

ОБЗОР ГИБРИДНОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

© 2022

- А. В. Балякин** старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; a_balik@mail.ru
- М. А. Олейник** аспирант кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; oleynik1997@mail.ru
- Е. П. Злобин** магистрант; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; ep.smr@mail.ru
- Д. Л. Скуратов** доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; skuratov-sdl56@ya.ru

Представлен обзор последних разработок российских и зарубежных учёных в области гибридного аддитивного производства металлических изделий. Рассмотрено понятие и различные виды гибридного производства. Особое внимание в статье уделяется гибридизации аддитивных технологий с различными процессами формообразования: объёмной штамповкой, гибкой, глубокой вытяжкой, обкаткой и другими. Представлена история появления и актуальность технологий, а также возможность их применения в производстве. Совмещение аддитивных технологий и процессов механической обработки деталей производится с двойной целью: расширение области применения аддитивного производства и преодоление его ограничений, связанных с низкой производительностью, металлургическими дефектами, шероховатостью поверхности и отсутствием точности размеров; новое применение традиционных процессов обработки.

Аддитивное производство; гибридное аддитивное производство, упрочнение металлов, механическая обработка, формообразование

Цитирование: Балякин А.В., Олейник М.А., Злобин Е.П., Скуратов Д.Л. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 48-64. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64

Введение

Гибридное производство – это совокупность технологий, которые позволяют дополнить друг друга и устранить их индивидуальные недостатки [1]. Статья посвящена новому типу гибридизации, позволяющему создавать детали путём совмещения аддитивных и субтрактивных технологий, что позволяет расширить область применения аддитивного производства путём устранения его недостатков, связанных с низкой производительностью, металлургическими дефектами, высокой шероховатостью поверхности за счёт комбинации с другими производственными технологиями [2]. И наоборот, гибридизацию на основе аддитивного производства также можно рассматривать как способ обеспечения большей гибкости в традиционных технологиях [3].

Первоначальные разработки в области гибридного аддитивного производства были основаны на использовании нескольких источников энергии и комбинации аддитивных технологий с механической обработкой для повышения производительности и ка-

чества деталей. Объединение аддитивных технологий с механической обработкой изделий изначально было направлено на улучшение структуры слоёв материала за счёт локальной пластической деформации, при этом обеспечивалась более высокая жёсткость и износостойкость. Такой тип гибридизации [4] в последние годы довольно быстро развивается за счёт применения новых концепций, взятых из процессов обработки листового и объёмного металла. В работе представлен обзор основных исследовательских публикаций в области гибридного аддитивного производства, отражающих объединение аддитивных и субтрактивных технологий [5].

Гибридное производство с использованием нескольких источников энергии

Идея гибридного аддитивного производства, основанная на использовании нескольких источников энергии, начала привлекать внимание в середине 2000-х годов и основывалась на разработке новых гибридных сварочных процессов, способных преодолеть ограничения лазерной сварки, такие как повреждения покрытий и образования отверстий в расплавленном материале [7], добавив к лазеру электродугу. Концепция использования нескольких источников энергии была реализована в области аддитивных технологий для повышения стабильности процесса за счёт обеспечения дополнительной энергии. Так в [8] авторами предложено использовать лазер для содействия системам послышной плавки материала с использованием плазменного электрода (PA-DED). Zhang H.O., Qian Y.P. и др. [9] изучили этот процесс и добавили лазер в качестве вспомогательного источника энергии, что позволило получать более плотный и равномерный наплавленный слой, а также лучшие механические свойства, чем у исходных (без использования вспомогательных) систем PA-DED. Zhang Z., Sun C. и др. [10] представили разработку системы GMA-DED с лазерной поддержкой для изготовления тонкостенных алюминиевых образцов и доказали эффективность идеи в контроле высоты и равномерности ширины стенки (рис. 1, а). Российские исследователи сосредоточились на оценке и анализе эффективности этого нового гибридного аддитивного производственного процесса в отношении микроструктуры получаемых заготовок [11] и стратегии осаждения [12]. Wu D., Liu D. и др. [13] использовали вариант GTA-DED со вспомогательным лазерным лучом для создания алюминиевых образцов (рис. 1, б), который показал хорошую микроструктуру и механические свойства, а также меньшую частоту трещин и пор по сравнению с образцами, изготовленными другими аддитивными методами.

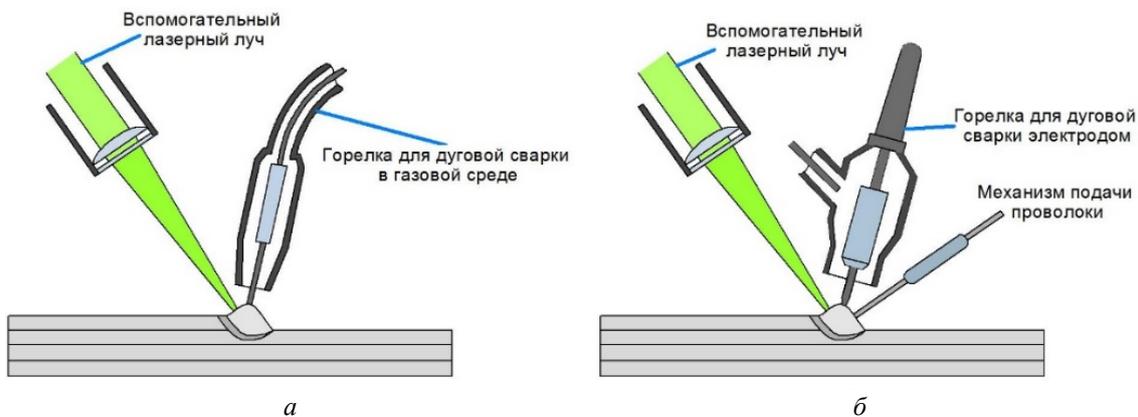


Рис. 1. Схема аддитивной технологии, в которой системы GMA-DED (а) и GTA-DED (б) поддерживаются лазерным источником энергии

Гибридное аддитивное производство, совмещённое с механической обработкой

Гибридное аддитивное производство, совмещённое с процессом удаления материала, можно разделить на две категории: а) использование субтрактивных процессов для достижения требуемой геометрической точности, допусков на размеры и качества поверхности (постобработка); б) последовательное совмещение субтрактивных процессов с аддитивными, позволяющее получать изделия, которые невозможно (или очень сложно и дорого) изготовить в случае раздельного применения этих процессов [3; 14].

Одним из многих примеров является удаление ступенчатого профиля, образованного из слоёв синтезированного материала. Это давно реализовано в гибридных производственных системах с комбинированными возможностями фрезерной/токарной обработки и аддитивных технологий [15]. Она также применяется в случае обработки материалов на основе титана или никеля, поскольку снижение коэффициента использования материала, обеспечиваемое гибридизацией, значительно снижает общую стоимость производства и отходы.

Последовательное совмещение субтрактивных процессов с аддитивными позволяет изготавливать не только простые детали, но и широкий спектр деталей со сложными конструктивными особенностями. На рис. 2 показан случай использования операции фрезерования в качестве постобработки выращенной заготовки, при котором доступ режущего инструмента к внутренней поверхности невозможен. В подобных случаях мехобработка должна выполняться в последовательном сочетании с наращиванием материала [16].

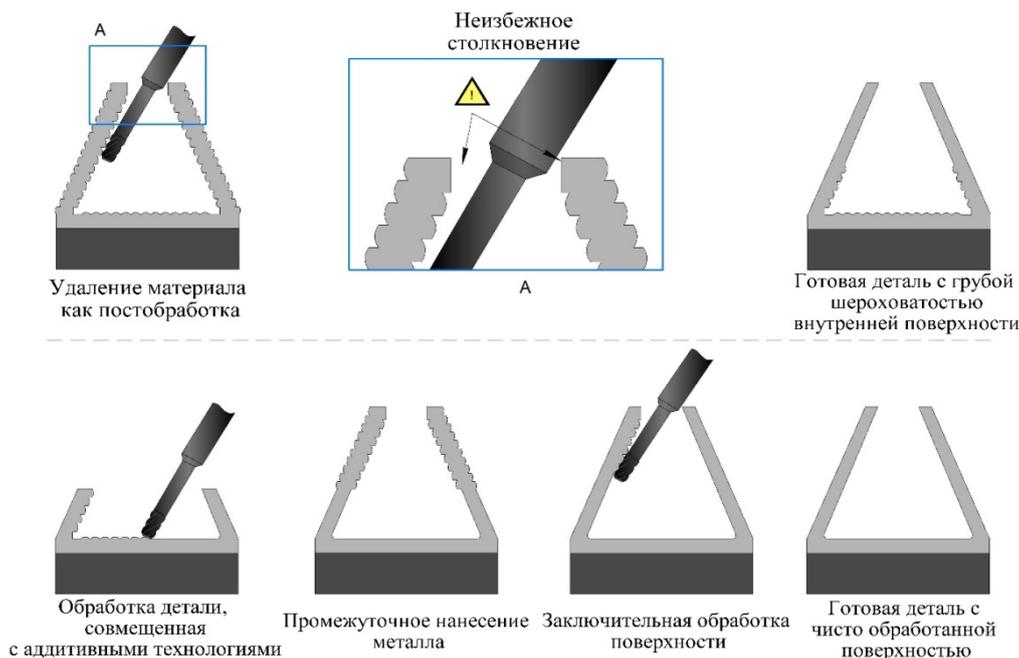


Рис. 2. Совмещение аддитивного производства и удаление материала в процессе изготовления

Объединение аддитивного производства с процессами мехобработки, с точки зрения второй категории, началось в середине 1990-х годов. Fessler J.R. [17] и Klocke F. [18] объединили систему L-DED с фрезерным станком для выполнения операций фрезерования на промежуточных стадиях синтеза металла. Однако исследования в этой области начали появляться только в середине 2000-х годов. Kerschbaumer M., Ernst G. [19] пересмотрели более ранние идеи и сделали новые выводы о формировании

траектории движения инструмента, производительности лазерного источника питания и комплексе мер по оптимизации подачи порошка. Sreenathbabu A. и др. [20] объединил GMA-DED с фрезерным станком с ЧПУ для обработки неравномерных слоёв. Song Y.A., Park S., Choi D., Jee H. [21] объединили две горелки GMA и лазер на фрезерном станке, тем самым получив гибридную многозадачную систему, способную обеспечивать более точное и селективное наплавление металла с помощью автоматизированного средства переключения инструментов. В рамках разработки гибридных многозадачных систем Kovacevic R. и Valant M.E. [22] запатентовали шестиосевую роботизированную установку для изготовления деталей с возможностями плазменного и лазерного сплавления. Эти и другие примеры побудили станкостроительную промышленность к разработке и созданию первых гибридных систем аддитивного производства в начале 2010-х годов. DMG Mori и компания Mazak представили гибридные станки, сочетающие в себе сплавление материала L-DED с полноценным 5-осевым фрезерным станком [23 – 25]. Фактически большинство доступных гибридных станков с аддитивными технологиями в настоящее время основаны на технологии DED из-за её гибкости в применении [26]. Первым гибридным аддитивным станком, основанным на технологии PBF, стал Lumex Avance-25 от Matsuura [27]. Система сочетает в себе сплавление материала методом LPBF с высокоскоростным фрезерованием и привлекает внимание своим потенциалом совершенствования фрезерования внешних контуров, шероховатости поверхности и коррозионных характеристик в штампах и пресс-формах [28]. Компания 3D-Hybrid [29] в настоящее время предлагает возможность объединения головок GMA-DED, L-DED и головок холодного напыления (используемых для нанесения покрытий) в обрабатывающие центры с ЧПУ.

Аддитивное производство, совмещённое с процессами формообразования

В данной работе совмещение аддитивного производства с процессами формообразования сгруппированы в три категории: 1) объединение с процессами улучшения свойств наплавленных металлов; 2) объединение с процессами объёмной штамповки; 3) объединение с процессами формования из листовых материалов.

Объединение с процессами улучшения свойств наплавляемых металлов. В основе этого объединения лежит принцип обработки поверхности. При этом совмещении остаточные напряжения и деформации будут сведены к минимуму путём прокатки наплавленного материала [31]. Этот процесс подвергает поверхность сварных швов пластической деформации, чтобы улучшить чистоту поверхности и вызвать сжимающие напряжения, которые будут противодействовать остаточным напряжениям, возникающим в результате циклов нагрева-охлаждения. Colegrove P.A., Coules H.E. и др. [32] первые применили поверхностную прокатку наплавленных слоёв на основе WAAM процессов (рис. 3). Процедура проводилась после того, как каждый новый слой охлаждался до температуры, близкой к температуре окружающей среды, и результаты продемонстрировали её положительное влияние на уменьшение остаточных напряжений и деформаций, а также на конечную микроструктуру за счёт уменьшения размера зёрен, вызванного динамической рекристаллизацией из-за пластической деформации. Зайцев А.И., Родионова И.Г., Павлов А.А. и др. [33] запатентовали способ получения биметаллических листов наплавлением слоя материала и последующей его прокаткой. В последующем исследовании Colegrove P.A., Donoghue J. и др. [34] выявили положительное влияние прокатки поверхности на механические свойства сплавляемых материалов из-за изменения нежелательной волокнистой микроструктуры на улучшенную равноосную.

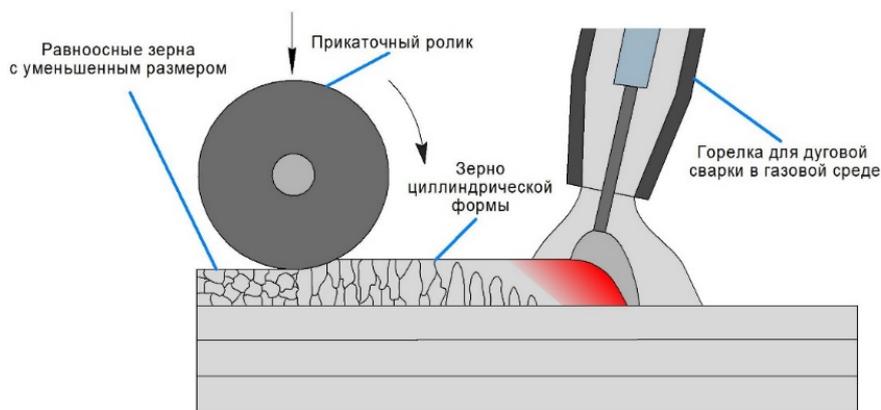


Рис. 3. Схема гибридного процесса WAAM с поверхностной прокаткой

Другим типом объединения является использование дробеструйной обработки и процесса WAAM, которое помогает снять остаточные напряжения и минимизировать деформации [6]. При дробеструйной обработке поверхность каждого нанесённого слоя подвергается воздействию небольших твёрдых шариков, вызывающих пластическую деформацию и сжимающие напряжения, но, в отличие от прокатки поверхности, это не вызывает значительных изменений в общей форме сплавленных слоёв. Bamberg J., Hess T. и др. [35] предложил комбинацию L-DED с дробеструйной обработкой (рис. 4, а) и ультразвуковым или лазерным ударным упрочнением, основанным на использовании высокочастотных колебаний от пьезоэлектрических преобразователей или лазерных импульсов от мощных лазеров (рис. 4, б). Авторы заявили об использовании метода для упрочнения наплавленных участков при изготовлении и ремонте элементов лопаток для авиационных газотурбинных двигателей.

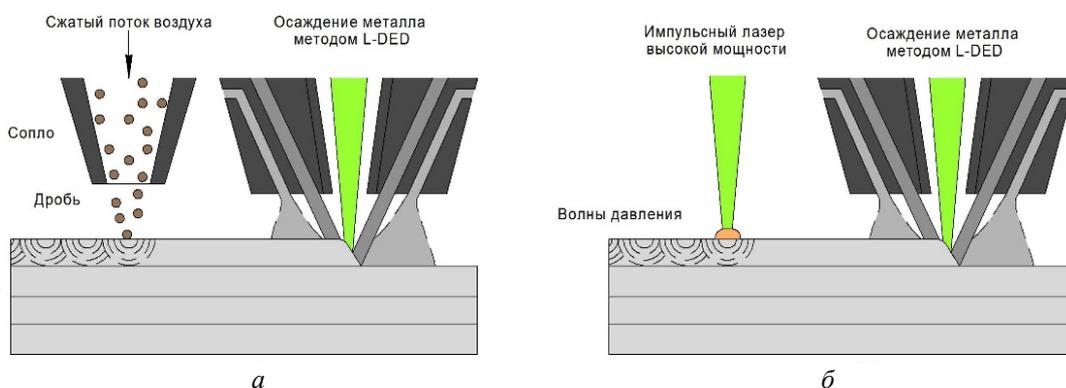


Рис. 4. Схема процесса:
а – с дробеструйной обработкой; б – лазерным ударным упрочнением

Применение гибридных аддитивных технологий с упрочнением значительно увеличилось в качестве средства улучшения свойств синтезированных полуфабрикатов в различных отраслях [36]. Ещё одним преимуществом этого способа является повышение усталостной прочности за счёт сжимающих напряжений, которые замедляют скорость появления усталостных трещин. Uzan N.E. и др. [37] пришли к выводу о положительном влиянии дробеструйной обработки на сопротивление усталости образцов из алюминиевых сплавов, изготовленных методом LPBF. Фрактография образцов с трещинами показала, что у образцов с дробеструйной обработкой место возникновения

усталостной трещины было глубже, чем у образцов, которые не подвергались обработке. Соколов [38] предложил объединить метод L-DED с горячей прокаткой для деталей из титановых сплавов. Полученные результаты подтвердили снижение остаточной пористости и микроструктурных изменений в наплавленном материале, что способствовало повышению предела прочности и относительного удлинения при разрыве образца. Duarte V.R. и др. [39] предложил объединение аддитивных технологий и горячей штамповки с использованием специальной горелки для уменьшения остаточной пористости, улучшения микроструктуры и улучшения механических свойств сплавленного материала. Специальная горелка оснащена молотком, который помещён внутри сопла, приводится в действие вибрационным приводом для локального пластического деформирования сплавленного материала при высокой температуре.

Объединение с процессами объёмной штамповки. Впервые процессы объёмной штамповки в аддитивных технологиях были исследованы в работах [30; 40; 41], в которых исследовали пластичность алюминиевого сплава AA5083, нанесённого методом WAAM, и результаты испытаний подтвердили его превосходную пластичность. Silva S.M.A. и др. [30] провели экспериментальный и численный анализ операции холодной штамповки, выполненной на выращенной заготовке из того же сплава. Анализ показал, что сжимающие напряжения способствуют закрытию пустот (т.е. увеличению относительной плотности) и улучшают свойства сплавленного материала за счёт деформационного упрочнения. Сизова И. и Vambach M. [40] исследовали изменения микроструктуры сплава Ti-6Al-4V при высокотемпературной деформации сжатия, нанесённого методом LPBF. Результаты показали, что микроструктура наплавленного материала может быть улучшена во время термообработки, и позволили авторам сделать вывод, что сложные поковки из титана в будущем могут быть изготовлены на одной стадииковки с использованием оптимизированных по форме заготовок, полученных методом аддитивного производства. Петров П.А. и др. [41] предложили новый способ производства деталей сложной геометрии из высокопрочных кованных алюминиевых сплавов путём сочетания аддитивных технологий и изотермическойковки, что позволило снизить высокие затраты на производство. Parke T. и др. [42] исследовали пластичность нержавеющей стали 316L, полученной методом LPBF с помощью испытаний на сжатие. Сравнение с образцами, получаемыми литьём, показало, что послойная структура синтезированного материала оказала значительное влияние на пластичность материала и показала различия в пластичности синтезированных и литых образцов. Hirtler M. и др. [43] при помощи метода WAAM анализировали возможности изготовления функциональных элементов аддитивными технологиями на заготовках, полученных штамповкой. Результаты продемонстрировали возможность существования данного гибридного технологического маршрута, но было заявлено, что необходимы дальнейшие исследования для улучшения соединения первого слоя и основного материала. В последующей публикации Сизова И. и Vambach M. [44] провели аналогичную работу с титановым сплавом для демонстрации возможности применения вышеупомянутого гибридного способа производства для производства пресс-форм для последующих операций штамповки титановой лопатки. Meiners F. и др. [45] рассмотрели возможность изготовления функциональных элементов с помощью аддитивного производства на заготовках, полученных штамповкой, рассмотрев синтезирование материала методом WAAM и L-DED на штампованный T-образный профиль. Они пришли к выводу, что более высокие скорости метода WAAM выгодны для гибридного производства заготовок из-за уменьшения производственных затрат и времени обработки. Другой тип гибридного аддитивного производства с объёмной штамповкой был предложен Michl D. и др. [46], в котором использовался станок с технологиями WAAM

(GMA-DED) для производства кольцевых пресс-форм из стали ER70S-6 с оптимальным распределением массы для последующей раскатки колец.

Объединение с процессами формования из листовых материалов. Данное совмещение представляет собой комбинацию с гибкой, вытяжкой, обкаткой и листовой штамповкой.

Гибка. Большинство опубликованных работ сосредоточено на синтезировании трёхмерных функциональных элементов на плоских листах. В работах [30; 47] предложены гибридные технологические маршруты, в которых лист изгибается и трёхмерные элементы синтезируются методом WAAM с последующей механической обработкой. В случае, если доступ к области листа ограничен из-за габаритов головки для наплавки и/или режущего инструмента, Li Y. и Rappthadu R. [47] предложили сначала согнуть лист в промежуточную форму, при которой элементы могут быть легко нанесены, а затем согнуть в окончательную форму. Они пришли к выводу, что такой подход может обеспечить дополнительные возможности для гибки и лучшей доступности для аддитивного производства (рис. 5).

Butzhammer L. и др. [48] исследовали возможность синтезирования элементов на лист из Ti-6Al-V4 с помощью LPBF до или после изгиба листа. Они пришли к выводу, что нанесение элементов перед гибкой приводит к снижению пластичности, а также отметили, что синтезирование элементов после изгиба является сложной задачей из-за неровностей, имеющих на изогнутой поверхности листа. Испытания на прочность при сдвиге между нанесёнными элементами и листами показали, что синтезирование элементов до или после изгиба не влияет на прочность соединения между двумя деталями, которая выше, чем у монолитной обработанной детали одинаковой геометрии.

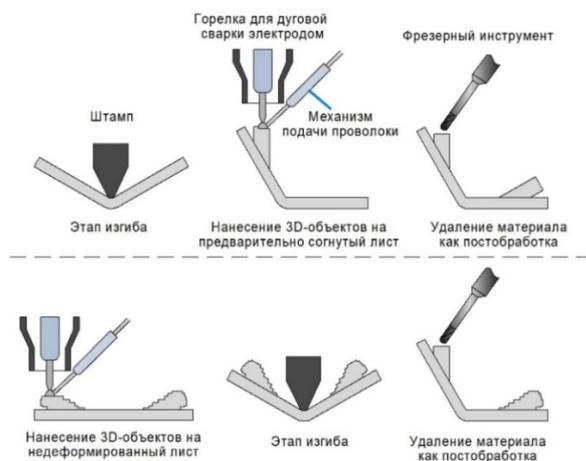


Рис. 5. Схема нанесения элементов с помощью LPBF до и после гибки листа

В работе Парке Т. и др. [49] исследовали влияние напряжённого состояния, возникающего в результате операции изгиба, на прочность соединения между синтезированными элементами и листами. В работе рассмотрены элементы, созданные на сторонах сжатия и растяжения изогнутого листа, и сделан вывод, что прочность соединения ниже в случае синтезирования элементов на сторонах сжатия. Rosenthal S. и др. [50] провели исследование изгиба плоских монолитных листов из сплава Hastelloy X, изготовленных аддитивным способом (LPBF). Результаты позволили сделать вывод о том, что листовые заготовки, полученные аддитивным методом, могут быть успешно использованы в последующих операциях, а численное моделирование может быть выполнено с использованием анизотропного критерия прочности Друкера-Прагера. Они пришли к выводу, что свойства синтезированного материала отличаются от листового, поскольку на него сильно влияет распределение температуры в процессе синтеза.

Глубокая вытяжка. Гибридизация с вытяжкой в основном ориентирована на нанесение элементов на уже вытянутые заготовки, которые в последующем будут вновь подвержены операциям вытяжки. Ahuja V. и др. [51] были одними из первых исследователей, объединивших аддитивное производство с глубокой вытяжкой, и использовали LPBF для синтеза фланцев на поверхность вытянутых титановых заготовок. Они разработали зажимной механизм для крепления вытянутой заготовки внутри системы LPBF и исследовали прочность соединения между синтезированными элементами и вытянутыми заготовками с помощью испытаний на прочность при сдвиге. Полученные низкие значения сопротивления сдвигу объясняются неравномерным распределением порошка и появлением области несплавления, что было подтверждено с помощью сканирующей электронной микроскопии и изменениями локальной теплопроводности, обусловленными геометрией и состоянием поверхностей.

Vambach M.D., Свиридов А. и др. [52] оценили два способа, основанных на сочетании лазерной наплавки методом L-DED и глубокой вытяжки с целью повышения производительности, экономии веса и снижения риска чрезмерного истончения или разрушения: 1) увеличение жёсткости глубоко вытянутых листов за счёт локального усиления с помощью лазерной наплавки вместо использования более толстых заготовок; 2) укрепление участков заготовок критической толщины с помощью лазерной наплавки. Испытания образцов, изготовленных по первому способу, показали увеличение жёсткости на 95% по сравнению с обычными образцами, при этом увеличение веса составило всего 6%. Низкая пластичность при втором способе и возникновение трещин заставили задуматься о возможности использования заготовок с лазерной наплавкой в качестве промежуточного изделия для последующих операций.

Инкрементальная листовая штамповка. Hölker R. и др. [53] были первыми, кто предложил объединить аддитивное производство, инкрементальную штамповку и мехобработку в одном станке. Исследование Pragma J.P.M. и др. [54] по формованию листов из нержавеющей стали 316L, полученных методом WAAM, позволило сделать вывод о том, что, несмотря на низкую штампуемость выращенных листов по сравнению с традиционно полученными, они по-прежнему были способны выдерживать большие пластические деформации. Снижение штампуемости было связано с сильным анизотропным поведением, вызванным дендритной микроструктурой выращенного листа.

Обкатка. Авторы работы [55] первыми объединили аддитивные технологии и обкатку. Они использовали наплавление металла методом GMA-DED для изготовления трубчатых заготовок, которые впоследствии подвергались механической обработке и пластической деформации как при прямом, так и при обратном вращении, с целью уменьшения толщины стенки и получения более длинной трубы (рис. 6). Проведённые испытания позволили сделать вывод о том, что выращенные заготовки могут успешно использоваться для изготовления труб с механическими свойствами, аналогичными или даже лучшими, чем у деталей, изготовленных из штампованных заготовок.

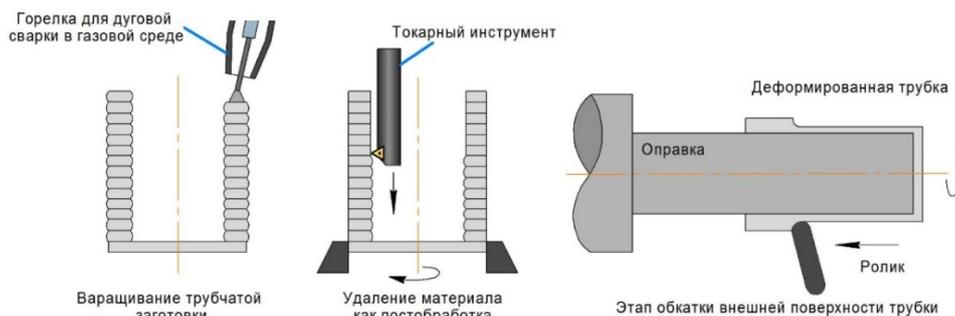


Рис. 6. Схема объединения аддитивного производства с внешней обкаткой

Заключение

Данный обзор предназначен для ознакомления читателей с принципами гибридных аддитивных технологий, которые были разработаны в последнее десятилетие в России и за рубежом. Показан путь к появлению новых гибридных технологических маршрутов, основанных на применении процессов мехобработки на синтезированных моделях, и применении аддитивного производства на заготовках, обработанных традиционными методами. Особое внимание уделено гибридизации аддитивного производства с процессами формообразования, а также процессам улучшения механических свойств материалов, синтезированных аддитивным способом.

Показано, что гибридизация аддитивного производства выполняет две важные задачи: 1) расширение области применения и преодоление ограничений аддитивного производства, связанных с низкой производительностью, металлургическими дефектами и т.д.; 2) повышение гибкости и стимулирование новых применений с традиционными технологическими процессами.

Обзор выполнен при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.).

Библиографический список

1. Зонин Г.Д. Гибридные системы в сферах производства // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 79, ч. 1. С. 122-124. DOI 10.18411/trnio-11-2021-38
2. Разин Д.А. Гибридная технология аддитивного производства как основа развития его будущего // Синергия Наук. 2020. № 54. С. 843-850.
3. Lorenz K.A., Jones J.B., Wimpenny D.I., Jackson M.R. A review of hybrid manufacturing // Solid Freeform Fabrication Conference Proceedings. 2015. V. 53. P. 96-108.
4. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014. V. 63, Iss. 2. P. 561-583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003
5. Киричек А.В., Федонин О.Н., Соловьев Д.Л., Жирков А.А., Хандожко А.В., Смоленцев Е.В. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 8 (81). С. 4-10. DOI: 10.30987/article_5d6cbe42004700.14416796
6. Prinz F.B., Weiss L.E. Method and apparatus for fabrication of three-dimensional metal articles by weld deposition. Patent US, no. 5207371, 1993. (Publ. 04.05.1993)
7. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Чирков А.М. Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 51 с.
8. Zhang H., Qian Y., Wang G., Zheng Q. The characteristics of arc beam shaping in hybrid plasma and laser deposition manufacturing // Science in China, Series E: Technological Sciences. 2006. V. 49, Iss. 2. P. 238-247. DOI: 10.1007/s11431-006-0238-8
9. Zhang H.O., Qian Y.P., Wang G.L. Study of rapid and direct thick coating deposition by hybrid plasma-laser manufacturing // Surface and Coatings Technology. 2006. V. 201, Iss. 3-4. P. 1739-1744. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.049
10. Zhang Z., Sun C., Xu X., Liu L. Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminum alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing //

International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2018. V. 1, Iss. 2. P. 89-95. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.03.005

11. Полищук Г.М., Сысоев В.К., Вятлев П.А., Лопота В.А., Туричин Г.А., Вартапетов С.К. Высокоэффективные лазерные технологии изготовления изделий ракетно-космической техники // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 4. С. 52-60.

12. Земляков Е.В. Теоретические основы гибридной лазерно-дуговой обработки материалов. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 17 с.

13. Wu D., Liu D., Niu F., Miao Q., Zhao K., Tang B., Bi G., Ma G. Al – Cu alloy fabricated by novel laser-tungsten inert gas hybrid additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2020. V. 32. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100954

14. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семёнов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51-61. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05

15. Гибридная технология аддитивного производства совершает революцию в изготовлении высококачественных металлических деталей // САПР и графика. 2018. № 11 (265). С. 75-77.

16. Luo X., Frank M.C. A layer thickness algorithm for additive/subtractive rapid pattern manufacturing // Rapid Prototyping Journal. 2010. V. 16, Iss. 2. P. 100-115. DOI: 10.1108/13552541011025825

17. Fessler J.R., Merz R., Nickel A.H., Prinz F.B. Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing // International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 12-14, 1996, Austin, TX, USA). 1996. P. 117-124.

18. Klocke F., Wirtz H., Meiners W. Direct manufacturing of metal prototypes and prototype tools // International Solid Freeform Fabrication Symposium International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 12-14, 1996, Austin, TX, USA). 1996. P. 141-148.

19. Kerschbaumer M., Ernst G. Hybrid manufacturing process for rapid high performance tooling combining high-speed milling and laser cladding // Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (October, 4-7, 2004, San Francisco, California, USA). 2004. DOI: 10.2351/1.5060234

20. Sreenathbabu A., Karunakaran K.P., Amarnath C. Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing // Rapid Prototyping Journal. 2005. V. 11, Iss. 4. P. 235-248. DOI: 10.1108/13552540510612929

21. Song Y.-A., Park S., Choi D., Jee H. 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. V. 45, Iss. 9. P. 1057-1062. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.021

22. Kovacevic R., Valant M. E. System and method for fabricating or repairing a part. Patent US, no. 7020539, 2006. (Publ. 28.03.2006)

23. Powder Nozzle. LASERTEC DED: Additive Manufacturing by powder nozzle. <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle>

24. Mazak INTEGREGX i-400 AM. <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>

25. Mazak VC-500 AM. <https://www.mazakusa.com/machines/vc-500-am/>

26. Manogharan G., Wysk R., Harrysson O., Aman R. AIMS – A metal additive-hybrid manufacturing system: system architecture and attributes // Procedia Manufacturing. 2015. V. 1. P. 273-286. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.021

27. Matsuura. Официальный сайт. <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-25/>

28. Ahn D.G. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools-state of the art // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011. V. 12, Iss. 5. P. 925-938. DOI: 10.1007/S12541-011-0125-5

29. 3D-Hybrid Solutions предлагает набор 3D-печатающих насадок для обрабатывающих центров с ЧПУ. <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-hybrid-solutions-offers-a-suite-of-3dprinting-nozzles-for-machining>

30. Silva C.M.A., Bragança I.M.F., Cabrita A., Quintino L., Martins P.A.F. Formability of a wire arc deposited aluminium alloy // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. V. 39, Iss. 10. P. 4059-4068. DOI: 10.1007/s40430-017-0864-z

31. Трыков Ю.П., Шморгун В.Г., Абраменко С.А. Влияние прокатки на свойства титано-стального композита, полученного сваркой взрывом // *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия*. 2005. № 5. С. 64.

32. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Kashoob T., Filomeno M., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. V. 213, Iss. 10. P. 1782-1791. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012

33. Зайцев А.И., Родионова И.Г., Павлов А.А., Амежнов А.В., Бакланова О.Н., Гришин А.В., Голованов А.В., Заркова Е.И., Костин Д.Л. Способ получения биметаллических листов с износостойким наплавленным слоем: патент РФ № 2501628; опубл. 20.12.2013; бюл. № 35.

34. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components // *Scripta Materialia*. 2017. V. 135. P. 111-118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.031

35. Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W. Verfahren zum herstellen, reparieren oder austauschen eines bauteils mit verfestigen mittels druckbeaufschlagung. German Patent Application WO 2012152259 A1, 2012.

36. Sealy M.P., Madireddy G., Williams R.E., Rao P., Toursangsaraki M. Hybrid processes in additive manufacturing // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018. V. 140, Iss. 6. DOI: 10.1115/1.4038644

37. Uzan N.E., Ramati S., Shneck R., Frage N., Yeheskel O. On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM) // *Additive Manufacturing*. 2018. V. 21. P. 458-464. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.030

38. Sokolov P., Aleshchenko A., Koshmin A., Cheverikin V., Petrovskiy P., Travyanov A., Sova A. Effect of hot rolling on structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy parts produced by direct laser deposition // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 107, Iss. 3-4. P. 1595-1603. DOI: 10.1007/s00170-020-05132-0

39. Duarte V.R., Rodrigues T.A., Schell N., Miranda R.M., Oliveira J.P., Santos T.G. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM) // *Additive Manufacturing*. 2020. V. 35. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101193

40. Sizova I., Bambach M. Hot workability and microstructure evolution of preforms for forgings produced by additive manufacturing // *Procedia Engineering*. 2017. V. 207. P. 1170-1175. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1048

41. Петров П.А., Петров М.А., Фомин В.С., Роберов И.Г. Разработка гибридной технологии производства изделий из алюминиевых сплавов на основе совмещения аддитивной технологии и технологии изотермической штамповки // Сборник материалов VII Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (1-5 октября 2018 г., г. Суздаль). М.: ИМЕТ РАН, 2018. С. 481-483.
42. Papke T., Junker D., Schmidt M., Kolb T., Merklein M. Bulk metal forming of additively manufactured elements // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 190. DOI: 10.1051/mateconf/201819003002
43. Hirtler M., Jedynek A., Sydow B., Sviridov A., Bambach M. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 90. DOI: 10.1051/mateconf/201819002005
44. Bambach M., Sizova I., Sydow B., Hemes S., Meiners F. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing // Journal of Materials Processing Technology. 2020. V. 282. P. 116-689. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116689
45. Meiners F., Ihne J., Jürgens P., Hemes S., Mathes M., Sizova I., Bambach M., Hama-Saleh R., Weisheit A. New hybrid manufacturing routes combining forging and additive manufacturing to efficiently produce high performance components from Ti-6Al-4V // Procedia Manufacturing. 2020. V. 47. P. 261-267. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.215
46. Michl D., Sydow B., Bambach M. Ring rolling of pre-forms made by wire-arc additive manufacturing // Procedia Manufacturing. 2020. V. 47. P. 342-348. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.275
47. Li Y., Rappthadu R. Bending-Additive-Machining hybrid manufacturing of sheet metal structures // ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2017 collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing (June, 4-8, 2017, Los Angeles, USA). DOI: 10.1115/MSEC20173062
48. Butzhammer L., Dubjella P., Huber F. Experimental investigation of a process chain combining sheet metal bending and laser beam melting of Ti-6Al-4V // Proceedings of World of Photonics Congress: Lasers in Manufacturing – LiM (June, 26-29, 2017, Munich, Germany).
49. Papke T., Dubjella P., Butzhammer L., Huber F., Petrunenko O., Klose D., Schmidt M., Merklein M. Influence of a bending operation on the bonding strength for hybrid parts made of Ti-6Al-4V // Procedia CIRP. 2018. V. 74. P. 290-294. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.113
50. Rosenthal S., Hahn M., Tekkaya A.E. Simulation approach for the three-point plastic bending of additively manufactured Hastelloy X sheets // Procedia Manufacturing. 2019. V. 34. P. 475-481. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.201
51. Ahuja B., Schaub A., Karg M., Schmidt R., Merklein M., Schmidt M. High power laser beam melting of Ti-6Al-4V on formed sheet metal to achieve hybrid structures // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9353. DOI: 10.1117/12.2082919
52. Bambach M.D., Bambach M., Sviridov A., Weiss S. New process chains involving additive manufacturing and metal forming – a chance for saving energy? // Procedia Engineering. 2017. V. 207. P. 1176-1181. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1049
53. Hölker R., Jäger A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E. Process and apparatus for the combined manufacturing of workpieces by incremental sheet metal forming and manufacturing methods in one set-up. German Patent DE 10 201414202.7, 2014.

54. Pragna J.P.M., Cristino V.A.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A., Martins P.A.F. Integration of forming operations on hybrid additive manufacturing systems based on fusion welding // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. 2020. V. 7, Iss. 3. P. 595-607. DOI: 10.1007/s40684-019-00152-y

55. Shirizly A., Dolev O. From wire to seamless flow-formed tube: leveraging the combination of wire arc additive manufacturing and metal forming // *JOM*. 2019. V. 71, Iss. 2. P. 709-717. DOI: 10.1007/s11837-018-3200-x

A REVIEW OF HYBRID ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL PARTS

© 2022

- A. V. Balyakin** Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; a_balik@mail.ru
- M. A. Oleynik** Postgraduate Student of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; oleynik1997@mail.ru
- E. P. Zlobin** Graduate Student of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; ep.smr@mail.ru
- D. L. Skuratov** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; skuratov-sdl56@ya.ru

This article provides an overview of the latest developments in the field of hybrid additive manufacturing of metal parts. The concept and various kinds of additive manufacturing are discussed. Special attention is paid to hybridization of additive technologies and various processes of forming: die forging, deep drawing, and others. The background and significance of the technologies, as well as their applicability in production are presented. The combination of additive manufacturing with forming processes is carried out with a dual purpose: to expand the area of application of additive manufacturing and overcome its limitations associated with low productivity, metallurgical defects, surface roughness and lack of dimensional accuracy; new application of traditional forming processes.

Additive manufacturing; hybrid additive manufacturing; metal hardening; machining; forming

Citation: Balyakin A.V., Oleynik M.A., Zlobin E.P., Skuratov D.L. A review of hybrid additive manufacturing of metal parts. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 48-64. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64

References

1. Zonin G.D. Hybrid systems in areas of production. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2021. No. 79, part 1. P. 122-124. (In Russ.). DOI: 10.18411/trnio-11-2021-38
2. Razin D.A. Hybrid technology of additive production as a basis for the development of its future. *Sinergiya Nauk*. 2020. No. 54. P. 843-850. (In Russ.)
3. Lorenz K.A., Jones J.B., Wimpenny D.I., Jackson M.R. A review of hybrid manufacturing. *Solid Freeform Fabrication Conference Proceedings*. 2015. V. 53. P. 96-108.
4. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014. V. 63, Iss. 2. P. 561-583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003

5. Kirichek A., Fedonin O., Solov'ev D., Zhirkov A., Khandozhko A., Smolentsev E. Additive-subtractive technologies - effective transition to innovation production. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019. № 8 (81). P. 4-10. (In Russ.). DOI: 10.30987/article_5d6cbe42004700.14416796
6. Prinz F.B., Weiss L.E. Method and apparatus for fabrication of three-dimensional metal articles by weld deposition. Patent US, no. 5207371, 1993. (Publ. 04.05.1993)
7. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Chirkov A.M. *Gibridnye tekhnologii lazernoy svarki: ucheb. posobie* [Hybrid technologies of laser welding: tutorial]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2004. 51 p.
8. Zhang H., Qian Y., Wang G., Zheng Q. The characteristics of arc beam shaping in hybrid plasma and laser deposition manufacturing. *Science in China, Series E: Technological Sciences*. 2006. V. 49, Iss. 2. P. 238-247. DOI: 10.1007/s11431-006-0238-8
9. Zhang H.O., Qian Y.P., Wang G.L. Study of rapid and direct thick coating deposition by hybrid plasma-laser manufacturing. *Surface and Coatings Technology*. 2006. V. 201, Iss. 3-4. P. 1739-1744. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.049
10. Zhang Z., Sun C., Xu X., Liu L. Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminum alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2018. V. 1, Iss. 2. P. 89-95. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.03.005
11. Polishchuk G.M., Sysoev V.K., Vyatlev P.A., Lopota V.A., Turichin G.A., Vartopetov S.K. High-performance laser technologies for space equipment manufacturing. *Aerospace Instrument-Making*. 2008. No. 4. P. 52-60. (In Russ.)
12. Zemlyakov E.V. *Teoreticheskie osnovy gibridnoy lazerno-dugovoy obrabotki materialov. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* [Theoretical basics of hybrid arc augmented laser welding]. SPb., 2012. 17 p.
13. Wu D., Liu D., Niu F., Miao Q., Zhao K., Tang B., Bi G., Ma G. Al – Cu alloy fabricated by novel laser-tungsten inert gas hybrid additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2020. V. 32. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100954
14. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V.V. Topology optimization methods in aerospace industry. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017. No. 51. P. 51-61. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05
15. Hybrid technology of additive manufacturing makes a revolution in the production of high-quality metal parts. *SAPR i Grafika*. 2018. No. 11 (265). P. 75-77. (In Russ.)
16. Luo X., Frank M.C. A layer thickness algorithm for additive/subtractive rapid pattern manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2010. V. 16, Iss. 2. P. 100-115. DOI: 10.1108/13552541011025825
17. Fessler J.R., Merz R., Nickel A.H., Prinz F.B. Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 12-14, 1996, Austin, TX, USA)*. 1996. P. 117-124.
18. Klocke F., Wirtz H., Meiners W. Direct manufacturing of metal prototypes and prototype tools. *International Solid Freeform Fabrication Symposium International Solid Freeform Fabrication Symposium (August, 12-14, 1996, Austin, TX, USA)*. 1996. P. 141-148.
19. Kerschbaumer M., Ernst G. Hybrid manufacturing process for rapid high performance tooling combining high-speed milling and laser cladding. *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (October, 4-7, 2004, San Francisco, California, USA)*. 2004. DOI: 10.2351/1.5060234
20. Sreenathbabu A., Karunakaran K.P., Amarnath C. Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2005. V. 11, Iss. 4. P. 235-248. DOI: 10.1108/13552540510612929

21. Song Y.-A., Park S., Choi D., Jee H. 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. V. 45, Iss. 9. P. 1057-1062. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.021

22. Kovacevic R., Valant M. E. System and method for fabricating or repairing a part. Patent US, no. 7020539, 2006. (Publ. 28.03.2006).

23. Powder Nozzle. LASERTEC DED: Additive Manufacturing by powder nozzle. Available at: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle>

24. Mazak INTEGREGX i-400 AM. Available at: <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>

25. Mazak VC-500 AM HYBRID. Available at: <https://www.mazakusa.com/machines/vc-500-am/>

26. Manogharan G., Wysk R., Harrysson O., Aman R. AIMS – A metal additive-hybrid manufacturing system: system architecture and attributes. *Procedia Manufacturing*. 2015. V. 1. P. 273-286. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.021

27. Matsuura. Corporate Site. Available at: <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-25/>

28. Ahn D.G. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools-state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011. V. 12, Iss. 5. P. 925-938. DOI: 10.1007/S12541-011-0125-5

29. *3D-Hybrid Solutions predlagaet nabor 3D-pechatayushchikh nasadok dlya obrabatyvayushchikh tsentrov s ChPU* [3DHybrid solutions offers a set of 3D print pieces for CNC production centers]. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-hybrid-solutions-offers-a-suite-of-3dprinting-nozzles-for-machining>

30. Silva C.M.A., Bragança I.M.F., Cabrita A., Quintino L., Martins P.A.F. Formability of a wire arc deposited aluminium alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. V. 39, Iss. 10. P. 4059-4068. DOI: 10.1007/s40430-017-0864-z

31. Trykov Y.P., Shmorgun V.G., Abramenko S.A. Influence of rolling on the properties of titanium - steel composite obtained by explosive welding. *Steel in Translation*. 2005. V. 35, Iss. 5. P. 61-62.

32. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Kashoob T., Filomeno M., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. V. 213, Iss. 10. P. 1782-1791. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012

33. Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Pavlov A.A., Amezhnov A.V., Baklanova O.N., Grishin A.V., Golovanov A.V., Zarkova E.I., Kostin D.L. *Sposob polucheniya bimetallicheskich listov s iznosostoykim naplavlennym sloem* [Production of bimetallic ingots with wear proof deposited layer]. Patent RF, no. 2501628, 2013. (Publ. 20.12.2013, bull. no. 35)

34. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*. 2017. V. 135. P. 111-118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.031

35. Bamberg J., Hess T., Hessert R., Satzger W. Verfahren zum herstellen, reparieren oder austauschen eines bauteils mit verfestigen mittels druckbeaufschlagung. German Patent Application WO 2012152259 A1, 2012.

36. Sealy M.P., Madireddy G., Williams R.E., Rao P., Toursangsaraki M. Hybrid processes in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018. V. 140, Iss. 6. DOI: 10.1115/1.4038644
37. Uzan N.E., Ramati S., Shneck R., Frage N., Yeheskel O. On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM). *Additive Manufacturing*. 2018. V. 21. P. 458-464. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.030
38. Sokolov P., Aleshchenko A., Koshmin A., Cheverikin V., Petrovskiy P., Travyanov A., Sova A. Effect of hot rolling on structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy parts produced by direct laser deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 107, Iss. 3-4. P. 1595-1603. DOI: 10.1007/s00170-020-05132-0
39. Duarte V.R., Rodrigues T.A., Schell N., Miranda R.M., Oliveira J.P., Santos T.G. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Additive Manufacturing*. 2020. V. 35. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101193
40. Sizova I., Bambach M. Hot workability and microstructure evolution of preforms for forgings produced by additive manufacturing. *Procedia Engineering*. 2017. V. 207. P. 1170-1175. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1048
41. Petrov P.A., Petrov M.A., Fomin V.S., Roberov I.G. Razrabotka gibridnoy tekhnologii proizvodstva izdeliy iz alyuminievykh splavov na osnove sovmeshcheniya additivnoy tekhnologii i tekhnologii izotermicheskoy shtampovki. *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi «Funktional'nye Nanomaterialy i Vysokochistye Veshchestva» (October, 1-5, 2018, Suzdal)*. Moscow: IMET RAN Publ., 2018. P. 481-483. (In Russ.)
42. Papke T., Junker D., Schmidt M., Kolb T., Merklein M. Bulk metal forming of additively manufactured elements. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 190. DOI: 10.1051/mateconf/201819003002
43. Hirtler M., Jedynek A., Sydow B., Sviridov A., Bambach M. Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 90. DOI: 10.1051/mateconf/201819002005
44. Bambach M., Sizova I., Sydow B., Hemes S., Meiners F. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. V. 282. P. 116-689. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116689
45. Meiners F., Ihne J., Jürgens P., Hemes S., Mathes M., Sizova I., Bambach M., Hama-Saleh R., Weisheit A. New hybrid manufacturing routes combining forging and additive manufacturing to efficiently produce high performance components from Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 47. P. 261-267. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.215
46. Michl D., Sydow B., Bambach M. Ring rolling of pre-forms made by wire-arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 47. P. 342-348. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.275
47. Li Y., Raphthadu R. Bending-Additive-Machining hybrid manufacturing of sheet metal structures. *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2017 collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing (June, 4-8, 2017, Los Angeles, USA)*. DOI: 10.1115/MSEC20173062
48. Butzhammer L., Dubjella P., Huber F. Experimental investigation of a process chain combining sheet metal bending and laser beam melting of Ti-6Al-4V. *Proceedings of World*

of Photonics Congress: Lasers in Manufacturing – LiM (June, 26-29, 2017, Munich, Germany).

49. Papke T., Dubjella P., Butzhammer L., Huber F., Petrunenko O., Klose D., Schmidt M., Merklein M. Influence of a bending operation on the bonding strength for hybrid parts made of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*. 2018. V. 74. P. 290-294. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.113

50. Rosenthal S., Hahn M., Tekkaya A.E. Simulation approach for the three-point plastic bending of additively manufactured Hastelloy X sheets. *Procedia Manufacturing*. 2019. V. 34. P. 475-481. DOI:10.1016/j.promfg.2019.06.201

51. Ahuja B., Schaub A., Karg M., Schmidt R., Merklein M., Schmidt M. High power laser beam melting of Ti-6Al-4V on formed sheet metal to achieve hybrid structures. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2015. V. 9353. DOI: 10.1117/12.2082919

52. Bambach M.D., Bambach M., Sviridov A., Weiss S. New process chains involving additive manufacturing and metal forming – a chance for saving energy? *Procedia Engineering*. 2017. V. 207. P. 1176-1181. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1049

53. Hölker R., Jäger A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E. Process and apparatus for the combined manufacturing of workpieces by incremental sheet metal forming and manufacturing methods in one set-up. German Patent DE 10 201414202.7, 2014.

54. Pragana J.P.M., Cristino V.A.M., Bragança I.M.F., Silva C.M.A., Martins P.A.F. Integration of forming operations on hybrid additive manufacturing systems based on fusion welding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. 2020. V. 7, Iss. 3. P. 595-607. DOI: 10.1007/s40684-019-00152-y

55. Shirizly A., Dolev O. From wire to seamless flow-formed tube: leveraging the combination of wire arc additive manufacturing and metal forming. *JOM*. 2019. V. 71, Iss. 2. P. 709-717. DOI: 10.1007/s11837-018-3200-x