев магнитного взаимодействия и напряженности электрического поля Sm/Se , описывающих электромагнитные и инерционные силы [6]. Также процесс может быть представлен соотношением модифицированных критериев Пекле и Прандтля Pe^*/Pr^* , описывающих энергию, отводимую конвекцией и проводимостью при определенной ее способности распространяться в данной среде [8].

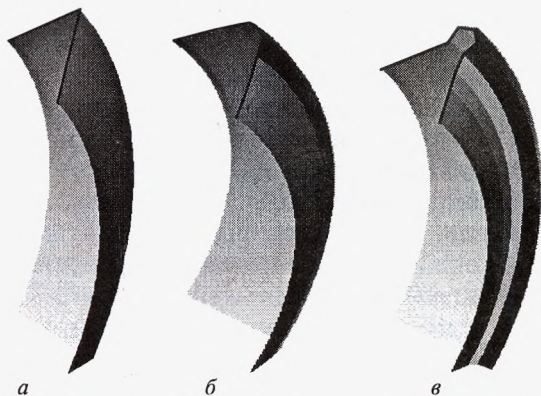
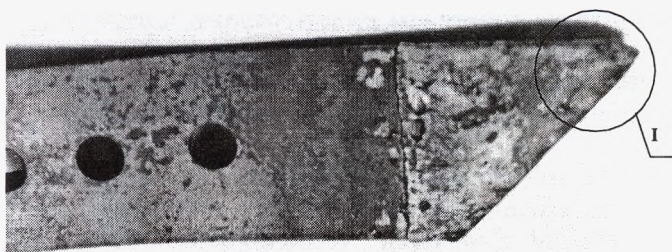
В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл рассматривается объемная зона поглощения энергии по всей наращиваемой поверхности [9]. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между поверхностью детали и расплавом, описываемой скоростью подъема детали, напряжением и коэффициентом внутреннего трения [10]. Максимальная толщина слоя при обтекании расплавом детали ограничивается условиями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя Прандтля d_G , за пределами которого происходит срыв потока [10].

При лазерном или электроннолучевом оплавлении поверхностного слоя или наносимого покрытия целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии, сканирующую по всей формируемой поверхности [11]. При лучевой обработке в результате конвекционной неустойчивости в расплаве формируются диссипативные структуры, состоящие из вихрей в узком поверхностном слое определенной толщины. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется ячеистая структура. Толщина измененного слоя d_M описывается соотношением свойств металла, его коэффициентами поверхностного натяжения и объемного расширения, плотностью в расплавленном состоянии [12]. Процесс формирования диссипативных структур в расплаве определяется критерием Марангони Mg , показывающим проявление термокапиллярных явлений, и критерием Рэлея Ra , описывающим соотношение подъемной силы и силы диссипации [6, 12].

В процессе ионного осаждения слоя из газообразного состояния поток ионов не фокусируется, а распределяется по поверхности детали. Толщина наносимого слоя определяется в основном толщиной слоя Дебая d_D , в котором потенциал, прилагаемый к детали, эффективно воздействует на ионы [13]. Слой Дебая описывается соотношением величины потенциала и потенциальной энергии иона в электрическом поле, а также плотностью ионов плазмы. Ионы в результате совместного влияния их потенциальной энергии в электрическом поле и тепловой энергии плазменного потока распределяются по экспоненциальному закону в единице слоя Дебая, задавая тем самым толщину осаждаемого покрытия [13].

Рассмотренные высокоэффективные процессы дают возможность послойно наносить материалы с особыми свойствами и создавать поверхности деталей геометрически сложной формы. Эти процессы позволяют направленно послойно изменять физико-механические свойства материала и устанавливать их в зависимости от требований к эксплуатации деталей машин.

Рациональные структуры слоев, поверхности их раздела и градиенты свойств определяют технологическими барьерами, которые в соответствии с условием устойчивости описываются производными импульса энергии по глубине поверхностного слоя [14]. Технологические барьеры дают возможность установить граничные условия процессов послойного синтеза, а конфигурацию границ позволяет определить компьютерное поверхностное и твердотельное моделирование [15]. При этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводятся к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности и специ-



Рабочий орган почвообрабатывающей машины и его режущая кромка после индукционной наплавки погружением (1): исходный контур упрочняемой поверхности (а), после погружения в расплав (б) и дополнительного наращивания кромки (в)

фические условия технологий, связанные с устойчивостью процессов, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями.

В процессах плазменного напыления и наплавки происходит скругление кромок. На наиболее выступающих участках при электромагнитной наплавке толщина наносимого слоя снижается [7]. При индукционной наплавке погружением происходит затекание внутренних полостей, заполнение пор зависит от условий смачивания расплава. Толщина измененного слоя при лазерном или электронно-лучевом оплавлении вследствие концентрированного расслоения расплава в образующихся вихрях неоднородна и зависит от степени присутствия легирующих элементов [12]. При ионном осаждении покрытий на выступах с малым радиусом на вершине вследствие увеличения потенциала слой наращивается наиболее интенсивно [13]. Следует отметить, что специфические условия создания слоя в высокоэффективных процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых оболочек.

При индукционной наплавке для формирования острых кромок необходимо дополнительно погружать скругленные выступы, обеспечивая этим дополнительное наращивание слоя (рисунок). Последующая финишная механическая обработка позволит заточить упрочненные кромки.

Таким образом, рассмотренные высокопроизводительные, безотходные, экологически чистые процессы прямого выращивания деталей машин послойным синтезом показывают, что использование самоорганизации поверхностных явлений позволяет формировать слои определенной толщины по всей сложнопрофильной рабочей поверхности и управлять обеспечением свойств материала потоками энергии в технологическом диапазоне плотностей мощности (10^2 – 10^7 Вт/см²).

Вследствие этого наиболее перспективными направлениями развития технологий прямого выращивания деталей машин с управляемым формированием свойств материала являются: 1) создание новых материалов как для каркаса-основы, так и для поверхностных слоев-покрытий; 2) проектирование процессов, синтезирующих композиционные материалы при послойном формировании деталей концентрированными потоками энергии; 3) разработка программного обеспечения как для моделирования послойных оболочек, так и для управления лучом или потоком энергии; 4) конструирование установок, реализующих новые высокоэнергетические процессы послойного синтеза в автоматическом режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Summary

It is shown, that using self-organization of surface effects at solid free form fabrication of details allows forming the layers of certain thickness along the whole surface of complicated profile and allows controlling the guaranting of materials characteristics by current of energy during laminate synthesis.

Литература

1. Горюшкин В. И. Основы гибкого производства деталей машин и приборов. Мн., 1984.
2. Белянин П. И. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 6. С. 3–14.
3. Скородумов С. В. // Вестн. машиностроения. 1998. № 1. С. 20–28.

4. Я щ е р и ц ы н П. И., К о ж у р о Л. М., С е н ч и л о И. А., Х е й ф е ц М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1995. Т. 39, № 1. С. 112—116.
5. В и т я з ь П. А. и др. Теория и практика газопламенного напыления. Мн., 1993.
6. Ж у к о в М. Ф., У р ю к о в Б. А. В сб.: «Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов». М., 1973. С. 3—14.
7. Я щ е р и ц ы н П. И., З а б а в с к и й М. Т., К о ж у р о Л. М., А к у л о в и ч Л. М. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. Мн., 1988.
8. Х е й ф е ц М. Л. Самоорганизация процессов при высокоэффективных методах обработки деталей. Новополоцк, 1997.
9. Т к а ч е в В. Н., Ф и ш т е й н Б. М., К а з и н ц е в Н. В. и др. Индукционная наплавка твердых сплавов. М., 1970.
10. К н о й б ю л ь Ф. К. Пособие для повторения физики. М., 1981.
11. Ш и п к о А. А., П о б о л ь И. Л., У р б а н И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электроннолучевого нагрева. Мн., 1985.
12. Э й д е л ь м а н Е. Д. // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 11. С. 1279—1294.
13. М р о ч е к Ж. А., Э й з н е р Б. А., М а р к о в Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. Мн., 1991.
14. Я щ е р и ц ы н П. И., Ш и п к о А. А., Х е й ф е ц М. Л., К о ж у р о Л. М. // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41, № 5. С. 110—113.
15. К р ю ч к о в А. А. // САПР и графика. 1997. № 9. С. 84—90.

*Физико-технический институт НАН Беларуси,
Белорусский государственный аграрный технический университет,
Полоцкий государственный университет*

*Поступила в редакцию
03.03.99*