



УДК 621.9.06.529
DOI: 10.12737/20597

**Ю.А. Моргунов, к.т.н.,
Б.П. Саушкин, д.т.н.**
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) г.Москва)
E-mail: morgunov56@mail.ru

Технико-экономические аспекты аддитивного формообразования

Приведена сравнительная характеристика классических и аддитивных технологий одного целевого назначения, выделены их позитивные и негативные стороны. Рассмотрена задача технико-экономического обоснования внедрения технологий аддитивного формообразования на машиностроительном предприятии. Отмечается востребованность таких технологий в производстве авиационно-космической техники.

Ключевые слова: аддитивное формообразование; технико-экономическое обоснование.

**Yu.A. Morgunov, Can.Eng.,
B.P. Saushkin, D.Eng.**
(Moscow University of Mechanical Engineering (MAMI) Moscow)

Technical and economic aspects of additive shaping

The techniques of additive shaping develop intensively during the last 20-30 years. Their application in mechanical engineering allow reducing considerably the duration of technological preparation for new produce manufacturing, using fundamentally new design-technological solutions, reducing finally labour-intensiveness and cost price of significant domestic defense produce manufacturing.

In the paper there is shown a comparative characteristic of common and additive technologies of one purposeful destination, their advantages and disadvantages are emphasized. The problem of technical and economic assessment for the introduction of the techniques of additive shaping at an enterprise of mechanical engineering is considered. The relevance of such techniques in aerospace engineering production is emphasized, particularly under conditions of experimental production when the reduction of the cycle duration in engineering and design preparation of manufacturing is a decisive factor.

The urgency of the development of integrated techniques which will ensure the further increase of technical and economic characteristics of production at the expense of the realization of advantages of both subtractive methods and additive ones affecting the material and connected with this of synergetic effects is substantiated.

Keywords: additive shaping; technical and economic substantiation.

Ключевым вопросом социально-экономического развития России является технологическая модернизация промышленного производства в области машино- и приборостроения – основы оборонно-промышленного комплекса страны [1]. Такая модернизация производства подразумевает опережающее развитие и внедрение аддитивных технологий, в использовании которых наша страна отстает по некоторым оценкам на 10 – 15 лет [2 – 4].

Согласно классификатору методов размерного формообразования [5] классификацион-

ный признак, характеризующий трансформацию исходного объема заготовки в объем детали, позволяет разделить все существующие методы и технологии на их основе на четыре класса (табл. 1).

Широкое распространение получили методы формообразования второго и третьего классов, на которых основаны, так называемые, субтрактивные и аддитивные технологии. Технологии второго класса превалируют и будут превалировать в обозримом будущем в машиностроительном производстве. Технологии третьего класса редко применялись для

целей размерного формообразования. Однако в 80–90-х гг. XX века в связи с развитием и удешевлением цифровых технологий, появлением прецизионных мехатронных приводов, совершенствованием лазерной техники и дру-

гими факторами аддитивные методы и технологии размерного формообразования совершили качественный скачок и стали конкурентоспособными с классическими технологиями обработки со снятием стружки (табл. 2).

1. Классы методов обработки по характеру трансформации исходного объема заготовки

Класс	Описание класса	Название	Примеры технологий
1	В процессе обработки объем заготовки не изменяется по величине, но перераспределяется в пространстве.	Методы перераспределения объема. <i>Redistributive methods.</i>	Ковка, штамповка, гибка.
2	Объем изделия получают путем удаления «лишнего» объема заготовки.	Методы удаления части объема заготовки. <i>Subtractive methods.</i>	Обработка резанием лезвийным или абразивным инструментом, химическое растворение.
3	Объем изделия получают добавлением материала к исходной заготовке или нанесением материала на технологическую подложку.	Методы наращивания объема изделия. <i>Additive methods.</i>	Гальваника, газотермическое напыление, селективное лазерное спекание или плавление, лазерная стереолитография, лазерное осаждение металла из порошка.
4	Изделие получают одновременным или последовательным удалением материала с одной части заготовки и нанесением его на другую.	Комбинированные (интегрированные) методы формирования объема изделия. <i>Combined (integrated) methods.</i>	Некоторые способы электрохимической обработки, модификации метода химических транспортных реакций, интеграция металлорежущих станков с ЧПУ с лазерной головкой и пр.

2. Сравнительная характеристика технологий второго и третьего классов

Свойства (характеристики) технологии	Класс по табл. 1			
	2		3	
1. Возможность достижения высокой точности (10^{-7} м) методом последовательных приближений.	Выше	+	Ниже	–
2. Возможность формирования специальных свойств поверхностного слоя.	Выше	+	Ниже	–
3. Производительность и низкая себестоимость в условиях крупносерийного и массового производства.	Выше	+	Ниже	–
4. Развитый парк технологического оборудования.	Есть	+	Нет	–
5. Высокий уровень унификации и стандартизации изделий и средств технологического оснащения.	Есть	+	Нет	–
6. Возможность применения развитого и апробированного теоретического аппарата технологии машиностроения.	Выше	+	Ниже	–
7. Уровень развития программного обеспечения (CAD/CAM/ CAE).	Выше	+	Ниже	–
8. Номенклатура методов, способов и технологических операций	Шире	+	Уже	–
9. Наличие развитой нормативно-справочной базы.	Есть	+	Нет	–
10. Количество единиц технологического оборудования в ТП.	Больше	–	Меньше	+
11. Дополнительные траты на складские и транспортные работы.	Выше	–	Ниже	+
12. Затраты на оснастку и инструменты.	Больше	–	Меньше	+
13. Занимаемые производственные площади.	Больше	–	Меньше	+
14. Затраты на сборку-разборку отдельных сборочных единиц.	Выше	–	Ниже	+
15. Длительность цикла и стоимость технологической подготовки производства новых изделий.	Выше	–	Ниже	+
16. Вероятность появления брака*.	Выше	–	Ниже	+
17. Затраты трудовых ресурсов.	Выше	–	Ниже	+
18. Коэффициент использования материалов.	Ниже	–	Выше	+
19. Возможность получения изделий с градиентным составом и свойствами.	Нет	–	Есть	+
20. Степень сложности изготавливаемых изделий.	Ниже	–	Выше	+

*Вероятность отказа многостадийного процесса, как правило, выше, чем малостадийного.

Эти технологии позволяют существенно сократить длительность технологической подготовки производства новых изделий, использовать принципиально новые конструкторско-технологические решения, снизить, в конечном счете, трудоемкость и себестоимость изготовления ответственной продукции [6]. Аддитивные технологии особенно востребованы в производстве авиационно-космической техники в условиях единичного или мелкосерийного типов производства [3, 7]. Так, доля аэрокосмической отрасли на мировом рынке аддитивных технологий составляет около 12 %. Обоснована высокая эффективность применения аддитивных технологий на предприятиях ракетно-космической отрасли, в частности, для изготовления ответственных деталей двигателей различного типа.

При освоении технологий третьего класса актуальной задачей становится описание их характеристик и условий реализации методами и средствами классической технологии машиностроения. Уточняется понятийный аппарат, устанавливаются взаимосвязи между параметрами физико-химических процессов, обеспечивающих синтез твердого тела заданной конфигурации, и технологическими характеристиками операций аддитивного формообразования [8]. Такая работа приведет в обозримом будущем к созданию нормативно-справочной базы аддитивных технологий.

При обосновании внедрения новых базовых технологий учитывают их влияние на основные функциональные показатели изделия и затраты на всех стадиях жизненного цикла. Так, в [3] применительно к технологиям изготовления воздушных судов в качестве критерия эффективности технологий принят коэффициент $K_{\text{эф}}$, определяемый из соотношения

$$K_{\text{эф}} = \Delta\mu/\Delta W \quad (1)$$

и правило предпочтения – $K_{\text{эф}} \rightarrow \max$ – при $R \geq [R_0]$ и $W \leq [W_0]$, где $\Delta\mu = f(q, v, R)$ – функция полезности; q – полезная нагрузка; v – крейсерская скорость; R – ресурс изделия; ΔW – стоимость жизненного цикла, $[R_0]$, $[W_0]$ – ограничения на ресурс и стоимость жизненного цикла.

Выражение (1) дает общую оценку эффективности технологии, однако, в заводских условиях ее использование затруднительно из-за неопределенности в ряде случаев функции полезности, затрат на стадии эксплуатации и прочих факторов.

С формально-технологической точки зре-

ния внедрение аддитивной технологии на конкретном предприятии оправдано и целесообразно в том случае, если при прочих равных условиях снижаются издержки производства на единицу продукции (удельные ресурсозатраты). Таким образом, для технико-экономического обоснования внедрения аддитивной технологии на предприятии первостепенное значение приобретает расчет разности цеховых себестоимостей изготовления детали или сборочной единицы по двум вариантам технологий:

– существующая технология изготовления изделия с использованием освоенных методов получения заготовок и механообработки (ТП₁);

– технология изготовления изделия с использованием операций аддитивного формообразования (ТП₂).

Прежде, чем обсудить особенности такого расчета, сформулируем некоторые условия, ограничения и допущения:

1. Согласно [9] необходимым условием сравнения технико-экономической эффективности вариантов технологий является тождественность производственных результатов, которое сводит все различия между сопоставляемыми вариантами к различию производственных затрат. Поэтому прежде, чем проводить сравнительный анализ вариантов необходимо проверить тождество результатов по составу продукции, ее качеству, объему продукции, срокам выполнения производственного задания, режиму времени и условиям труда.

2. Очевидно, что если второй вариант позволяет сразу получить составную часть изделия, состоящую из n деталей, то для обеспечения тождественности результата по составу продукции в первом варианте следует учитывать суммарные удельные затраты на изготовление каждой из n деталей плюс себестоимость процесса их сборки.

3. Очевидно также, что если второй вариант обеспечивает сокращение цикла технологической подготовки производства, то для сравнения необходимо обеспечить тождественность вариантов по срокам. Такая ситуация характерна при внедрении аддитивных технологий в производстве новых изделий, однако рекомендации по расчету экономической эффективности от снижения сроков носят достаточно общий характер. Так, в [9] предлагается по первому варианту предусмотреть и рассчитать дополнительные затраты для выдерживания срока, обеспечиваемого по второму варианту,

что вызывает определенные трудности.

В конечном счете, сокращение цикла технологической подготовки производства обеспечивает ускоренную поставку товарной продукции на рынок, что особенно важно при изготовлении новой по потребительским свойствам товарной продукции в условиях жесткой конкуренции. Нам представляется, что это обстоятельство можно учитывать при расчете, как упущенную выгоду от потенциальной реализации продукции по варианту ТП₁. Такой расчет также вызывает вопросы из-за возможного изменения рыночной конъюнктуры, изменения уровня цен на продукцию данного наименования, типоразмера и исполнения, ценовой конъюнктуры. Однако он дает возможность достаточно просто оценить важное конкурентное преимущество аддитивных технологий.

Встречаются ситуации, когда сокращение срока производства и освоения новой техники диктуется не экономическими, а иными причинами (политическими, социально-экономическими, конъюнктурными), однако, детальный анализ позволяет и в этом случае выявить экономическую составляющую принятого решения.

4. Принимаем, что оба варианта обеспечивают одинаковое качество продукции, обусловленное техническими условиями на изготовление (тождественность по качеству продукции). Если же один из сравниваемых вариантов технологии позволяет существенно улучшить функциональные свойства изделия (например, ресурс), то этот фактор необходимо оценивать при расчете, руководствуясь имеющимися рекомендациями. Так, в [10] рекомендуется пересчитывать число изделий повышенного качества в большее число изделий обычного качества с пересчетом соответствующих затрат.

Учитывая сказанное, структура затрат на себестоимость изготовления и сборки по первому варианту технологии представляется в виде

$$C_1 = \sum_{i=1}^m (C_{1zi} + C_{1mi}) + C_{сб}, \quad (2)$$

а по второму –

$$C_2 = C_{пр} + C_{ад} + C_{пс}, \quad (3)$$

где C_1 , C_2 – суммарные себестоимости изготовления конечного продукта по сравниваемым вариантам технологии; C_{1zi} – себестоимость получения заготовки i -й детали сборочной единицы; C_{1mi} – себестоимость механообработки i -й детали; m – число изготавливаемых

деталей сборочной единицы; $C_{сб}$ – себестоимость сборки составной части изделия с учетом стоимости всех остальных комплектующих согласно спецификации сборочной единицы; $C_{пр}$ – себестоимость предварительных (предшествующих) операций; $C_{ад}$ – себестоимость операции (операций) аддитивного формообразования; $C_{пс}$ – себестоимость последующих операций окончательной обработки изделия.

Заметим, что аддитивные технологии послойного выращивания изделий из порошка не позволяют избавиться от остаточной пористости, что заставляет в ряде случаев использовать последующие технологии, например, изостатическое прессование, инфльтрацию, термообработку. Согласно имеющимся данным, как конечное изделие используют всего около 19 % продукции аддитивного производства.

Предполагается, что исходные материалы по второму варианту, например, металлический порошок являются покупными и на предприятии не производятся.

Для технико-экономической оценки эффективности двух вариантов технологий используют метод прямого расчета себестоимости [10], согласно которому выбор лучшего варианта осуществляют по двум критериям: расчетному коэффициенту сравнительной экономической эффективности E_p или по расчетному сроку окупаемости T_p . Правило предпочтения выражается неравенствами вида

$$E_p > E_n, T_p < T_n, \quad (4)$$

где индекс « n » соответствует нормативной величине соответствующего критерия. При нахождении этих критериев приходится рассчитывать разность суммарных цеховых себестоимостей при переходе от первого варианта ко второму ($\Delta C = C_1 - C_2$):

$$\Delta C = \Delta C_m + \Delta C_{зр} + \Delta C_a + \Delta C_{и} + \Delta C_{пр} + \Delta C_{зс} + \Delta C_{вм} + \Delta C_3 + \Delta C_{уп} + \Delta C_{сб}, \quad (5)$$

где ΔC_m – разность затрат на основные материалы по сравниваемым вариантам; $\Delta C_{зр}$ – разность затрат на зарплату производственных работников с начислениями; ΔC_a – разность затрат на амортизацию и ремонт оборудования; $\Delta C_{и}$ – разность затрат на инструмент с учетом переточек; $\Delta C_{пр}$ – разность затрат на станочные и контрольно мерительные приспособления; $\Delta C_{зс}$ – разность затрат на эксплуатацию и амортизацию зданий и сооружений; $\Delta C_{вм}$ – разность затрат на вспомогательные материалы; ΔC_3 – разность затрат на тех-

нологическую энергию; $\Delta C_{уп}$ – разность затрат на управление производственными процессами; $\Delta C_{сб}$ – затраты на сборку составной части изделия, выполняемой по аддитивному варианту, как одна деталь.

Проанализируем отдельные наиболее значимые слагаемые, входящие в правую часть выражения (5).

В общем случае разность расходов на материал ΔC_M рассчитывают по известной формуле [10], зная оптовые цены на единицу массы материала и отходов, нормы расхода материала и массу отходов на одно изделие по вариантам.

В табл. 3 приводятся данные о ценах на некоторые порошковые материалы на внешнем рынке и цены на них, извлеченные из коммерческих предложений некоторых компаний [4]. Как видно, из-за отсутствия собственного развитого производства и рынка порошковых материалов российскому потребителю приходится платить значительно больше по ряду позиций номенклатуры порошков. В нижней строке приведены средневзвешенные цены на прокат диаметром 30...100 мм из тех же материалов, полученные по результатам анализа коммерческих предложений, размещенных в сети. Представленные данные показывают, что стоимость порошковых материалов (для SLM) на порядок и выше цен на прокат, используемый в заготовительном производстве.

3. Стоимость некоторых порошковых материалов и соответствующего проката (Ев/кг)

Происхождение цены	Материал				
	Ti-6AL-4V	Co-Cr	AlSi12	Spesial steel	Inconel 625
Оптовая цена на внешнем рынке	200...300	150	70...90	70...80	75
SLM Solutions	520	210	60	130	160
EOS	485	320	122	235	–
Прутковый прокат в России (руб.)	17...25 (1300...1900)	–	3...5(Al) (230...350)	3...4 (200...270)	–

При послойном спекании (сплавлении) лазерным лучом или электронным пучком часть порошка, контактирующего с контуром формирующегося твердого тела, частично спекается или оплавляется и удаляется при последующем просеивании. Для относительно габаритных деталей сложной формы используются поддержки и подложка.

Все это приводит к появлению отходов и выражается в том, что коэффициент использования материалов лежит обычно в пределах 0,7 – 0,9. Для ответственных деталей авиакосмической техники сложной формы, полученных по технологии ТП₁ значение этого коэффициента 0,05 – 0,2.

Приведенные данные позволяют оценить отношение стоимости материала при аддитивном формообразовании (C_{M2}) к стоимости его при механической обработке (C_{M1}) величиной $C_{M2}/C_{M1} = 0,5-5$. Видно, что, несмотря на высокую стоимость порошка, ΔC_M может быть величиной, как положительной, так и отрицательной. Отметим тенденцию к снижению стоимости порошка с прогнозом на его удешевление на 75 % (электронный ресурс: ur-pro.ru).

Зарплату основных производственных рабочих для каждого варианта получаем суммированием по числу операций ТП [10]. Особенность сравнительных расчетов в нашем случае заключается в следующем.

Во-первых, как правило, использование операции аддитивного формообразования позволяет заметно снизить количество операций в технологическом процессе изготовления детали. Во-вторых, штучно-калькуляционное время на операции аддитивного формообразования составляет, как правило, десятки часов. Поскольку современное оборудование длительное время работает в автоматическом режиме, при его эксплуатации целесообразно применять многостаночное обслуживание и совмещение профессий. В результате станкоемкость и трудоемкость операции значительно отличаются. В отсутствие каких-либо нормативов затраты живого труда, необходимые для расчета зарплаты на операции аддитивного формообразования, следует определять экспериментально на стадии освоения нового оборудования.

Для этого составляют перечень ручных и машинно-ручных приемов, необходимых для перевода оборудования в автоматический цикл и завершения работы, оценивается их длительность и производится суммирование с учетом возможного перекрытия. Такие данные можно также затребовать у поставщика оборудования на стадии подготовки контракта или воспользоваться данными, полученными в результате эксплуатации оборудования, близкого по техническим характеристикам, на родственных предприятиях. Анализ показывает, что трудоемкость операции аддитивного формообразования относительно невелика.

Так, при изготовлении детали типа «втулка» при машинном времени работы 20...40 ч затраты живого труда составляют примерно 1 ч.

При выполнении расчетов возникает необходимость оценки штучно-калькуляционного времени операции аддитивного формообразования. Использование классической структуры нормы времени в данном случае затрудняется, поскольку нормативы для определения ее составляющих в настоящее время отсутствуют. В заводских условиях приходится использовать статистические методы их определения, используя методики хронометража и фотографии рабочего дня.

Определение машинного времени также представляет определенные трудности из-за отсутствия расчетных формул в справочниках и зависимости вида таких формул от метода и способа аддитивного формообразования. Поэтому для каждого способа аддитивного формообразования получают расчетное выражение для машинного или оперативного времени, исходя из существующей методики нормирования технологических операций с учетом специфики физико-химических процессов получения объемных твердых форм в каждом случае. Так, для послойного построения объемных форм, характерного, например, для селективного лазерного спекания, рекомендуется использовать следующее выражение для определения времени построения изделия t_0 :

$$t_0 = t_m + t_{b1} + t_{b2} = \sum \left(\frac{F_i}{k_{\pi} d_{\pi}^{\text{эф}} v_{\pi}} + t_i^{\text{пс}} \right) + t_{b2}, \quad (6)$$

где t_0 – оперативное время; t_m – машинное время, обусловленное перемещением пятна светового контакта по контуру слоя; t_{b1} – часть вспомогательного времени, необходимого для подготовки формообразования выделенных слоев; t_{b2} – прочие затраты вспомогательного времени (выгрузка, включая возможную технологическую выдержку, включение цикла); m – число выделенных слоев; $d_{\pi}^{\text{эф}}$ – эффективный диаметр пятна контакта лазерного излучения с порошковым слоем; k_{π} – коэффициент перекрытия; F_i – площадь i -го слоя, длина трассы обхода центром пятна контакта; v_{π} – средняя скорость перемещения пятна контакта вдоль трассы; $t_i^{\text{пс}}$ – время подготовки к обходу j -го слоя.

Для более точного расчета машинного времени следует принять во внимание стратегию обхода данного контура площадью F_i свето-

вым пятном и рассчитать длину трассы обхода δ_i каждого слоя. В этом случае

$$t_m = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{v_{\pi}}. \quad (7)$$

Из приведенных расчетных выражений следует, что оперативное время зависит от числа слоев, способа разбиения на слои, выбранной стратегии обхода слоя, средней скорости перемещения пятна контакта. Видно также, что существенную долю оперативного времени составляют затраты t_{e1} на подготовку слоя к спеканию. Так, заменив традиционную схему формирования порошкового слоя (выдавливание порошка поршнем снизу), компания SLM Solutions разработала и запатентовала способ подачи порошка "сверху", позволивший сократить число ходов разравнивающего устройства, сократить время t_{e1} и за этот счет повысить производительность.

Влияние перечисленных факторов приводит к заметному различию времени построения для машин различных компаний. Например, время построения на SLM машинах трех разных производителей (одного формата, оснащенных лазерами приблизительно одной мощности – 500 Вт, 400 Вт и 400 Вт) пустотелой втулки диаметром 195 мм, высотой 165 мм и весом приблизительно 450 г, изготавливаемой из порошка АК-12, составляет 40, 28 и 20 ч соответственно при толщине единичного слоя 40 мкм.

Более грубая оценка машинного времени может осуществляться при известной величине объемной производительности установки на заданных режимах (Π_v) и расчетном объеме детали (V_p) с учетом возможных дополнительных построений:

$$t_m = V_p / \Pi_v. \quad (8)$$

Основным недостатком послойного синтеза изделий пространственно-сложной формы является относительно большая величина машинного времени обработки. Это приводит к высокой доле затрат C_a на амортизацию оборудования в калькуляции себестоимости. С учетом его высокой стоимости (по разным оценкам 0,3...1 млн. Евро в зависимости от производителя, типоразмеров, опций, условий поставки и пр.) эта статья затрат в ряде случаев становится определяющей. Так, по имеющимся данным доля затрат на амортизацию станка может достигать в отдельных случаях 70 % себестоимости изделия.

Для снижения себестоимости по этой статье затрат рекомендуется максимально повышать загрузку, эксплуатировать оборудование

без выходных, желательна в 2–3 смены. В связи с быстрым моральным износом такой техники срок окупаемости не должен превышать 5 лет. По мнению экспертов, в ближайшие годы следует ожидать заметного снижения цен на оборудование для SLS и SLM технологий, что благоприятно скажется на конъюнктуре продаж и темпах внедрения соответствующих технологий.

Важным преимуществом второго варианта технологии является резкое сокращение удельных затрат на инструмент и оснастку, как правило $\Delta C_{и} > 0$ и $\Delta C_{пр} > 0$. Расчет остальных составляющих выражения (5) затруднений не вызывает.

Для повышения экономических показателей при внедрении аддитивных технологий рекомендуется оснащать участок аддитивного формообразования несколькими машинами с различными возможностями, например, SLM 50 (100 Вт, диаметр пятна 12 мкм) + SLM 300 (400 Вт, 50 мкм):

- SLM машины с мощным лазером производительнее и обеспечивают более низкую технологическую себестоимость. Машины с менее мощным лазером и меньшим диаметром пятна обеспечивают лучшее качество поверхностного слоя изделий;

- распределение номенклатуры изделий разного типоразмера между машинами с различными габаритами рабочей зоны приводит к экономии порошка и сокращению вспомогательного времени.

К преимуществам аддитивных технологий, которые можно учесть при технико-экономическом обосновании относят также сокращение численности рабочих и затрат на обеспечение безопасности жизнедеятельности.

Эффективным направлением повышения производительности оборудования для аддитивного формообразования является разработка новых способов, отличных от послойного синтеза. Так, отметим появление способа аддитивного формообразования, основанного на объемном синтезе требуемой формы из жидкого интерфейса [11]. Этот способ – *continuous liquid interface production* (CLIP) – обеспечивает высокую скорость формообразования (в 25–100, а в перспективе, по мнению экспертов, до 1000 раз большую, чем способы послойного синтеза). Он также характеризуется изотропностью структуры и свойств объекта производства, низкой шероховатостью поверхности, высоким разрешением при печати изделия. Ожидается получение пространственно-сложного объекта, функциональные свойства которого соответствуют требованиям к готовому продукту, в режиме реального времени.

Отметим тенденцию к развитию техноло-

гий четвертого класса (см. табл. 1) и подчеркнем перспективность этого направления в технологии машиностроения. Такие технологии обеспечат дальнейшее сокращение длительности технологического цикла и позволят использовать достоинства, как субтрактивных, так и аддитивных технологий. Так, компания Solidica, разработала технологию UAM (*Ultra-sonic Additive Manufacturing*), на базе которой компания Fabrisonic выпускает гибридные станки типа SonicLayer R200, обеспечивающие аддитивно-субтрактивную обработку изделий из пластичных металлов и композиционных материалов с металлической или полимерной матрицей. Компания Mitsubishi LUMEX начала поставлять интегрированный комплекс Avance-25 Hermle обеспечивающий объединение SLS-технологий и 5-осного фрезерования. О подготовке к производству комплекса MPA-40, интегрирующего возможности 5-осного фрезерования и 3D-газодинамического напыления сообщила компания Hermle. Применение таких технологий и соответствующих станочных систем также потребует технико-экономического обоснования с учетом приведенных выше особенностей.

Следует подчеркнуть, что создание технологий и оборудования третьего и четвертого классов потребует не только скорейшего развития научных основ технологии машиностроения применительно к новым процессам и методам формообразования, но и опережающую подготовку инженерно-технических кадров, способных решать новые конструкторско-технологические задачи [12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Промышленность, наука и образование – пути развития и ожидаемые результаты** / Общероссийская дискуссия. – М.: Союзмаш России, 2007. – 70 с.
2. **Григорьев С.Н., Смуров И.Ю.** Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // *Инновации*. 2013. №10. – С. 76–82.
3. **Сироткин О.С.** Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. №2. – С. 22–25.
4. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.М.** Аддитивные технологии в машиностроении. – С.-Пб.: Издательство С.-Пб. политехнического университета. 2013. – 222 с.
5. **Научноёмкие технологии машиностроительного производства.** Физико-химические методы и технологии / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Форум. 2013. – 920 с.
6. **Металлообработка: высокотехнологичный режущий инструмент или аддитивные технологии?** // *Фотоника*. 2015. №3. – С. 36–39.
7. **Bourneaud F., Desagulier Ch.** From satellite to launcher, highlights on powder/wire ALM at Astrium Space Transportation/ Proc. 12th Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing / Noordwijk, The Netherlands, 2012 (ESA SP-691, July 2012).
8. **Волосова М.А., Окунькова А.А.** Пути оптимизации процессов селективного лазерного спекания при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. №4. Т. 14. – С. 587–591.
9. **Расчеты экономической эффективности новой**

техники: справочник / под общ. ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение. 1990. – 448 с.

10. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / под ред. А.М. Дальского и др. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

11. **Tumbleston J.R. and others.** Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. **Бойцов А.Г., Моргун Ю.А., Саушкин Б.П.** Состояние и перспективы подготовки инженерных и научных кадров в области наукоемкого машиностроения // *Экономические стратегии*. 2015. № 4. – С. 12 – 19.

REFERENCES

1. Industry, science and education – ways of development and results expected / *All-Russian Discussion*. – М.: Soyuzmash of Russia, 2007. – pp. 70.

2. Grigoriev S.N., Smurov I.Yu. Trends of innovation additive production development in Russia and abroad // *Innovations*. 2013. №10. – pp. 76 – 82.

3. Sirotkin O.S. Current state and outlooks of additive techniques development // *Aircraft Industry*. 2015. №2. – pp. 22–25.

4. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.M. *Additive Techniques in Mechanical Engineering*. – S.-Pb.: Publishing House of S.-Pb. Polytechnic University. 2013. – pp. 222.

5. *High Technologies in Mechanical Engineering. Physical – Chemical Methods and Techniques* / under the editorship of B.P. Saushkin. – М.: Forum. 2013. – pp. 920.

6. Metal processing: high-technology cutters or additive techniques? // *Photonics*. 2015. №3. – pp. 36 – 39.

7. Bourneaud F., Desagulier Ch. From satellite to launcher, highlights on powder/wire ALM at Astrium Space Transportation/ Proc. 12th Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing / Noordwijk, The Netherlands, 2012 (ESA SP-691, July 2012).

8. Volosova M.A., Okunkova A.A. Optimization ways of selective laser agglomeration processes by choice of processing strategy with laser beam // *Proceedings of Samara Scientific Center of RAS*. 2012. №4. Vol. 14. – pp. 587–591.

9. *Computations of New Technics Cost-Effectiveness: Directory* / under the general editorship of K.M. Velikanov. – Л.: Mechanical Engineering. 1990. – pp. 448.

10. *Technologist-Mechanician Directory*. In 2 Vol. Vol.2 / under the editorship of A.M. Dalsky et al. – М.: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 944.

11. Tumbleston J.R. and others. Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. Boitsov A.G., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. State and outlooks of engineering and scientific staff training in the field of high tech mechanical engineering // *Economic Strategies*. 2015. № 4. – pp. 12 – 19.

Рецензент д.т.н. И.И. Артёмов

УДК 681.7.069.24: 621.81-023.5
DOI: 10.12737/20598

В.В. Порошин, д.т.н.
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий»),
А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва),
И.А. Зябрев, аспирант
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий») E-mail: vporoshin@mail.ru

Разработка способа аддитивного технологического процесса газопорошковой лазерной наплавки

Предложен способ лазерного послойного спекания частиц порошка со сканированием лазерного излучения по различным траекториям. Рассмотрено влияние траектории сканирования и скорости обработки на геометрические характеристики наплавленных слоёв.

Ключевые слова: лазер; наплавка; порошок; сканатор; дозатор; слой.

V.V. Poroshin, D.Eng.,
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)
A.V. Bogdanov, Can.Eng.,
(Bauman STU of Moscow, Moscow)
I.A. Zyabrev, Post graduate student
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)

Development of additive technological method for gas-powder laser surfacing process

The methods of additive techniques of layer-by-layer laser agglomeration of powder materials at a direct injection and mechanical powder feed are considered. A method for layer-by-layer surfacing with a scanning laser beam is offered. The paths of scanning on a line, ellipse and a circle are analyzed. Samples are processed and investigations on an influence of a processing velocity and the paths of scanning upon geometrical adjectives of layers obtained are carried out. The investigation results obtained allowed drawing a conclusion of the optimality of a scanning path of a laser beam on an ellipse, on geometrical adjectives and a coefficient of powder use.

Keywords: laser; surfacing; powder; scanator; dispenser; layer.