

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202090123** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2020.06.02

(22) Дата подачи заявки
2018.06.29

(51) Int. Cl. **B22F 3/105** (2006.01)
B33Y 10/00 (2015.01)
B33Y 30/00 (2015.01)
B33Y 50/02 (2015.01)
B23K 26/342 (2014.01)
B22F 3/10 (2006.01)

(54) ОПТИМИЗАЦИЯ ОТВЕРДЕВАНИЯ И ОБЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ IN SITU ОБДУВАЮЩЕЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

(31) **62/527,656; 16/019,460**

(32) **2017.06.30; 2018.06.26**

(33) **US**

(86) **PCT/EP2018/067608**

(87) **WO 2019/002563 2019.01.03**

(88) **2019.02.21**

(71) Заявитель:
НОРСК ТИТАНИУМ АС (NO)

(72) Изобретатель:
**Матисен Мартин Борлауг, Ларсен
Хильде Лёкен (NO)**

(74) Представитель:
**Хмара М.В., Липатова И.И.,
Новоселова С.В., Пантелеев А.С.,
Осипов К.В. (RU)**

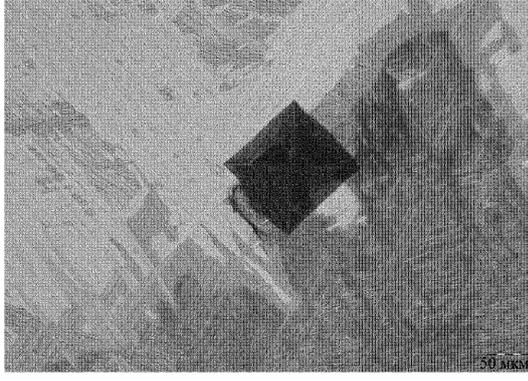
(57) Предложены струйное устройство, а также системы и способы, в которых используется струйное устройство, для изготовления объектов посредством аддитивной технологии, особенно объектов из титана и титановых сплавов. Струйное устройство направляет поток охлаждающего газа поперек лунки расплава или поток охлаждающего газа попадает на лунку расплава, или попадает на затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или попадает на свежезатвердевший материал, или на любое сочетание указанных мест в ходе аддитивного процесса изготовления изделия. Применение охлаждающего газа может привести к тому, что изделие, изготовленное по аддитивной технологии, будет иметь оптимизированную структуру зерен с большой долей зерен, являющихся приблизительно равноосными, а полученные изделия будут демонстрировать увеличенную прочность, сопротивление усталости и долговечность.

A1

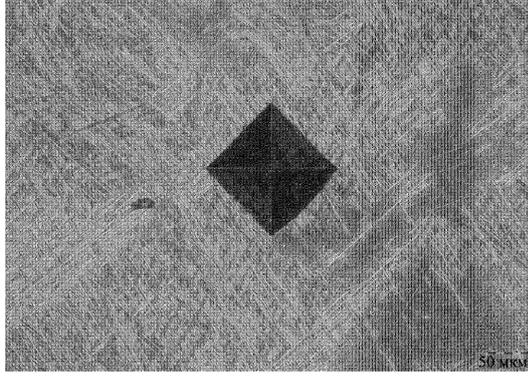
202090123

202090123

A1



A



B

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТВЕРДЕВАНИЯ И ОБЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ *IN SITU* ОБДУВАЮЩЕЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

5

Родственные заявки

Приоритет испрашивается по патентной заявке США № 16/019460, озаглавленной “SOLIDIFICATION REFINEMENT AND GENERAL PHASE TRANSFORMATION CONTROL THROUGH APPLICATION OF *IN SITU* GAS JET IMPINGEMENT IN METAL ADDITIVE MANUFACTURING” («ОПТИМИЗАЦИЯ ОТВЕРДЕВАНИЯ И ОБЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ *IN SITU* ОБДУВАЮЩЕЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ»), поданной 10 26.06.2018, а также предварительной заявке США № 62/527656, озаглавленной 15 “REFINEMENT OF SOLIDIFICATION STRUCTURES IN ADDITIVE MANUFACTURING BY MELT POOL GAS JET IMPINGEMENT” («ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ ОТВЕРДЕВАНИЯ В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОСРЕДСТВОМ ОБДУВА ЛУНКИ РАСПЛАВА ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ»), поданной 30.06.2017.

20

В допустимых случаях содержание каждой из вышеупомянутых заявок целиком включено в настоящее изобретение посредством ссылки.

Область техники, к которой относится изобретение

25 Настоящее изобретение относится к устройствам и способам для изготовления твердых объектов методом свободной формовки, особенно объектов из титана и титановых сплавов.

Уровень техники

30 Структурированные металлические детали из титана или титановых сплавов традиционно изготавливают посредством литья, штамповки или станочной обработки из заготовки. Эти разновидности технологии обладают недостатком, заключающимся в больших потерях дорогого материала – титана, и в большом времени освоения новых изделий. Литье, которое часто может быть 35 использовано для изготовления объектов с формой, потенциально близкой к заданной, обычно отличается пониженным качеством материала из-за отсутствия контроля процесса отвердевания и скоростей охлаждения. Дороговизна оснастки

и невозможность подготовки объектов сложных форм являются дополнительными недостатками традиционных способов.

5 Физические объекты максимальной плотности можно изготавливать по технологии, которая известна, как технология быстрого изготовления опытных образцов, технология послойного синтеза или аддитивная технология. Аддитивная технология дает большую свободу изготовления и потенциальное снижение затрат, благодаря послойному построению изделий с формой, близкой к заданной. При этом желательно обеспечить соответствие свойствам 10 материалов традиционных термомеханических способов обработки, таких как штамповка, и использовать те же самые общепринятые сплавы металлов.

При термомеханической обработке свойства материала в большинстве случаев обеспечиваются в результате улучшения структуры зерна, которое 15 достигается перекристаллизацией, вызываемой пластической деформацией на этапах механической формовки. Данный процесс не доступен при типовой аддитивной технологии, в которой расплавленный металл добавляется слоями, отверждается и охлаждается без какой-либо механической формовки. Это обычно приводит к образованию грубых структур свежезатвердевших зерен. Во 20 многих сплавах результирующие структуры также будут иметь вытянутую форму с большим относительным удлинением. Это вызвано направленным отбором тепла сравнительно более холодной заготовкой, когда происходит добавление перегретого расплавленного металла. Отвердевание начинается от ранее нанесенного слоя (слоев) и распространяется в наплавленный материал по мере его охлаждения. Структуры, в которых идет процесс отвердевания, будут во 25 многих случаях распространяться на несколько слоев размером до нескольких сантиметров. Данные характеристики обычно не являются оптимальными в отношении механических свойств, вызывая пониженную и/или анизотропную прочность, удлинение и усталостные характеристики. При дальнейшем 30 охлаждении после отвердевания происходят аллотропические фазовые превращения (переходы от одной кристаллической структуры к другой), выделение вторичных фаз (англ. precipitation) и другие термохимические реакции в твердом теле. Природа данных явлений зависит от рассматриваемой системы сплава. Особую важность представляет скорость охлаждения в основных 35 диапазонах температур, где происходят указанные превращения. В аддитивной технологии или технологии послойного синтеза складываются сложные условия циклического нагревания, охлаждения и повторного нагревания, при которых для

получения плотного изделия важным является контроль всех значимых фазовых превращений в каждом нанесенном слое. Поэтому, успешное выполнение термического контроля, несмотря на изменение геометрии заготовки, характеристик теплопоглощения и аккумулированного тепла, является сложной задачей аддитивной технологии. Дополнительно к влиянию скорости охлаждения на только что нанесенную и уже затвердевшую область, охлаждение, применяемое после нанесения слоя, также вносит свой вклад в общее охлаждение заготовки, давая возможность начать нанесение новой нити или слоя без значительного времени ожидания. Это особенно полезно для изделий компактной геометрии с меньшим временем цикла между нанесением нитей или слоев. Использование *in situ* обдувающей газовой струи в целевых областях фазового превращения может увеличить скорость охлаждения и привести к оптимизации отвердевания и способствовать общему регулированию и/или контролю фазовых превращений.

15

Прежние технические приемы включают, например, использование гибридной технологии, при которой каждый нанесенный слой подвергают пластической деформации, чтобы достичь структуры перекристаллизации зерен, и которая была применена для уменьшения деформации и улучшения механических свойств (см. патентную заявку США № 2015/0360289, Liou *et al.* (2015)). Однако, такие промежуточные этапы формовки приводят к снижению эффективной скорости наплавления (отрицательно влияют на производительность), и могут ограничивать свободу изготовления в отношении возможности получения сложных форм. Другие способы включают межслойную лазерную рихтовку и ультразвуковую ударную обработку, которая описана в международной патентной заявке WO 2013140147A1 (Wescott *et al.* (2013)), и межслойную холодную прокатку, которая описана в европейской патентной заявке EP2962788A1 (Liou *et al.* (2016)).

30

Применялось принудительное охлаждение свежееотвержденного слоя, во время охлаждения отвердевшего металла при подготовке к лазерной или ультразвуковой ударной обработке для уменьшения термической деформации и оптимизации структур зерен в результате перекристаллизации (см. патентную заявку США 2015/0041025, Wescott *et al.* (2015)). Это помогает сократить время ожидания между слоями, но по-прежнему требует ожидания надлежащей температуры заготовки и последующего кондиционирования свеженаплавленного слоя, что негативно будет сказываться на производительности и потенциально

35

ограничивать свободу изготовления. Ни в одном из существующих способов не упоминается применение какого-либо охлаждения во время наплавления металла, и однозначно не упоминается применение охлаждения лунки расплава или зоны вблизи лунки расплава во время наплавления металла (*in situ*). Вместо этого в заявке *Wescott et al.* описано охлаждение свежееотвержденного слоя нити на заготовке между актами наплавления нитей для подготовки к этапу деформации. Что касается способов, которые физически работают с нанесенным слоем, то важной проблемой будет загрязнение от инструмента, поскольку любые посторонние вещества могут быть заключены между слоями конечного изделия при аддитивной технологии. В указанной заявке не упоминается оптимизация кристаллизующихся структур при аддитивной технологии путем обдува лунки расплава газовой струей.

Другие технические приемы, которые были использованы для повышения качества металлов для оптимизации структуры зерен включают передачу высокочастотной вибрации в тело расплавленного материала, например, путем применения механической вибрации (см. патент США № 3 363 668, *Petit et al.* (1968)), акустической энергии (см. патентную заявку США № 2014/0255620, *Shuck et al.* (2014)) или осциллирующего электромагнитного поля (см. международную заявку WO2015028065 A1, *Jarvis et al.* (2015)). Помимо потенциально непомерно высоких затрат и отсутствия практических способов реализации, эффективность общего принципа активации лунки расплава очень ограничена для множества значимых металлических сплавов. Точнее, это требует зоны частично отвержденного материала в распространяющемся фронте отвердевания, чтобы можно было разорвать указанный фронт на фрагменты. Природа многих сплавов, применимых для аддитивной технологии, таких как многие титановые сплавы, и в частности основной титановый сплав Ti-6Al-4V, характеризуется узким температурным интервалом замерзания, что делает такой сплав очень стойким к фрагментации фронта отвердевания методами, в которых используется механизм вибрации, например, акустическая, электромагнитная или механическая вибрация.

Соответственно в данной области техники существует потребность в экономически целесообразном способе осуществления аддитивной технологии при увеличенной скорости нанесения металла в системе послойного синтеза, который позволяет получать металлические изделия с более мелкозернистой структурой, в частности имеющей более равноосные зерна и более плотную

микроструктуру после дополнительного охлаждения ниже любых подходящих температур фазового превращения по сравнению с тем, что получается при традиционной аддитивной технологии изготовления.

5 Раскрытие изобретения

Соответственно, настоящее изобретение направлено на оптимизацию кристаллических структур при изготовлении изделий посредством аддитивной технологии путем обдува газовой струей лунки расплава, и практически устраняет одну или более проблем, вызванных ограничениями и недостатками соответствующего уровня техники. Функциональное расширение устройства, или отдельное газоструйное устройство может быть использовано для реализации *in situ* температурного контроля свеженаплавленного и отвердевшего материала. В настоящем изобретении предложены устройства, системы и способы для оптимизации структур при отвердевании и управления микроструктурами в ходе изготовления металлических изделий посредством аддитивной технологии, чтобы получать изделия с улучшенным качеством материала, в частности, чтобы получить более равноосную структуру свежеотвержденных зерен. Изготовленные изделия, обладающие такой оптимизированной структурой зерен, демонстрируют повышенную прочность, увеличенное сопротивление усталости и вязкость. Также в данной области техники существует потребность в способе увеличения производительности и выхода металлических изделий, изготавливаемых способами аддитивной технологии.

Преимущество настоящего изобретения заключается в оптимизации структуры зерна в металлических изделиях, изготавливаемых по аддитивной технологии, причем зерно в результирующей структуре имеет параметры соотношения сторон и однородности, сравнимые с такими же параметрами при типовой механической обработке металлов, и при этом значительно уменьшенный средний размер зерна по сравнению с типичными материалами, получаемыми литьем или посредством аддитивной технологии.

Устройства и способы, соответствующие настоящему изобретению, приводят к оптимизации структуры отвердевания и позволяют управлять микроструктурой путем подачи газовой струи на свободную поверхность лунки расплава, или на границу между жидкой фазой и твердой фазой, или на затвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на затвердевший металл, или в любое сочетание указанных мест во время

последующего наплавления металла по аддитивной технологии. Используемый газ может быть инертным или неинертным, одноэлементным или смесью газов в зависимости от того, насколько рассматриваемый металлический сплав чувствителен к атмосферным примесям.

5

Выбор микроструктур и оптимизация свойств материала в различных сечениях наплавления также возможны при использовании устройств и способов по аддитивной технологии, предлагаемых в настоящем изобретении. Эти устройства и способы обеспечивают практический путь для достижения

10 значительной оптимизации структуры металла, давая зерно, которое в большинстве случаев будет несколько грубее, чем при типовой механической обработке металлов, но будет иметь сравнимое соотношение сторон и однородность. Охлаждающие газовые струи, направленные на жидкую поверхность или на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава, могут

15 инициировать и ускорять рост противонаправленного фронта отвердевания у свободной поверхности лунки расплава. Блокирование эпитаксии может быть достигнуто, когда в следующих друг за другом слоях образуются центры кристаллизации, и слои твердеют от зерен верхнего слоя. Принудительное охлаждение посредством сосредоточенного турбулентного газового потока,

20 которое обеспечивают устройства, соответствующие настоящему изобретению, применяемое к затвердевшему материалу, может усиливать, изменять или регулировать фазовые превращения твердого состояния.

Другое преимущество настоящего изобретения состоит в том, что

25 указанные устройства и способы позволяют манипулировать условиями отвердевания, и имеют значительный потенциал оптимизации для многих металлических сплавов, не требуя при этом длительного кондиционирования между слоями, без ограничений на обрабатываемую форму, или значительного сокращения скорости нанесения материала или производительности нанесения.

30 Использование охлаждающего струйного устройства для принудительного охлаждения уже нанесенного материала в ходе аддитивного процесса за счет подачи *in situ* струй охлаждающего газа в намеченные области, взятого отдельно, или в сочетании с охлаждающим струйным устройством, нацеленным на лунку расплава, может существенно увеличить производительность нанесения

35 материала. Большая величина потока охлаждающего газа от струйного устройства, нацеленного на свеженанесенный материал, может обеспечить значительный отвод тепловой энергии, приводя к увеличению скорости

объемного охлаждения нанесенного материала. Охлаждающие струйные устройства, соответствующие настоящему изобретению, могут быть выполнены с возможностью работы с большинством плавящих инструментов, при этом их можно регулировать, включать и выключать в любое время в ходе нанесения материала при осуществлении процесса аддитивной технологии. Такая гибкость обеспечивает возможность модификации расположенной внизу структуры зерна изготавливаемого изделия в ходе технологического процесса. Способы, предлагаемые в изобретении, могут быть использованы в любом процессе изготовления металлических изделий по аддитивной технологии, включая процессы, основанные на плазменно-дуговой сварке проволоки, и на лазерной сварке, и, в частности, они подходят для процессов с высокой скоростью нанесения материала. Хотя в изобретении в качестве примеров везде упоминаются изделия из Ti и сплава Ti, рассматриваемые способы равным образом подходят для многих других систем сплавов, основанных на металлургической теории. Например, жаропрочные сплавы Inconel также предрасположены к получению эффекта оптимизации структуры при использовании устройств, способов и систем, соответствующих настоящему изобретению.

Газовая струя из струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению, направляемая в лунку расплава, например, на свободную поверхность лунки расплава, может увеличивать кристаллографическое разнообразие, при этом может быть уменьшена степень выравнивания границ зерен. Газ, направляемый в виде струи, может привести к тому, что будут присутствовать более однородные и тонко распределенные различные микроструктурные элементы. В типичном случае в металлических изделиях, изготавливаемых по аддитивной технологии, могут присутствовать столбчатые кристаллические структуры длиной несколько сантиметров, пересекающие наплавленные слои. Их могут разрывать более мелкие зерна с нерегулярными интервалами из-за незначительных колебаний температурных градиентов и конвекции в лунке расплава и т.п. Струйное устройство, предложенное в изобретении, будучи нацеленным на лунку расплава, может инициировать или способствовать образованию центров кристаллизации на свободной поверхности лунки расплава, что наряду с уменьшением температурного градиента может приводить к разрыву столбчатых структур, которые традиционно присутствуют в материалах, изготовленных по аддитивной технологии, и позволяет получать улучшенные, воспроизводимые характеристики материала.

Другое преимущество настоящего изобретения заключается в том, что предложенные устройства и способы позволяют изменять скорости охлаждения в ходе аддитивного процесса. В аддитивной технологии множественные элементы, которые как правило называют нитями, бусинами или дорожками, обычно можно прокладывать в виде «строчек» или «пакетов», чтобы строить подчас очень сложные формы. Нити формируются за счет подачи металлического материала, обычно в виде проволоки или порошка, в движущийся источник тепловой энергии, где происходит плавление металлического материала и его сплавление за счет подаваемой от источника тепловой энергии. Источником тепловой энергии может служить лазерный луч высокой энергии, пучок электронов или плазменная дуга, или любое сочетание указанных источников. Такое послойное наплавление может создавать сложные, циклические и переходные термические условия. Циклические – потому что ранее нанесенный материал обычно снова нагревается за счет нанесения последующих слоев, а переходные – по причине изменения граничных условий (например, характеристик отвода тепла) по мере выращивания изделия.

Большинство металлических сплавов чувствительны к своей термической истории. Обычно скорость охлаждения от высоких температур наплавления нити до объемной температуры обрабатываемого изделия оказывает сильное влияние на конечные характеристики материала. Кроме того, эффекты поступления тепла от последовательно укладываемых слоев могут изменять характеристики материала за счет эффектов отпуска и выдерживания в ходе процесса изготовления. Следовательно, критически важным является контроль локальных температурных условий для получения единообразных характеристик материала во всем сложном изделии, изготавливаемом по аддитивной технологии. Настоящее изобретение относится к устройствам, системам и способам, которые повышают способность изменять или контролировать термические условия при осуществлении аддитивной технологии путем измерения температуры в ходе технологического процесса и применения принудительного конвективного охлаждения с использованием предложенных в изобретении струйных устройств.

Дополнительные отличительные признаки и преимущества изобретения будут изложены в последующем описании, и частично будут понятны из описания или будут усвоены в процессе практической реализации изобретения. Задачи и иные преимущества изобретения будут решены и достигнуты за счет структуры,

на какую конкретно указывает описание и формула изобретения вместе с прилагаемыми чертежами.

Для получения указанных и иных преимуществ, в соответствии с
5 изложенными и описанными задачами настоящего изобретения, предложены струйные устройства, включающие в себя первый трубопровод, содержащий впускное отверстие для приема охлаждающего газа, и отверстие, соединенное с соплом для выпуска охлаждающего газа; второй трубопровод, содержащий впускное отверстие для приема охлаждающего газа, и отверстие, соединенное с
10 соплом для выпуска охлаждающего газа; причем первый трубопровод присоединен к плавящему инструменту, образующему источник тепловой энергии, с одной стороны источника тепловой энергии, а второй трубопровод присоединен к плавящему инструменту с противоположной второй стороны источника тепловой энергии; по меньшей мере одно сопло выполнено с
15 возможностью формирования турбулентного потока охлаждающего газа, когда охлаждающий газ выходит из указанного сопла; при этом сопла выполнены и расположены так, чтобы препятствовать нагнетанию охлаждающего газа в сторону источника тепловой энергии.

20 Также предложены струйные устройства, которые включают в себя по меньшей мере один трубопровод, содержащий впускное отверстие для приема охлаждающего газа и одно или более отверстий, каждое из которых соединено с одним соплом или с множеством сопел для выпуска охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный материал. Конструкция струйного устройства может
25 включать в себя несколько трубопроводов, каждый из которых содержит впускное отверстие для приема охлаждающего газа. Трубопроводы могут быть выполнены с возможностью подачи струй охлаждающего газа *in situ* на одну поверхность или на несколько поверхностей свеженаплавленного материала. В качестве примера, одиночный трубопровод может быть выполнен с множеством сопел, причем
30 некоторые сопла могут быть выполнены с возможностью нагнетания охлаждающего газа на одну боковую поверхность свеженаплавленного материала, другие сопла могут быть выполнены с возможностью нагнетания охлаждающего газа на другую боковую поверхность свеженаплавленного материала, а третьи сопла могут быть выполнены с возможностью нагнетания
35 охлаждающего газа на верхнюю поверхность свеженаплавленного материала. Согласно другому примеру, струйное устройство может содержать несколько трубопроводов, причем один трубопровод может содержать сопла, которые

направляют струи охлаждающего газа на одну боковую поверхность свеженаплавленного материала, второй трубопровод может содержать сопла, которые направляют струи охлаждающего газа на другую боковую поверхность свеженаплавленного материала, а третий трубопровод может содержать сопла, которые направляют струи охлаждающего газа на верхнюю поверхность свеженаплавленного материала. Струйное устройство может быть соединено с частью системы в таком месте, какое позволяет нацеливать сопла на поверхность затвердевшего свеженаплавленного материала. В некоторых конструкциях струйное устройство может быть соединено с устройством подачи проволоки или порошка. Струйное устройство может быть соединено с кронштейном или опорой, и может быть независимым от устройства подачи проволоки или порошка.

Соответствующие настоящему изобретению системы могут содержать струйное устройство, которое направляет струи охлаждающего газа на свеженаплавленный материал *in situ*, и по меньшей мере два датчика температуры для контроля температуры в области падения струй охлаждающего газа в ходе аддитивного процесса изготовления изделия. Первый датчик температуры может контролировать температуру на поверхности свеженаплавленного материала перед местом падения струй охлаждающего газа, а второй датчик температуры, расположенный после струйного устройства, может быть включен в состав системы для измерения температуры поверхности обрабатываемого изделия после воздействия охлаждающего газа (от струйного устройства) на нить материала, свеженаплавленного на обрабатываемое изделие. Данные по температуре от первого и второго датчиков температуры могут дать возможность пользователю управлять скоростью охлаждения путем регулирования расхода охлаждающего газа, подаваемого от струйного устройства, или продолжительности воздействия потока охлаждающего газа на обрабатываемое изделие, или управлять обеими указанными величинами.

Согласно изобретению в другом его аспекте, предложена система для выращивания металлического объекта с помощью аддитивной технологии, содержащая: первый плавящий инструмент для предварительного разогрева материала основы до нанесения расплавленного металла; второй плавящий инструмент для плавления исходного металла на капли расплавленного металлического материала, которые наносятся на предварительно разогретый материал основы или в лунку расплава на материале основы; струйное

устройство, предназначенное для направления потока охлаждающего газа поперек лунки расплава или в лунку расплава, или в затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или в любое сочетание указанных мест; источник охлаждающего газа; систему для
5 позиционирования и перемещения материала основы относительно нагревательного устройства и струйного устройства; и управляющую систему, выполненную с возможностью считывания модели конструкции металлического объекта, который необходимо сформировать, и использования модели
10 конструкции для регулирования положения и перемещения системы для позиционирования и перемещения материала основы, и приведения в действие нагревательного устройства и струйного устройства, так чтобы осуществлять выращивание физического объекта путем наплавления последовательных слоев металлического материала на материал основы.

15 Согласно изобретению в еще одном его аспекте, предложен способ для изготовления трехмерного объекта из металлического материала по аддитивной технологии, при которой объект формируют путем сплавления друг с другом
20 слоев металлического материала, наносимых на материал основы, включающий этапы, на которых: используют первый плавящий инструмент для предварительного разогрева по меньшей мере части поверхности материала
основы; используют второй плавящий инструмент для разогрева и плавления
металлического материала, так чтобы данный расплавленный металлический материал наносить на предварительно разогретую область материала основы,
формируя лунку расплава; используют струйное устройство, чтобы направлять
25 охлаждающий газ поперек лунки расплава или в лунку расплава или на затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или на свежезатвердевший материал, или в любое сочетание указанных мест; и перемещают материал основы относительно положения
первого и второго нагревательных устройств по заранее установленной схеме,
30 так чтобы последовательно наносимый расплавленный металлический материал затвердевал, образуя трехмерный объект. Согласно способу, струйное устройство может направлять струи охлаждающего газа в лунку расплава, или
струйное устройство может направлять струи охлаждающего газа в область
затвердевшего наплавленного металла, или одно струйное устройство может
35 направлять струи охлаждающего газа в лунку расплава, а второе струйное устройство может направлять струи охлаждающего газа в область затвердевшего наплавленного металла.

Следует понимать, что как предыдущее общее описание, так и последующее подробное описание представляют собой примеры с пояснениями, и предназначены для дополнительного разъяснения изобретения, в том виде, в
5 каком оно изложено в формуле изобретения.

Краткое описание чертежей

Прилагаемые чертежи, которые включены, чтобы обеспечить большее понимание изобретения, присоединены к описанию и составляют часть данного
10 описания, иллюстрируют варианты осуществления изобретения и вместе с описанием служат цели объяснения принципов изобретения.

На чертежах показано следующее.

15 Фиг. 1 схематически изображает пример струйного устройства, которое направляет газовые струи на свободную поверхность лунки расплава и границу между жидкой и твердой фазами, когда происходит нанесение расплавленного материала с целью формирования нити. На фигуре не показан плавящий инструмент, расположенный выше лунки расплава, а также исходный материал в
20 виде проволоки или порошка, подаваемый к лунке расплава или к плавящей дуге или лазерному лучу.

Фиг. 2 представляет пример конструкции струйного устройства в виде боковой проекции с частичным разрезом.

25

Фиг. 3 схематически изображает поперечное сечение материала, нанесенного в один ряд в виде стенки, когда производилось наплавление слоя на слой. Фигура иллюстрирует типичный неоптимальный рост зерен в первых трех слоях, за которыми следует включение механизма оптимизации – блокирования
30 роста столбчатых зерен за счет подачи газовой струи от струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению.

Фиг. 4А и 4В представляют фотографии дифракции отраженных электронов (ДОЭ (EBSD, англ. electron back scatter diffraction)) для
35 кристаллографии типичного материала, созданного традиционными процессами аддитивной технологии (фиг. 4А) в сравнении с материалом, полученным с использованием способа, соответствующего настоящему изобретению, при

котором обдув газовой струей дает материал, обладающий более мелким зерном (фиг. 4B).

Фиг. 5A и 5B представляют микрофотографии, сравнивающие типичную структуру наплавленного образца Ti-6Al-4V (фиг. 5A) с конечной оптимизированной структурой, полученной при обдуве лунки расплава газовой струей от струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению, при многорядном и многослойном нанесении Ti-6Al-4V (фиг. 5B).

Фиг. 6 представляет фотографию, изображающей результат обдува газовой струей половины лунки расплава при однорядном нанесении Ti-6Al-4V с использованием струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению. Прерывистые линии очерчивают типичный размер зерна и форму с каждой стороны полученной стенки.

Фиг. 7 схематически изображает пример струйного устройства (вид сбоку), которое создают струи газа, направленные на область затвердевшего металла, когда расплавленный материал в лунке расплава остывает, формируя нить, для оказать влияние на дополнительные фазовые превращения, происходящие после отвердевания и при дальнейшем охлаждении. Плавящий инструмент, расположенный выше лунки расплава, вырабатывает энергию для плавления металлической проволоки или исходного порошка, так чтобы расплавленный металл каплями падал в лунку расплава. Датчик температуры может быть расположен перед струйным устройством, чтобы измерять температуру свеженаплавленной нити, и датчик температуры может быть расположен после струйного устройства, чтобы измерять температуру затвердевшего металла наплавленной нити во время воздействия газовой струи или после воздействия газовой струи.

Фиг. 8 схематически изображает пример системы (вид сбоку), которая может быть использована совместно со способами, соответствующими настоящему изобретению. В изображенном варианте осуществления один плавящий инструмент используется для получения расплавленного материала, который наносится, чтобы сформировать наплавленную нить, при этом первое струйное устройство направляет струи охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава и границу между жидкой и твердой фазами расплавленного материала, нанесенного с целью формирования наплавленной

нити, а второе струйное устройство направляет струи охлаждающего газа на область затвердевшего металла, когда расплавленный материал остывает, на такую область, в какой могут происходить аллотропические превращения или выделение вторичных фаз.

5

Фиг. 9 схематически изображает пример системы (вид сбоку), которая может быть использована совместно со способами, соответствующими настоящему изобретению, когда используются два плавящих инструмента. В изображенном варианте осуществления один плавящий инструмент используется для предварительного разогрева поверхности основы с целью формирования предварительно разогретой области, а второй плавящий инструмент используется для нагревания и плавления металла для его последующего нанесения на предварительно разогретую область материала основы, чтобы сформировать наплавленную нить, при этом первое струйное устройство направляет струи охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава и границу между жидкой и твердой фазами, когда производится нанесение расплавленного материала с целью формирования наплавленной нити, а второе струйное устройство направляет струи охлаждающего газа на область затвердевшего металла, когда расплавленный материал остывает, на такую область, в какой могут происходить аллотропические превращения или выделение вторичных фаз.

Фиг. 10А и 10В представляют микрофотографии, изображающие связь между отличиями в скорости объемного охлаждения и микроструктурой материала Ti-6Al-4V.

25

Осуществление изобретения

Далее будет подробно рассмотрен вариант осуществления настоящего изобретения, пример которого проиллюстрирован прилагаемыми чертежами.

30

А. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Если не оговорено иное, то все технические и научные термины, использованные в настоящем описании, имеют то же значение, какое повсеместно должно быть понятным для специалистов в той области, к какой относится изобретение. Все патенты, патентные заявки, опубликованные заявки, а также публикации, вебсайты и другие опубликованные материалы, на которые повсеместно в описании сделаны ссылки, если не отмечено иное, целиком

35

включены в изобретение посредством ссылок. В случае, если существует несколько определений для терминов, применяемых в описании, приоритет имеют те, которые используются в настоящем разделе.

5 Использованные в данном описании существительные, указанные в единственном числе, включают в себя и множественное число, если контекст явным образом не указывает на иное.

10 В данном тексте при описании определенный диапазон и количество могут сопровождаться наречием «приблизительно». При этом термин «приблизительно» включает в себя и самое точное значение. Поэтому «приблизительно 5%» означает «около 5%» и также «5%». «Приблизительно» также означает «в пределах типичной ошибки эксперимента» для предполагаемого случая применения или назначения.

15

 В том смысле, в каком они использованы в настоящем описании, термины «дополнительный; необязательный» или «дополнительно; необязательно», означает, что событие или обстоятельство, которое будет далее описано, имеет место или не имеет места, и что описание включает в себя случаи, когда событие
20 или обстоятельство имеет место или не имеет места. Например, «дополнительный; необязательный» компонент в системе может в этой системе присутствовать или отсутствовать.

 В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин
25 «сочетание; комбинация» относится к любому объединению двух или более элементов. Такое объединение может быть в пространстве или может относиться к использованию двух или более элементов с общей целью.

 Используемый в данном описании, термин «аддитивная технология» также
30 известен как «технология послойного синтеза» и относится к осуществлению процесса послойного (слой за слоем) изготовления объекта по данным 3D-модели, к источнику металла, такому как проволока или порошок, и источнику энергии (такому как плазменная дуга, луч лазера или пучок электронов) для плавления указанного металла.

35

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «система послойного синтеза» относится к машине, используемой для осуществления аддитивной технологии.

5 Термин «плазмотрон» (англ. PTA torch, Plasma Transferred Arc Torch) в настоящем описании использован взаимозаменяемо и относится к любому устройству, которое обладает способностью нагревать и возбуждать поток инертного газа до состояния плазмы за счет электрического дугового разряда, и
10 затем передавать поток плазмообразующего газа, включая электрическую дугу, наружу через отверстие (такое, как сопло), чтобы сформировать сжатую струю, которая выходит из отверстия и переносит интенсивное тепло дуги в ограниченную целевую область.

Термин «металлический материал» в том смысле, в каком он используется
15 в настоящем описании, относится к любому известному или возможному металлу, или металлическому сплаву, который может быть использован в процессе изготовления твердого тела свободной формовкой с целью изготовления трехмерного объекта. Примерами подходящих материалов помимо других возможных являются титан и титановые сплавы, такие как Ti-6Al-4V.

20

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «горелка плазменно-дуговой сварки, горелка ПДС» (англ. PAW torch, Plasma Arc Welding Torch) относится к сварочной горелке, которую можно использовать для плазменно-дуговой сварки. Данная горелка рассчитана так, что газ может быть
25 нагрет до высокой температуры, чтобы образовалась плазма и газ стал электропроводящим; указанная плазма затем переносит электрическую дугу на обрабатываемое изделие, при этом интенсивное тепло от дуги может плавить металл и/или сплавлять два куска металла вместе. Горелка ПДС может содержать сопло для сжатия дуги и тем самым увеличения плотности энергии
30 дуги. Плазмообразующим газом в типичном случае служит аргон. Плазмообразующий газ можно подавать вдоль электрода, при этом вблизи катода может происходить ионизация газа и увеличение его скорости. Такую дугу можно направлять на обрабатываемое изделие, и она будет более стабильной, чем свободно горящая дуга (такая как у горелки для сварки вольфрамовым
35 электродом (горелки TIG)). У горелки ПДС также обычно имеется внешнее сопло для подачи защитного газа. Защитным газом может служить аргон, гелий или их смесь, при этом защитный газ помогает минимизировать окисление

расплавленного металла. Величина тока в горелке ПДС в типичном случае доходит до 400 А, а напряжение обычно находится в интервале приблизительно 25-35 В (но может доходить и приблизительно до 14 кВ). К категории горелок ПДС относится горелка с дугой, перенесенной плазмой (плазмотрон).

5

Термин «материал основы» в том смысле, в каком он используется в настоящем описании, относится к целевому материалу, который подлежит нагреванию от плавящего инструмента, и на котором может быть сформирована лунка расплава. Плавящим инструментом может быть горелка ПДС, плазмотрон, лазерное устройство или их комбинация. Нанесение первого слоя металлического материала будет производиться на несущую подложку. Когда на несущую подложку будут наплавлены один или более слоев металлического материала, материалом основы будет служить верхний слой наплавленного металлического материала, чтобы на него наплавливать новый слой

10

15

металлического материала.

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «изделие» относится к металлическому телу, получаемому с использованием технологии свободной формовки.

20

Термин «модель в системе автоматизированного проектирования» (CAD-модель, англ. Computer Aided Design Model) в том смысле, в каком он взаимозаменяемо используется в настоящем описании, относится к любому известному или возможному трехмерному представлению подлежащего изготовлению объекта, которое может быть использовано в системе управления комплекса в соответствии с изобретением в его втором аспекте: регулированием положения и перемещением несущей подложки и приведением в действие сварочной горелки с встроенным механизмом подачи проволоки, так чтобы построение физического объекта происходило путем последовательного наплавления слоев металлического материала на несущую подложку или материал основы по такой схеме, которая приводит к формированию физического объекта в соответствии с виртуальной трехмерной моделью объекта. Этого можно добиться, например, создавая виртуальную векторизованную послойную модель трехмерного объекта, вначале путем разбиения виртуальной трехмерной модели на множество виртуальных параллельных горизонтальных слоев, а затем путем разбиения каждого из параллельных слоев на множество виртуальных квазиодномерных элементов. Затем физический объект может быть

25

30

35

сформирован путем приведения в действие системы управления для нанесения и наплавления рядов квазиодномерных элементов подаваемого металлического материала на несущую подложку согласно схеме, соответствующей первому слою виртуальной векторизованной послойной модели объекта.

5

Затем указанную очередность повторяют для второго слоя объекта, нанося и наплавления ряды квазиодномерных элементов свариваемого материала на ранее нанесенный слой согласно схеме, соответствующей второму слою виртуальной векторизованной послойной модели объекта. Наплавление
10 продолжают, повторяя операции нанесения и наплавления слой за слоем для каждого очередного слоя виртуальной векторизованной послойной модели объекта, пока не будет сформирован весь объект. При этом, изобретение не привязано ни к какой конкретной модели CAD и/или компьютерной программе для приведения в действие системы управления комплекса в соответствии с
15 изобретением, и также изобретение не привязано ни к какому конкретному типу системы управления. Может быть использована любая известная или возможная система управления (модель CAD, компьютерная программа, компьютерные аппаратные средства с исполнительными органами и т.п.), способная изготавливать металлические трехмерные объекты способом свободной
20 формовки при условии, что система управления настроена так, чтобы приводить в действие один или более плавящих инструментов, таких как горелка ПДС, плазмотрон, лазерное устройство или их комбинация. Предусмотренное в настоящем изобретении струйное устройство может быть использовано с указанными плавящими инструментами для достижения оптимальной структуры
25 зерна.

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «жаростойкий материал» относится к материалу, который не предрасположен к деформации и демонстрирует малое тепловое расширение, когда подвергается
30 действию температур выше 400°C.

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «струйное устройство» относится к готовому изделию, которое содержит одно или множество сопел (форсунок), которые направляют потоки или струи охлаждающего газа на поверхность лунки расплава, или поперек лунки расплава,
35 или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или *in situ* на твердую свеженаплавленную нить,

или на любое сочетание указанных мест с целью непосредственного влияния на отвердевание, оптимизации отвердевания, чтобы блокировать рост зерен для всех нанесенных слоев, общего фазового превращения или любого сочетания указанных задач.

5

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «*in situ*» означает, что подлежащее изготовлению изделие не было перемещено наружу из камеры наплавления, и относится к применению турбулентной газовой струи в ходе процесса послойного синтеза.

10

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «струя» относится к потоку охлаждающего газа, испускаемому соплом.

15

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «сопло» относится к выступающей части с отверстием, которое может регулировать или направлять поток охлаждающего газа.

20

В том смысле, в каком он использован в данном описании, термин «охлаждающий газ» означает газ, направляемый на поверхность лунки расплава, или поперек лунки расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на любое сочетание указанных мест с целью непосредственного влияния на отвердевание расплавленного металла и блокирования роста зерен для всех нанесенных слоев. Температура газа может быть любой температурой, которая охлаждает поверхность, с которой газ взаимодействует. Указанная температура может быть менее 100°C, или менее 50°C, или менее 30°C, или менее 25°C, или менее 10°C, или менее 5°C, или менее 0°C. Может быть также использован газ при криогенной температуре. Установлено, что газ с температурой ниже комнатной температуры не оказывает влияния, которое бы существенно отличалось от влияния, которое достигается при использовании газа, имеющего комнатную температуру.

30

В. СТРУЙНОЕ УСТРОЙСТВО

В изобретении предусмотрено струйное устройство. Струйное устройство выполнено с возможностью направления струй или потоков газа на поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на любое сочетание указанных мест с целью непосредственного влияния на

35

отвердевание расплавленного металла и блокирования роста зерен для всех нанесенных слоев. Струйное устройство, а также системы и способы, который содержат струйное устройство для направления газовых струй на поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на любое сочетание указанных мест, может минимизировать или предотвратить направленное отвердевание, которое формирует структуры с крупными вытянутыми зернами, типичные для стандартной аддитивной технологии металлов. Направленное отвердевание в типовой аддитивной технологии – это результат резких температурных градиентов, связанных с типичным процессом аддитивной технологии.

Изобретение предусматривает наличие струйного устройства или комбинации струйных устройств, и использование струйного устройства или комбинации струйных устройств, причем каждое струйное устройство содержит множество струйных сопел, которые направляют потоки охлаждающего газа на поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл или на любое сочетание указанных мест с целью непосредственного влияния на отвердевание расплавленного металла и блокирования роста зерен во всех нанесенных слоях, или для улучшения способности контроля тепловых условий при аддитивной технологии путем применения принудительного конвективного охлаждения. Струйное устройство содержит два отдельных трубопровода. Трубопроводы могут быть соединены перемычкой, чтобы образовался единый узел. Конфигурация в виде единого узла может быть полезной при размещении струйного устройства относительно плавящего инструмента. Тем не менее, струйное устройство может быть выполнено в виде двух отдельных сегментов. Указанные отдельные сегменты могут быть прикреплены к плавящему инструменту или к устройству подачи металлического материала, такого как проволока или порошок, посредством любого крепления, которое обеспечивает надлежащее положение и угол, так чтобы газовые струи из устройства (или устройств) падали в целевую область, как это рассмотрено в настоящем описании.

Каждый трубопровод, либо отдельно, либо, когда соединен в единый узел, прикреплен одной стороной к части оборудования, содержащей плавящий инструмент, когда струйное устройство должно доставлять охлаждающий газ к

лунке расплава или области вблизи лунки расплава, или одной стороной к устройству подачи металлического материала, когда струйное устройство должно доставлять охлаждающий газ к отвердевшему металлу, находящемуся после лунки расплава. Противоположная сторона каждого трубопровода содержит одно

5 струйное сопло или множество струйных сопел, направленных к обрабатываемому изделию, и в сторону от плавящего инструмента. Каждое струйное сопло соединено с отверстием в трубопроводе, которое обеспечивает сообщение по газовой среде между соплом и трубопроводом, так что охлаждающий газ может подаваться через трубопровод и проходить через

10 отверстие каждого сопла, при этом каждое сопло отдельно может быть направлено в определенное место, такое как поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл за границей жидкой и твердой фаз, например, в зоне аллотропического

15 превращения или области, где могут происходить реакции выделения вторичной фазы, упорядочивая компоненты сплава для формирования частиц вторичной фазы. В некоторых конструкциях сопло может направлять поток охлаждающего газа в два или более мест, выбранных из следующих: поверхность лунки расплава, пересекая лунку расплава, через границу жидкой и твердой фаз, на

20 отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, и на отвердевший металл за границей жидкой и твердой фаз. Каждый трубопровод на одном конце содержит соединитель. Соединитель позволяет соединять трубопровод с источником охлаждающего газа. Противоположный конец трубопровода герметично закрыт. Диаметр трубопровода больше, чем диаметр отверстия, к

25 которому присоединяется каждое сопло. К примеру, диаметр сопла может находиться в диапазоне приблизительно 1-10 мм, в то время как диаметр отверстия, присоединяемого к соплу, может находиться в диапазоне приблизительно 0,5-5 мм. В некоторых конструкциях диаметр сопла и указанного отверстия одинаковы, и могут находиться в диапазоне приблизительно 0,5-5 мм

30 или приблизительно 1-3 мм. Суммарное число сопел ограничивается только тем пространством, где крепится струйное устройство. В некоторых конструкциях число сопел может быть приблизительно от 4 до приблизительно 24. Вместо индивидуальных сопел в качестве выпускного газового аппарата струйного устройства может также быть использован сплошной газовый рассеиватель или

35 решетка, предназначенная для создания направленного турбулентного потока охлаждающего газа.

Каждый трубопровод подает охлаждающий газ к соплу или набору сопел, присоединенных к трубопроводу. Каждый трубопровод может быть разделен или может содержать каналы, или может содержать трубы, трубки или линии, чтобы доставлять отдельные потоки охлаждающего газа к каждому соплу
5 индивидуально. Сопла на каждом трубопроводе могут быть расположены рядами, при этом каждый ряд может содержать одно, два, три или четыре сопла. Сопла могут быть выполнены так, чтобы дать возможность индивидуальной регулировки потока газа, поступающего к каждому соплу, или отдельной регулировки потоков газа в разных наборах сопел.

10

Один трубопровод или оба трубопровода могут содержать один или множество датчиков. Трубопровод может содержать расходомер, который позволяет измерять величину газового потока через трубопровод. В системе может быть использован любой известный в технике расходомер. Расходомер
15 может включать в себя крыльчатое колесо, турбину, магнитный датчик расхода, оптические датчики, электромагнитные датчики скорости, датчик Кориолиса, тепловой датчик расхода, ультразвуковой датчик расхода или расходомер любого другого известного в технике типа. Примеры известных в технике расходомеров раскрыты в патентах США 4 422 338 (Smith, 1983), 4 838 127
20 (Herremans *et al.*, 1989), 5 594 181 (Strange, 1997), 7 707 898 (Oddie, 2010) и 7 730 777 (Anzal *et al.*, 2010). В некоторых конструкциях трубопровод может содержать вырез, углубление или выступ для размещения или крепления расходомера.

25

Трубопровод может содержать датчик температуры, который позволяет измерять температуру трубопровода или охлаждающего газа внутри трубопровода, или обе указанные величины. Может быть использован любой известный в технике датчик температуры. К примерам датчиков температуры относятся термпары, резистивные детекторы температуры, термисторы,
30 инфракрасные термометры, биметаллические устройства, устройства, основанные на расширении жидкостей, и сочетания указанных устройств. В некоторых конструкциях трубопровод может содержать вырез, углубление или выступ для размещения или крепления датчика температуры.

35

Струйное устройство может также содержать один или несколько датчиков температуры для измерения температуры обрабатываемого изделия. В некоторых конструкциях, струйное устройство, рассчитанное на наведение струй

охлаждающего газа на лунку расплава или на зону непосредственно близкую к лунке расплава, может содержать датчик температуры, нацеленный на поверхность обрабатываемого изделия или на лунку расплава или на сочетание указанных мест. Струйное устройство, выполненное с возможностью наведения струй охлаждающего газа на область отвердевшего металла обрабатываемого изделия, например, на зону аллотропического превращения, может содержать первый датчик температуры, нацеленный на поверхность обрабатываемого изделия перед зоной падения струй охлаждающего газа, и второй датчик температуры, нацеленный на поверхность обрабатываемого изделия после зоны падения струй охлаждающего газа для измерения и/или контроля скорости охлаждения по всей области важной в отношении температур. Струйное устройство может содержать датчик температуры, нацеленный на зону, где уже произошло твердение металла, которая следует за отвердеванием лунки расплава. Струйное устройство может содержать датчик температуры, нацеленный на зону, где уже произошло фазовое превращение металла, в которой охлаждение наплавленного отвердевшего металла может инициировать аллотропические превращения или иные термохимические реакции. Могут быть использованы любые известные в технике датчики температуры, в частности бесконтактные датчики температуры. К примерам датчиков температуры относятся инфракрасные термометры и инфракрасные пирометры. В некоторых конструкциях трубопровод может содержать вырезы, углубления или выступы для размещения или крепления датчиков температуры. Трубопровод может быть выполнен из жаропрочного материала или может содержать такой материал. Примерами жаропрочных материалов являются титан и его сплавы, вольфрам и его сплавы, нержавеющая сталь, сплавы, содержащие хром и никель, такие как сплавы «Инконель» и сплавы «Хастеллой», а также сплав, содержащий два или более из следующих элементов: никель, железо, кобальт, медь, молибден, тантал, вольфрам и титан. В некоторых конструкциях трубопровод выполнен из титана или титанового сплава, содержащего титан в сочетании с одним из следующих элементов или комбинацией следующих элементов: Al, V, Sn, Zr, Mo, Nb, Cr, W, Si и Mn. В некоторых конструкциях трубопровод выполнен из сплава Ti-6Al-4V.

Каждый трубопровод на своей нижней стороне может содержать множество струйных сопел, направленных под углом встречно направлению движения обрабатываемого изделия в сторону заднего края лунки расплава, создаваемой плавящим устройством и добавляемым исходным материалом.

Сопла направляют турбулентный потока охлаждающего газа в определенное место, например, на поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл за границей жидкой и твердой фаз. Каждое сопло может быть расположено под любым углом относительно трубопровода, так что угол, образованный между соплом и трубопроводом, составляет 90° или менее, например, менее 80° , или менее 70° , или менее 60° , или менее 50° , или менее 40° , или менее 30° . Предпочтительный диапазон углов составляет от приблизительно 70° до приблизительно 30° от горизонтали. Сопла могут быть выполнены такой конструкции и расположены так, чтобы не давать охлаждающему газу попадать на плавящий инструмент, такой как горелка, что разрушало бы дугу, и могло бы уменьшить способность плавящего инструмента расплавлять расходуемый электрод или металлическую проволоку.

15

Струйное сопло может иметь любую форму. В некоторых конструкциях сопло выполнено трубчатого вида цилиндрической формы. Сопло может иметь прямоугольную, шестиугольную, восьмиугольную, овальную или асимметричную форму. Поперечное сечение сопла может иметь любую форму. Примерами формы отверстия в сечении сопла могут быть круг, овал, овоид, квадрат, прямоугольник, ромб, шестиугольник и восьмиугольник. Нестандартное или асимметричное поперечное сечение может быть выбрано, чтобы возбуждать турбулентное течение газа на выходе из сопла.

25

Толщина стенок сопла должна быть достаточна, чтобы выдерживать давление охлаждающего газа, проходящего через сопло. Толщина стенок также может быть выбрана так, чтобы минимизировать любую тепловую деформацию при температурах, воздействию которых может подвергаться струйное устройство в ходе аддитивного технологического процесса. Например, толщина стенки сопла может находиться в диапазоне приблизительно 0,25-5 мм, или приблизительно 0,5-3 мм.

30

Сопло содержит отверстие, через которое охлаждающий газ вытекает в направлении обрабатываемого изделия. Отверстие газового сопла может иметь любую геометрию или форму. Отверстие в сечении может быть круглым, овальным, квадратным, прямоугольным, ромбовидным, шестиугольным или восьмиугольным. Для создания турбулентной струи газа, вытекающего из сопла,

35

может быть выбрана нестандартная или асимметричная форма сечения отверстия. Отверстие сопла может иметь диаметр приблизительно 0,5-5 мм или приблизительно 1-3 мм. Диаметр отверстия может быть равен внутреннему диаметру сопла или может быть меньше его. Когда диаметр отверстия сопла
5 меньше внутреннего диаметра сопла, скорость газа, выходящего из отверстия, может быть выше скорости газа в трубопроводе. Сопло может содержать несколько отверстий.

Охлаждающий газ поступает в струйное устройство через впускное
10 отверстие в каждом трубопроводе и выходит из струйного устройства через каждое из сопел. Каждое сопло может доставлять охлаждающий газ от источника к набору сопел. Каждый трубопровод может быть разделен или может содержать каналы для доставки отдельного потока охлаждающего газа индивидуально к
15 каждому соплу. Максимальная величина расхода газа, доставляемого к струйному устройству, может составлять приблизительно 500 л/мин, или 400 л/мин, или 300 л/мин или 200 л/мин в зависимости от конструкции и расположения струйного устройства. Например, для струйного устройства, доставляющего струю охлаждающего газа, которая падает на поверхность лунки
20 расплава, величина расхода охлаждающего газа может быть выбрана так, чтобы турбулентный поток газа не деформировал расплавленный металл, накладываемый посредством плавящего инструмента, не деформировал траекторию нанесения металла, и не вызывал разбрызгивания или нестабильность расплавленного металла, накладываемого на нить, и не нарушал
25 стабильность или форму лунки расплава. Диапазон величин расхода охлаждающего газа может составлять приблизительно 1-150 л/мин, а типично приблизительно 5-100 л/мин. Минимальный расход для эффективной оптимизации зерен обычно составляет 10 л/мин в зависимости от обрабатываемого материала и конструкции струйного устройства. В
30 конструкциях, где можно по-отдельности контролировать поток охлаждающего газа в каждом сопле, потоки охлаждающего газа с большей величиной расхода могут быть направлены в область отвердевшего металла по сравнению с потоком, нацеленным на металл лунки расплава. Величина расхода охлаждающего газа, направляемого *in situ* на свеженаплавленный отвердевший материал, может быть значительно выше, чем величина потока газа,
35 направляемого в лунку расплава. В указанных охлаждающих струйных устройствах величина расхода охлаждающего газа, направляемого *in situ* на свеженаплавленный отвердевший материал, может достигать до 500 л/мин. Для

обеспечения отдельного регулирования величин расхода газа из сопел струйных устройств, с каждым охлаждающим струйным устройством может быть соединен отдельный источник газа. Например, первый источник газа подает охлаждающий газ к струйному устройству, нацеленному на лунку расплава или ее окрестность, а второй источник газа соединен со струйным устройством, нацеленным на свеженаплавленный отвердевший материал. Каждый источник газа может содержать регулятор, которым можно управлять вручную или автоматически, например, посредством компьютера, чтобы изменять величину потока охлаждающего газа, подаваемого к струйному устройству, соединенному с трубопроводом, который соединен с регулятором. В конструкциях, в которых струйное устройство содержит несколько отдельных трубопроводов, каждый трубопровод устройства может быть соединен с отдельным регулятором, так чтобы можно было отдельно регулировать величину расхода охлаждающего газа в каждом трубопроводе.

15

Охлаждающий газ можно подавать в виде постоянного потока, исходящего из сопел. Охлаждающий газ можно подавать из сопел периодически или импульсами. Прерывистый или импульсный поток охлаждающего газа может помочь рассеивать тепловую энергию, отводимую из области падения охлаждающего газа на поверхность металла. Прерывистая подача охлаждающего газа может быть получена путем использования переключающих клапанов. Понятие «пульсирующий поток» относится к тому, что величина газового потока изменяется во времени, и не накладывает ограничений на амплитуду, фазу и другие характеристики явления изменения потока во времени. Понятие «пульсирующий поток» обычно включает в себя последовательное, циклическое использование ряда различных изменяющихся во времени величин расхода газа. Пульсация газа имеет место в течение какого-то времени, при этом расход изменяется во времени между высоким уровнем и низким уровнем. Пульсирующий поток газа может быть обеспечен путем использования любого известного в технике способа или устройства (см., например, патенты США 5 954 092 (Kroutil *et al.*, 1999), 6 679 278 (Lemoine *et al.*, 2004) и 9 566 554 (Wu *et al.*, 2017)).

Каждый трубопровод может содержать по меньшей мере одно сопло, так что минимум два сопла направляют охлаждающий газ на поверхность лунки расплава, или пересекая лунку расплава, или через границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на

35

отвердевший металл за границей жидкой и твердой фаз, или на любую комбинацию указанных мест. Суммарное число сопел, присутствующих в струйном устройстве, может быть разным в зависимости от требуемой схемы. В некоторых схемах суммарное число сопел в струйном устройстве составляет от 2 до 24. Каждый трубопровод может содержать идентичное число сопел или другое. Например, каждый трубопровод может содержать 10 сопел, при этом суммарное число сопел в струйном устройстве будет равно 20. Согласно другому примеру, один трубопровод может содержать 8 сопел, а другой трубопровод – 12 сопел, при этом струйное устройство будет в сумме содержать 20 сопел, но его конструкция будет отличаться от первого струйного устройства, у которого каждый трубопровод содержал 10 сопел.

Число сопел, их конфигурация и расположение могут быть выбраны так, чтобы охлаждающий газ, выходящий из сопел, покрывал требуемую длину обрабатываемого изделия. Например, в процессе с высокой скоростью нанесения металла, таком как в системе с горелкой ПДС и наплавляемой проволокой, число сопел и их конфигурация могут быть выбраны так, чтобы в результате доставляемый охлаждающий газ покрывал длину приблизительно 5-50 мм, или приблизительно 10-40 мм, или приблизительно 15-30 мм вдоль направления движения обрабатываемого изделия. Сопла могут быть выполнены так, чтобы доставляемый охлаждающий газ покрывал длину приблизительно 20 мм вдоль направления движения обрабатываемого изделия.

Сопла могут иметь идентичную длину, или сопла могут иметь различную длину. В типичном случае каждое сопло может иметь длину достаточную, чтобы создавать на своем выходе направленный поток газа. Например, указанная длина может лежать в диапазоне приблизительно 2,5-25 мм, или приблизительно 5-20 мм. Длина каждого сопла и его положение могут быть выбраны так, чтобы поток охлаждающего газа мог проходить через нанесенный расплавленный материал. Сопла могут быть выполнены в виде пар или групп, при этом длину каждого сопла и его положение выбирают, чтобы в результате получить конфигурацию, при которой один элемент пары направляет или некоторые элементы группы направляют охлаждающий газ в одно место, а другой элемент пары направляет или другие элементы группы направляют охлаждающий газ в другое место. Например, одна группа сопел может быть направлена на поверхность лунки расплава, а другая группа сопел может быть направлена на отвердевший материал.

Число сопел, их конфигурация и расположение могут быть выбраны так, чтобы содействовать турбулентному течению газа вблизи поверхности лунки расплава, или попаданию турбулентного потока газа на границу жидкой и твердой фаз, или на отвердевший металл вблизи границы жидкой и твердой фаз, или на любую комбинацию указанных мест. Например, сопла могут быть расположены так, чтобы струи охлаждающего газа по меньшей мере от двух сопел сталкивались друг с другом, образуя турбулентное течение. Одно или более сопел могут содержать в своем отверстии или в пределах корпуса сопла выступ или впадину или их комбинацию, чтобы эти элементы взаимодействовали с ламинарным потоком охлаждающего газа, и содействовали образованию турбулентного течения. Скорость течения охлаждающего газа через сопло можно также контролировать и регулировать, чтобы охлаждающий газ, выходящий из сопел, образовывал турбулентное, а не ламинарное течение. Турбулентное течение может быть создано во время взаимодействия газовых струй при их столкновении с ламинарными пограничными слоями вблизи обрабатываемого изделия. Охлаждающий эффект усиливается при турбулентном течении охлаждающего газа. Трубопроводы могут содержать один или более дефлекторов на пути течения охлаждающего газа. Для газа, ударяющего в дефлектор, направленная кинетическая энергия соударения струи с дефлектором может преобразовываться в энергию вращения, которая вызывает турбулентное перемешивание или турбулентное течение.

Теплоизоляционный материал может быть использован для термоизоляции струйного устройства от плавящего инструмента или лунки расплава или устройства подачи металлического материала или от любого сочетания указанных компонентов. Теплоизоляционный материал может быть расположен между струйным устройством и плавящим инструментом, или между струйным устройством и устройством подачи металлического материала, или может быть нанесен на поверхность струйного устройства, обращенную к лунке расплава на обрабатываемом изделии.

Теплоизоляционный материал может заключать в себе любой материал пригодный для использования при температурах близких к температуре плазменной дуги, лазерного устройства или лунки расплава. Теплоизоляционный материал может представлять собой или содержать теплоизоляционную керамику. Такие виды керамики известны в технике, и могут включать оксиды или

нитриды следующих элементов: Al, B, Zr, Mg, Y, Ca, Si, Ce, In и Sn и их комбинации (например, см. патенты США 6 344 287 (Celik *et al.*, 2002), 4 540 879 (Haerther *et al.*, 1985) и 7 892 597 (Hooker *et al.*, 2011)). Теплоизоляционный материал может представлять собой или содержать нитрид алюминия, оксид алюминия, нитрид магния, оксид магния, кварц, нитрид кремния, нитрид бора или диоксид циркония, или смесь или комбинацию указанных веществ.

На фиг. 1 изображен (в виде фронтальной проекции) пример осуществления струйного устройства для подачи газовой струи к лунке расплава. Направление движения обрабатываемого изделия указано стрелкой (в данном случае показано направление движения в сторону наблюдателя). Изображенное струйное устройство 100 содержит на одной стороне первый трубопровод 10, содержащий пять пар сопел 25, которые направляют газовые струи 30 в сторону наплавленной нити 95 и лунки 90 расплава обрабатываемого изделия. Изображенное струйное устройство также включает в себя второй трубопровод 60, содержащий пять пар сопел 75, которые направляют газовые струи 80 в сторону наплавленной нити 95 и лунки 90 расплава обрабатываемого изделия. Струйное устройство 100 направляет охлаждающий газ к свободной поверхности лунки расплава и к границе жидкой и твердой фаз, когда производится нанесение расплавленного материала с целью формирования нити 95. Источник 40 охлаждающего газа подает охлаждающий газ к впускному отверстию 15 первого трубопровода. Источник 50 охлаждающего газа подает охлаждающий газ к впускному отверстию 65 второго трубопровода. Аналогичная конфигурация трубопроводов и сопел присутствует на противоположной стороне плавящего инструмента 200, хотя на фигуре видны только газовые струи.

В типичных схемах плавящий инструмент может быть расположен выше лунки расплава, при этом исходный материал – проволока или порошок – подаются к лунке расплава или в плавящую дугу или луч. Струйное устройство может также быть расположено так, чтобы каждый его трубопровод был установлен с каждой стороны плавящего инструмента, и сопла были ориентированы таким образом, чтобы направлять струю охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава или на границу жидкой-твердой фаз расплавленного материала.

35

На фиг. 2 представлена боковая проекция с частичным разрезом примера конструкции струйного устройства, выполненного с возможностью подачи газовой

струи к лунке расплава. Изображенное струйное устройство включает в себя первый трубопровод 10, содержащий группу сопел 25 и второй трубопровод 60, содержащий группу сопел 75. Аналогичная конфигурация присутствует на другой стороне плавящего инструмента 200, к которому прикреплено струйное устройство. На изображенном струйном устройстве видно, что трубопроводы, находящиеся на каждой стороне плавящего инструмента, соединены перемычкой 85, чтобы образовать единый комплекс. На фиг. 2 также показан внутренний рассеиватель 20 внутри трубопровода 10 и рассеиватель 70 внутри трубопровода 60, которые способствуют выравниванию давления газа и его истечения из сопел. Серые элементы 30 и 80 указывают направления газовых струй, исходящих из сопел 25 и 75 соответственно. Охлаждающий газ подается в трубопровод 10 через впускное отверстие 15, а в трубопровод 60 через впускное отверстие 65. На фиг. 2 также показано устройство 300 подачи проволоки, которое доставляет металлическую проволоку 350 в точку, находящуюся над лункой 90 расплава.

15

Подача охлаждающего газа из струйного устройства в виде газовых струй 30 и 80 в лунку 90 расплава, или на границу между жидкой и твердой фазами расплавленного материала, или в оба указанных места, может способствовать образованию центров кристаллизации и распространению противонаправленного фронта отвердевания от свободной поверхности лунки расплава с образованием купола из более мелких зерен, который будет блокировать продолжающийся рост направленных зерен по слоям. Данный эффект может быть более выраженным в процессах с высокой скоростью нанесения, в которых скорости отвердевания обычно более низкие, и фронт направленного отвердевания движется достаточно медленно, чтобы дать сформироваться куполу и распространиться дальше, чем глубина, которая будет переплавлена за счет последующих слоев. Данный механизм иллюстрирует фиг. 3.

Как показано на фиг. 3, на крайнем левом фрагменте, нанесение металла при традиционной аддитивной технологии приводит к образованию свежеотвержденной крупнозернистой структуры в виде столбчатой кристаллизации. В зависимости от сплава результирующие структуры зерен также могут иметь вытянутую форму с большим относительным удлинением. Обычно это результат направленного отбора тепла, создаваемого сравнительно более холодным обрабатываемым изделием, когда перегретый расплавленный металл добавляют к изделию в виде нити. В таких традиционных процессах кристаллизация начинается от ранее нанесенного слоя (-ев) металла, и

распространяется в нанесенный материал, по мере того как нанесенный слой остывает. Свежеотвержденные структуры зерен могут во многих случаях проходить через несколько слоев, и могут вырастать в размерах до нескольких сантиметров. Такие особенности обычно вредны для механических свойств, приводя к пониженной и/или анизотропной прочности, растяжению или пониженной усталостной прочности.

Рассматриваемые в настоящем описании струйные устройства подают охлаждающий газ. Охлаждающий газ, подаваемый струйными устройствами, может представлять собой любой газ, который не мешает сварочному процессу, используемому для нанесения расплавленного металла с целью формирования нити при осуществлении аддитивной технологии. К примерам охлаждающих газов относятся: аргон, гелий, неон, ксенон, криптон и их смеси. Обычно охлаждающий газ содержит аргон, чистый или в сочетании с другим газом. Температура охлаждающего газа, подаваемого к впускному отверстию струйного устройства, обычно составляет менее 100°C, или менее 80°C, или менее 60°C, или менее 40°C, или менее 25°C. Охлаждающий газ можно подавать во впускное отверстие струйного устройства приблизительно при комнатной температуре или более низкой, например, приблизительно 25°C или ниже, или приблизительно 20°C или ниже, или приблизительно 15°C или ниже, или приблизительно 10°C или ниже. Охлаждающий газ можно подавать во впускное отверстие струйного устройства при температуре приблизительно от -195°C до приблизительно 25°C. Подача охлаждающего газа из струйного устройства в лунку расплава, или на границу между жидкой и твердой фазами расплавленного материала, когда расплавленный металл остывает, или в оба указанных места, приводит к эффективному уменьшению размера зерен металла, создавая более мелкозернистую структуру, чем та, которая получается при отсутствии подачи охлаждающего газа.

Подача охлаждающего газа из струйного устройства в лунку расплава, или на границу между жидкой и твердой фазами расплавленного материала, когда расплавленный металл остывает, или в оба указанных места, может способствовать уменьшению температурных градиентов во фронте направленного отвердевания, обычно присутствующих при использовании традиционной аддитивной технологии. Уменьшение температурных градиентов во фронте направленного отвердевания может дестабилизировать

продолжающееся распространение фронта из-за охлаждающего воздействия подаваемого охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава.

5 Подача охлаждающего газа из струйного устройства в лунку расплава, или
на границу между жидкой и твердой фазами расплавленного материала, когда
расплавленный металл остывает, или в оба указанных места, может также
перенаправить отвердевание за счет влияния охлаждения на
свежеотвержденный материал, расположенный вблизи границы жидкой-твердой
10 фаз. Подача охлаждающего газа может изменить отвод тепла от заднего края
лунки расплава. Подача охлаждающего газа может также увеличить скорости
отвердевания в целом. Формирование столбчатой структуры зерна
минимизируется или предотвращается в результате механизмов, которые были
подробно рассмотрены выше. Уменьшение размеров зерен - это эффект,
15 которому способствует подача охлаждающего газа от струйного устройства,
предусмотренного в системе. В результате подачи охлаждающего газа от
предусмотренного струйного устройства стимулируется уменьшение размеров
зерен, например, формирование структуры приблизительно равноосных зерен, и
тем самым улучшаются механические характеристики изготавливаемого изделия.

20 Чтобы максимизировать влияние струйного устройства, другие параметры
процесса обычно задают так, чтобы они способствовали разрушению фронта
отвердевания за счет управления температурой обработки и подводом энергии,
так чтобы поддерживать определенную длину лунки расплава для падающих на
нее газовых струй, и минимизировать градиенты температуры в обрабатываемом
25 изделии. Например, температура обработки будет зависеть от того, какой
используется сплав, но в типичном случае температуру поддерживают в
диапазоне приблизительно от 300°C до приблизительно 750°C. Подводимая
энергия также будет зависеть от того, какой используется сплав. Эффективная
энергия для сплава Ti-6Al-4V в процессе с высокой скоростью нанесения металла
30 - таком, как в системе с горелкой ПДС и наплавляемой проволокой, в типичном
случае может составлять приблизительно до 300 Дж/мм до приблизительно
1000 Дж/мм. Температурные градиенты в обрабатываемом изделии могут быть
уменьшены за счет обработки при более высоких температурах
обрабатываемого изделия (температурах металла перед наложением
35 последующего слоя) и при пониженном подводе энергии на единицу длины.

Устранение крупнозернистых столбчатых структур отвердевания, которые характерным образом возникают при осуществлении аддитивной технологии, считается должно быть полезным для достижения оптимального баланса прочности, вязкости и усталостной прочности в изделиях, изготавливаемых по аддитивной технологии, включая изделия на основе титана, например, из сплава Ti-6Al-4V. Воздействие на состояние лунки расплава, например, путем использования предлагаемого в изобретении струйного устройства, чтобы направлять струи охлаждающего газа на границу жидкой-твердой фаз лунки расплава, стимулирует и ускоряет противонаправленный фронт отвердевания у свободной поверхности лунки расплава. Это может сократить или в значительной степени исключить формирование вытянутых столбчатых структур, которые могут накладывать ограничение на ряд благоприятных разновидностей зерен, которые могут образовываться, увеличивая тем самым разнообразие кристаллографических ориентаций в наплавляемом материале.

В процессе осуществления аддитивной технологии наплавляемый материал испытывает температурные изменения от лунки расплава, через область образования кристаллов, к области отвердевшего металла и области микроструктурных переходов. Таким образом, путем воздействия на условия на протяжении всего процесса наплавления, дополнительно к лунке расплава, например, путем управления скоростью охлаждения или ее изменения в областях отвердевания металла или в переходных областях (или в тех и других областях), можно способствовать формированию требуемой микроструктуры. На кристаллографию и морфологию микроструктур, сформированных за счет аллотропического превращения или других механизмов (в зависимости от сплава) можно воздействовать силами структуры свежееотвержденных зерен, благодаря использованию ориентационной взаимозависимости, зарождению центров кристаллизации на границах зерен и группировке, вызванной разностью энергий на границах раздела фаз, скоростью диффузии и теплопроводностью между разными кристаллографическими направлениями в решетке сплава, когда нанесенный материал остывает, кристаллизуется и испытывает превращения твердого состояния. Отличия в тепловой предыстории могут приводить к выраженным отличиям деформационного отклика по различным границам зерен во многих сплавах.

Струйное устройство, соответствующее настоящему изобретению, может быть использовано для управления скоростью охлаждения на протяжении всего

процесса наплавления металла, и тем самым для влияния на тепловую предысторию изделия, изготавливаемого по аддитивной технологии. Принудительное охлаждение посредством концентрированных турбулентных потоков охлаждающего газа может быть применено к свежееотвержденному материалу, путем использования струйного устройства для управления теплопередачей, теплопроводностью, диссипацией тепловой энергии и превращениями твердой фазы материала. Струйное устройство позволяет получить локальное охлаждение и выполнить измерение температуры в целевых областях нанесенного материала, между наплавленными нитями, чтобы при подготовке к нанесению последующих слоев предварительно определить температурные условия и даже температуру вне обрабатываемого изделия.

На фиг. 7 представлен вид сбоку примера конфигурации струйного устройства, выполненного с возможностью подачи газовой струи в область отвердевшего металла. Изображенный вариант осуществления охлаждающего струйного устройства 500 содержит ряд сопел 525, которые создают газовые струи 530, и которые прикреплены к одной стороне устройства 300 подачи проволоки. Аналогичная конструкция может располагаться с другой стороны устройства 300 подачи проволоки, к которой прикреплено струйное устройство. В иных вариантах осуществления, на нижней стороне устройства подачи проволоки, к которому прикреплено струйное устройство, могут находиться один или более рядов сопел. Согласно другому варианту осуществления изобретения, струйное устройство может содержать U-образный трубопровод, параллельный или почти параллельный обрабатываемому изделию; при этом ветви трубопровода могут быть расположены с каждой стороны формируемой нити на обрабатываемом изделии, и могут включать в себя сопла, направленные вниз в сторону обрабатываемого изделия. Сопла могут быть направлены так, чтобы струи 530 охлаждающего газа ударяли в верхнюю поверхность обрабатываемого изделия, или в боковую поверхность обрабатываемого изделия, или и в верхнюю поверхность и по меньшей мере в одну боковую поверхность обрабатываемого изделия. В ином варианте осуществления изобретения, струйное устройство может содержать трехлучевой или ψ -образный трубопровод (U-образный трубопровод, рассеченный пополам отдельным трубопроводом, который параллелен ветвям U-образной формы), параллельный или почти параллельный обрабатываемому изделию; при этом боковые ветви расположены с каждой стороны формируемой нити на обрабатываемом изделии, и содержат сопла, направленные вниз в сторону верхней поверхности формируемой нити или

боковой поверхности формируемой нити, а центральная ветвь трубопровода содержит сопла, направленные вниз в сторону верхней поверхности формируемой нити на обрабатываемом изделии. Согласно другому варианту осуществления изобретения, струйное устройство может содержать три
5 параллельных трубопровода, каждый со своим собственным газоснабжением. Один внешний трубопровод может содержать сопла, направленные на одну боковую поверхность наплавляемой нити, другой внешний трубопровод может содержать сопла, направленные на другую боковую поверхность наплавляемой нити, а центральный трубопровод может содержать сопла, направленные на
10 верхнюю поверхность наплавляемой нити. Расположение датчиков и струйного устройства можно регулировать в зависимости от целевой области температур, которая считается важной для определения и обеспечения определенной скорости охлаждения. Поэтому, расположение можно регулировать исходя из металлического сплава, который необходимо наплавлять.

15

На фиг. 7 также показан датчик 550 температуры, прикрепленный так, чтобы можно было считывать данные температуры с поверхности обрабатываемого изделия спереди от зоны падения струй охлаждающего газа. На фиг. 7 также показан датчик 560 температуры, прикрепленный позади
20 струйного устройства 500, чтобы дать возможность считывать данные температуры с зоны обрабатываемого изделия после применения струй охлаждающего газа. Направление движения обрабатываемого изделия показано стрелкой D (в данном случае показано направление движения обрабатываемого изделия слева направо). В варианте осуществления, показанном на фиг. 7, охлаждающее струйное устройство 500 и датчики 550, 560 температуры
25 изображены присоединенными к устройству 300 подачи проволоки, однако, такое крепление показано лишь для иллюстрации. Крепежные скобы или кронштейны отдельно могут быть использованы для крепления любого из компонентов – струйного устройства 500 и датчиков 550, 560 температуры - к одному или более
30 компонентам системы, чтобы обеспечить возможность перемещения вместе с плавящим инструментом 200, применения охлаждающего газа на требуемых поверхностях обрабатываемого изделия, и проведения соответствующих измерений температуры обрабатываемого изделия. Газовые струи направлены таким образом, чтобы не возмущать лунку расплава или не нарушать перенос
35 металла, и чтобы обеспечивать охлаждение за счет газового потока, направленного назад вдоль наплавленной нити. За счет подачи охлаждающего газа на затвердевший металл можно получить надлежащее локальное

охлаждение за период времени, определяемый показаниями температуры от датчиков температуры, и тем самым можно осуществить непрерывное управление скоростью охлаждения во время наплавления материала, и локальную предварительную подготовку материала между актами наплавления нити. Скорости истечения охлаждающих газовых струй из струйного устройства непосредственно в область затвердевшего металла обрабатываемого изделия, расположенную после лунки расплава, можно регулировать исходя из температурных условий в изделии во время обработки, либо путем проведения измерений *in situ*, либо, следуя запрограммированному автоматическому регламенту на основе данных, полученных от датчиков температуры до и после области падения струй охлаждающего газа. Надлежащее охлаждение может быть достигнуто путем подачи потока охлаждающего газа в течение некоторого периода времени, который может быть определен на основе данных, полученных от датчиков температуры до и после области падения струй охлаждающего газа. Расположение датчиков температуры и струйного устройства может зависеть от того, какая область температур обрабатываемого изделия является наиболее важной для сбора данных скорости охлаждения и воздействия на скорость охлаждения. Указанное расположение можно регулировать в зависимости от сплава металла, который необходимо наплавлять.

20

Струйное устройство позволяет осуществлять непрерывное управление скоростью охлаждения во время наплавления материала, и предварительную подготовку материала между актами наплавления нити, не прекращая процесс наплавления. Величину расхода газа в струях можно регулировать исходя из изменения температурных условий в изделии во время обработки, либо вручную, контролируя данные, поступающие от датчиков температуры, либо автоматически, используя компьютер, который принимает данные температуры от датчиков, и регулирует величину расхода или продолжительность обдува, или оба эти параметра, чтобы получить целевую скорость охлаждения. Могут быть выбраны инфракрасные датчики температуры и откалиброваны для значимых температурных интервалов, которые встречаются в обрабатываемом изделии и процессе нанесения металла. Данные измерений с датчиков можно снимать и сохранять с частотой 1 Гц или чаще. Данные температуры могут сниматься компьютером в системе управления обработкой, чтобы реализовать управление процессом наплавления с обратной связью в ходе процесса обработки, или могут просматриваться после обработки и корректироваться вручную, как часть этапа итеративной разработки наплавления, чтобы сформировать программу

наплавления, или же используется сочетание указанных методов. Величина расхода может быть нулевой или почти нулевой при наплавлении первого слоя, а затем ее можно увеличивать по мере накопления остаточного тепла. Величины расхода могут лежать в диапазоне от нуля или почти нуля до приблизительно 500 л/мин. Величины расхода могут лежать в диапазоне от нуля или почти нуля до приблизительно 400 л/мин. Величины расхода могут лежать в диапазоне от нуля или почти нуля до приблизительно 300 л/мин. В некоторых случаях применения расход охлаждающего газа может составлять по меньшей мере 10 л/мин, или меньшей мере 25 л/мин, или меньшей мере 50 л/мин, или меньшей мере 100 л/мин, или меньшей мере 150 л/мин, или меньшей мере 200 л/мин, или меньшей мере 250 л/мин, или меньшей мере 300 л/мин, или меньшей мере 350 л/мин, или меньшей мере 400 л/мин, или 500 л/мин или менее, или 450 л/мин или менее, или 400 л/мин или менее, или 350 л/мин или менее, или 300 л/мин или менее, или 250 л/мин или менее, или 200 л/мин или менее, или 150 л/мин или менее, или 100 л/мин или менее, или 50 л/мин или менее. Охлаждающий газ может быть инертным или неинертным в зависимости от сплава, который подлежит обработке. Охлаждающий газ может быть одноэлементным, или это может быть смесь различных газов.

Струйное устройство может обеспечивать надлежащее охлаждение в течение определенного периода времени в указанных областях, чтобы эффективно отводить избыточную тепловую энергию, которая подводится во время наплавления металла. Струйное устройство позволяет подавать охлаждающий газ непосредственно на наплавленный металл одновременно с осуществлением наплавления, чтобы обеспечить локальное управление скоростью охлаждения, а также измерение локальной скорости охлаждения и температуры в областях нанесения наплавляемой нити, позволяя осуществлять предварительную подготовку материала или выравнивание температуры обрабатываемого изделия, или оба указанных действия при подготовке нанесения последующих слоев. Высокоскоростной газовый поток можно подавать посредством струйного устройства в области последующих слоев наплавляемого материала.

В традиционных сварочных процессах может применяться устройство подачи защитного газа вслед за сварочной горелкой, чтобы направлять газовую завесу на твердеющий материал, чтобы защитить наплавленный материал от окружающей атмосферы и избежать загрязнения свариваемого металла. Такого

ламинарного потока газа, используемого для завесы, недостаточно для того, чтобы воздействовать или управлять отводом тепла или скоростью охлаждения. Струйные устройства, соответствующие настоящему изобретению, обеспечивают подачу струй охлаждающего газа с расходом достаточным для получения турбулентного течения газа. Турбулентный поток охлаждающего газа из сопел струйного устройства обычно может быть получен за счет высокой скорости прохождения охлаждающего газа через сопла.

С. СИСТЕМЫ

В типичной аддитивной технологии изготовления предметов, особенно в процессах с высокой скоростью нанесения материала, часто можно сталкиваться со значительной изменчивостью условий обработки, вызванной вариациями геометрии нанесения материала. Локальная температура обрабатываемого изделия при нанесении материала в большом объеме с более продолжительным интервалом между повторами (т.е. более продолжительным временем, приходющимся на один слой) будет иметь сильно различающиеся значения по сравнению с нанесением материала в меньшем объеме, когда нити следуют в быстрой последовательности, а тепло имеет возможность накапливаться. Аналогично, локальное привнесение массы может определять или влиять на сечение отвода тепловой энергии от наносимого материала, а примыкающая масса может влиять на теплопоглощающую способность, чтобы справляться с добавляемой тепловой энергией.

Указанные факторы могут приводить к получению неоптимальных и нестабильных свойств материала. Во многих случаях, заключительная термообработка, если не считать стандартное снятие остаточных напряжений, либо нецелесообразна, либо неэффективна для множества металлических сплавов. Самое главное, полностью сформированный нанесенный материал может иметь толщину сечения, которая не позволяет при объемной термообработке достичь требуемой скорости охлаждения. Системы, предназначенные для выращивания металлических объектов посредством аддитивной технологии, и соответствующие настоящему изобретению, позволяют преодолеть указанные недостатки, свойственные существующим системам. Поэлементный способ аддитивной технологии, при котором используются струйные устройства, раскрытые в настоящем изобретении, может в ходе процесса нанесения материала обеспечить управление скоростью охлаждения в меньших объемах материала индивидуальных нитей, из которых состоит

конечное изделие. Рассматриваемые системы характеризуются гибкостью и высокой управляемостью, и обеспечивают путь увеличения плотности металлических изделий, изготавливаемых по аддитивной технологии, в частности, для масштабных процессов с высокой скоростью нанесения материала. Системы могут включать в себя компьютер, который может быть использован для автоматизации части системы или всей системы. Компьютер может быть связан с управляющей системой, и может быть использован для считывания модели конструкции. Компьютер может осуществлять сбор данных, хранение и/или обработку данных, таких как величин расхода, температур, или других параметров технологического процесса. Компьютер может использовать собранные данные, чтобы управлять технологическим процессом или модифицировать технологический процесс. Компьютер может включать в себя процессор, который может быть связан с одним или более компонентами системы.

15

Когда происходит отвердевание наплавленной нити и ее остывание, самые важные сплавы испытывают значительные превращения твердого состояния, которые могут сильно влиять на свойства материала. Одним примером являются аллотропические превращения, при которых одна кристаллическая структура превращается в другую кристаллическую структуру. Многие титановые сплавы испытывают аллотропические превращения во время остывания в диапазоне температур от 1050°C до 800°C. Для множества видов стали температурный диапазон превращений при остывании обычно от 800°C до 400°C. Еще один пример превращений твердого состояния в наплавленном металле во время его остывания это реакция выделения вторичных фаз, при которой процесс упорядочения составляющих сплава формирует частицы вторичной фазы. Например, никелевые жаропрочные сплавы могут демонстрировать реакции выделения при остывании приблизительно от 1000°C до 700°C, и при длительном пребывании при температуре выше 600°C. Рост зерен при длительном пребывании при повышенных температурах также влияет на свойства большинства сплавов. Струйные устройства, соответствующие настоящему изобретению, могут воздействовать на скорость охлаждения или управлять скоростью охлаждения, и тем самым давать возможность модификации свойств наплавленного материала, в результате улучшая плотность металлических изделий, изготавливаемых по аддитивной технологии. Предлагаемые в изобретении системы позволяют осуществлять непрерывное управление скоростью охлаждения в процессе добавления материала, и

35

локальную предварительную подготовку материала между актами наплавления нити. Предлагаемые в изобретении системы позволяют управлять условиями обработки для контролируемого объема индивидуального отрезка нити. Системы позволяют управлять температурой во время наплавления материала, и
5 достигать результатов невозможных при использовании заключительной объемной термообработки, при которой управление скоростью охлаждения на более толстых участках материала, нанесенного по полной аддитивной технологии, оказывается более трудным, и высокие скорости охлаждения, достижимые с использованием струйных устройств настоящего изобретения,
10 оказываются недостижимыми при использовании заключительной объемной термообработки без применения менее практичных способов, таких как закалка в воде или масле.

Системы, соответствующие настоящему изобретению, могут содержать
15 плавящий инструмент для плавления исходного металла на капли расплавленного металлического материала, которые вводят в лунку расплава на материале основы; струйное устройство, соответствующее настоящему изобретению, чтобы направлять поток охлаждающего газа так, чтобы он пересекал лунку расплава, или попадал в лунку расплава, или попадал в
20 затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой-твердой фаз лунки расплава, или попадал в сочетание указанных мест; источник охлаждающего газа; систему для позиционирования и перемещения материала основы относительно нагревательного устройства и струйного устройства; и управляющую систему, способную считывать модель конструкции, например,
25 модель в системе автоматизированного проектирования» (CAD-модель) металлического объекта, который должен быть выращен, и применять модель конструкции для регулирования положения и передвижения системы для позиционирования и перемещения материала основы, и для приведения в действие нагревательной системы и струйного устройства, так чтобы
30 осуществлять выращивание физического объекта путем последовательного наплавления металлического материала на материал основы.

Может быть использован одиночный плавящий инструмент, или может быть использована двухгорелочная система, содержащая два плавящих
35 инструмента. Установлено, что скорость нанесения расплавленного металла для формирования изделия может быть увеличена за счет использования двухгорелочной системы, в которой первая горелка предварительно нагревает

материал основы, чтобы образовалась предварительно разогретая область, а вторая горелка используется для нагревания и плавления металла, и его нанесения на предварительно разогретую область материала основы. Первая горелка может обеспечить сплавление между материалом основы обрабатываемого изделия и расплавленным металлом, создаваемым воздействием второй горелки на металл, такой как металлическая проволока или металлический порошок. Первая горелка может увеличить глубину внедрения расплавленного металла в предварительно разогретую область материала основы. Избыточное тепло от капель расплавленного металла может поддерживать лунку расплава вблизи от предварительно разогретой области материала основы. Предварительный разогрев материала основы может привести к лучшему смачиванию, лучшему профилю наплавления и увеличению скорости нанесения материала. Что касается профиля наплавления, то за счет предварительного разогрева основы можно получать более круглый и более широкий профиль наплавления. Улучшение профиля позволяет в результате получить профиль с более выгодным краевым углом смачивания по отношению к материалу основы, что может способствовать сплавлению с материалом основы и предшествующими нитями наплавленного металла. Улучшение сплавления в результате улучшает монолитность изготавливаемых изделий.

20

Каждая из горелок представляет собой плавящий инструмент. Каждой горелкой можно управлять отдельно, и интенсивность каждой горелки можно варьировать, чтобы создавать отдельный температурный эффект. Преимущество такой схемы заключается в том, что количество тепловой энергии, подводимой к исходному металлическому материалу для его плавления и переноса на предварительно разогретую область материала основы, может быть больше, чем количество тепловой энергии, подводимой к материалу основы, что позволяет избежать перегрева материала основы.

30

Согласно варианту осуществления системы для аддитивной технологии с двумя горелками, соответствующей настоящему изобретению, система может содержать горелку (горелку ПДС, плазматрон, горелку газовой дуговой сварки металлическим электродом – GMAW, или горелку дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа – MIG) или лазерное устройство, или любое сочетание указанных устройств в качестве плавящего инструмента. В некоторых конструкциях первая горелка осуществляет предварительный разогрев целевой области наплавления на материале основы, чтобы сформировать

35

предварительно разогретую область, а вторая горелка разогревает и расплавляет расходуемый электрод, формируя капли расплавленного металла, которые падают на предварительно разогретую целевую область наплавления. В некоторых конструкциях лазерное устройство осуществляет предварительный

5 нагрев целевой области наплавления на материале основы, чтобы сформировать предварительно разогретую область, а горелка разогревает и расплавляет расходуемый электрод, формируя капли расплавленного металла, которые падают на предварительно разогретую целевую область наплавления. В некоторых конструкциях горелка осуществляет предварительный нагрев целевой

10 области наплавления на материале основы, чтобы сформировать предварительно разогретую область, а лазерное устройство разогревает и расплавляет расходуемый электрод, формируя капли расплавленного металла, которые падают на предварительно разогретую целевую область наплавления.

15 Лазерное устройство или горелка могут быть выполнены с возможностью передачи тепловой энергии (например, энергии лазерного излучения или дуги, перенесенной плазмой) в целевую область материала основы, чтобы сформировать предварительно разогретую область, при этом горелка или лазерное устройство могут быть выполнены с возможностью фокусирования

20 тепловой энергии на конце расходуемого электрода или металлической проволоки, расположенном выше области предварительного разогрева материала основы. Эта тепловая энергия расплавляет конец расходуемого электрода или металлической проволоки, формируя капли расплавленного металла, которые падают на предварительно разогретую область материала

25 основы, которая находится под концом расходуемого электрода или металлической проволоки. Плавящий инструмент, который направляет тепловую энергию в целевую область наплавления может способствовать сплавлению материала основы с расплавленным металлическим материалом, который наносится на материал основы за счет углубления внедрения капель

30 расплавленного металла в материал основы. Плавящий инструмент, используемый для плавления расходуемого электрода или металлической проволоки, также может приносить тепловую энергию в окрестность предварительно разогретой целевой области наплавления, увеличивая тепловую энергию, которую обеспечивает плавящий инструмент, нацеленный на материал

35 основы. Избыточное тепло от капель расплав может помочь поддерживать лунку расплавленного металла вблизи предварительно разогретой области материала основы.

Расходуемый электрод или металлическая проволока могут представлять собой или могут содержать Al, Cr, Cu, Fe, Hf, Sn, Mn, Mo, Ni, Nb, Si, Ta, Ti, V, W или Zr, или композиты или сплавы из перечисленных элементов. В некоторых вариантах осуществления расходуемый электрод представляет собой проволоку, которая содержит Ti или сплав Ti. Расходуемый электрод или металлическая проволока могут представлять собой или могут содержать титановый сплав, содержащий Ti в сочетании с одним из следующих элементов или их комбинацией: Al, V, Sn, Zr, Mo, Nb, Cr, W, Si и Mn. Примерами титанового сплава могут служить например: Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-45Al-2Nb-2Cr, Ti-47Al-2Nb-2Cr, Ti-47Al-2W-0.5Si, Ti-47Al-2Nb-1Mn-0.5W-0.5Mo-0.2Si и Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si. Расходуемый электрод или металлическая проволока может содержать алюминий, железо, кобальт, медь, никель, углерод, титан, тантал, вольфрам, ниобий, золото, серебро, палладий, платину, цирконий, их сочетания и сплавы.

Типичным поперечным сечением расходуемого электрода или металлической проволоки является круглое сечение. Диаметр расходуемого электрода или металлической проволоки может достигать до 10 мм, и может находиться в диапазоне приблизительно 0,8-5мм. Расходуемый электрод или металлическая проволока могут иметь любой практически реализуемый размер сечения, например, 1 мм, 1,6 мм и 2,4 мм или приблизительно от 0,5 мм до приблизительно 3 мм. Скоростью подачи и позиционированием расходуемого электрода или металлической проволоки можно управлять и варьировать в соответствии с тем действием, какое источник питания оказывает на плазматрон, или лазерное устройство или на оба плавящих инструмента, чтобы обеспечить непрерывное нагревание и плавление расходуемого электрода или металлической проволоки, когда последний (-я) достигает намеченного положения над лункой расплава в материале основы.

Лазерное устройство может генерировать лазерный луч достаточной энергии, чтобы передавать тепловую энергию материалу основы для предварительного разогрева области материала основы, или для плавления металлической проволоки. Предварительный разогрев материала основы за счет энергии лазерного луча способствует сплавлению между материалом основы и расплавленным металлическим материалом за счет увеличения глубины внедрения в материал основы. В некоторых вариантах осуществления по

меньшей мере часть материала основы может быть расплавлена за счет энергии луча лазерного устройства. В некоторых вариантах осуществления за счет луча лазерного устройства подводится тепловая энергия достаточная, чтобы сформировать лунку расплава в материале основы в том месте, куда должен
5 быть нанесен металлический материал, производимый плазматроном или другим лазером.

К примерам подходящих лазерных устройств относятся иттербиевый (Yb) лазер, иттербиевый волоконный лазер, иттербиевый волоконный лазер с
10 диодной накачкой, лазер на стекле, легированном иттербием (англ. Yb:glass laser), лазер на иттрий-алюминиевом гранате, легированном иттербием с диодной накачкой (англ. Yb:YAG laser), лазер на иттрий-алюминиевом гранате, легированном неодимом (англ. Nd:YAG laser), лазер на CO₂, лазер на CO, лазер на стекле, легированном неодимом (англ. Nd: glass laser), лазер на иттрий-
15 ортованадате, легированном неодимом (англ. Nd:YVO laser), рубиновый лазер (англ. Cr: ruby laser), диодный лазер, лазер с диодной накачкой, эксимерный лазер, газовый лазер, полупроводниковый лазер, твердотельный лазер, лазер на красителе, рентгеновский лазер, лазер на свободных электронах, ионный лазер, лазер на смеси газов, химический лазер и сочетания указанных лазеров. К
20 предпочтительным лазерам относятся иттербиевые лазеры, в частности иттербиевые волоконные лазеры. Во многих случаях применения излучение с длиной волны, используемой в иттербиевом волоконном лазере, может отражаться слабее, чем излучение лазеров с другими длинами волн.

Горелка может быть любой конструкции, способной создавать электрическую дугу для разогрева и плавления расходуемого электрода или для
25 разогрева целевой области материала основы, например, для газовой дуговой сварки металлическим электродом (GMAW), в частности, с использованием инертных газов для создания дуги (дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа – MIG). Таким образом, горелка может представлять собой
30 горелку ПДС, плазматрон, горелку типа GMAW или горелку типа MIG. Расходуемый электрод выполнен с расчетом его плавления в плазме, создаваемой горелкой, в которой используется электрическая дуга, при этом плавящийся расходуемый электрод отсаживается в лунку расплава на
35 обрабатываемом изделии с целью добавления материала и формирования металлических предметов с формой близкой к заданной. Предварительный разогрев материала основы посредством энергии горелки способствует

сплавлению материала основы с расплавленным металлическим материалом за счет более глубокого внедрения в материал основы. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере часть материала основы может быть расплавлена за счет энергии плазмы горелки. В некоторых вариантах осуществления плазма горелки дает достаточное количество тепла, чтобы сформировать лунку расплава в материале основы в том месте, куда предстоит наносить металлический материал, расплавленный другой горелкой или лазерным устройством.

10 Использование первого плавящего инструмента для предварительного разогрева материала основы и формирования предварительно разогретой зоны, а второго плавящего инструмента для плавления расходуемого электрода или металлической проволоки дает преимущество, ибо становится возможным увеличение тепловой энергии, направляемой на расходуемый электрод или
15 металлическую проволоку, независимо от подачи тепловой энергии к основе. Энергия плавления, подаваемая на расходуемый электрод или металлическую проволоку, может быть выбрана так, чтобы она соответствовала вносимой массе (количеству капель расплавленного металла расходуемого электрода или металлической проволоки, которое должно быть добавлено к обрабатываемому
20 изделию), чтобы обеспечить стабильное плавление расходуемого электрода или металлической проволоки и/или точку плавления. Таким образом, можно увеличивать скорость нанесения расплавленного металла без одновременного перегрева основы, и без риска разбрызгивания или формирования чрезмерно большой лунки расплава, не теряя тем самым контроль над объединением
25 наплавляемого материала с материалом основы.

В системах для изготовления металлических тел с формой близкой к заданной по аддитивной технологии, соответствующих настоящему изобретению, используется струйное устройство, которое в значительной мере устраняет
30 затруднения, касающиеся столбчатой структуры зерен металла и крупности зерен, которые налицо в многих изделиях, изготовленных по традиционной аддитивной технологии. Зерна структуры металла в изделиях, изготавливаемых с использованием систем, соответствующих настоящему изобретению, которые содержат струйное устройство для подачи струй охлаждающего газа к лунке
35 расплава или к окрестности лунки расплава, или струйное устройство для подачи струй охлаждающего газа к отвердевшему металлу, или первое струйное устройство для подачи струй охлаждающего газа к лунке расплава или к

окрестности лунки расплава, и второе струйное устройство для подачи струй охлаждающего газа к отвердевшему металлу, являются приблизительно равноосными, т.е. изделия демонстрируют мелкозернистую структуру. Использование одного или более струйных устройств, соответствующих
5 настоящему изобретению, для подачи охлаждающего газа во время осуществления аддитивной технологии, чтобы обеспечить попадание газовых струй на свободную поверхность лунки расплава, или пересечение лунки расплава, или попадание на границу между жидкой и твердой фазами, когда расплавленный металл остывает, или в затвердевший металл за границей
10 жидкой-твердой фаз, или в любое сочетание указанных мест, приводит к получению изделий, обладающих мелкозернистой структурой, при этом изделия, изготовленные с использованием указанных систем демонстрируют повышенную прочность, сопротивление усталости и долговечность.

15 Струйное устройство, направляющее струи инертного газа на границу жидкой-твердой фаз лунки расплава, может инициировать или ускорить противонаправленный фронт отвердевания на свободной поверхности лунки расплава. Блокирование эпитаксии может быть достигнуто, когда в следующих друг за другом слоях образуются центры кристаллизации, и слои твердеют от
20 зерен верхнего слоя. Принудительное охлаждение посредством концентрированного турбулентного потока от струйного устройства, направленного на область свежеотвержденного материала, позволяет управлять превращениями в фазе твердого состояния и регулировать превращения – реакции выделения вторичных фаз и другие явления, касающиеся вторичных
25 фаз, которые могут влиять на конечную кристаллическую структуру и локальное упорядочение.

Пример системы, которая содержит струйное устройство, направляющее турбулентную струю охлаждающего газа *in situ* на свежеотвержденный материал нанесенного слоя 480, чтобы увеличить скорость охлаждения путем подачи струй
30 охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный затвердевший материал, изображен на фиг. 7. Показанная система содержит один плавящий инструмент 200, который представляет собой основной плавящий инструмент (плазмотрон), который создает основную дугу 330, которая нагревает и плавит металлическую
35 проволоку 350, поступающую от устройства 300 подачи проволоки, формируя капли 375 расплавленного металла, которые падают и формируют лунку 425 расплава на обрабатываемом изделии 400. Принудительное охлаждение

свеженаплавленного материала в ходе процесса нанесения посредством струй 530 охлаждающего газа, создаваемых струйным устройством 500, позволяет получить мелкозернистую структуру материала изделия, изготавливаемого по аддитивной технологии.

5

Как показано на фиг. 7, система может содержать струйное устройство 500, соединенное с устройством 300 подачи проволоки, и датчики 550, 560 температуры, по-отдельности прикрепленные к устройству 300 подачи проволоки, либо непосредственно (как датчик 550), либо через кронштейн 570 (как датчик 10 560). Хотя в варианте осуществления, представленном на фиг. 7, и показано, что датчик 550 температуры и датчик 560 температуры прикреплены к устройству 300 подачи проволоки, но такое крепление изображено лишь для иллюстрации.

Как показано, например, на фиг. 8 и 9, кронштейны или несущие рычаги 15 по-отдельности могут быть использованы, чтобы раздельно и индивидуально крепить каждый из следующих компонентов: струйное устройство 500, датчик 550 температуры и датчик 560 температуры к одному или более элементам системы, чтобы обеспечить возможность подачи охлаждающего газа к требуемым 20 поверхностям обрабатываемого изделия, и возможность надлежащего измерения температуры обрабатываемого изделия, на которое *in situ* направлены струи охлаждающего газа. В некоторых конструкциях, как показано на фиг. 9, датчик 550 температуры может быть прикреплен к плавящему инструменту 200 либо непосредственно, либо через кронштейн 575. В других конструкциях, как показано на фиг. 8, датчик 550 температуры может быть 25 прикреплен к кронштейну 250. Кронштейн 250 может быть прикреплен к устройству 300 подачи проволоки (или он может держать устройство 300), или кронштейн 250 может быть прикреплен к плавящему инструменту 200 (или он может держать плавящий инструмент 200), или же кронштейн 250 может быть 30 прикреплен к / может держать один или более других элементов системы, или к любому сочетанию элементов.

Аналогично, в некоторых конструкциях датчик 560 температуры может быть прикреплен к устройству 300 подачи проволоки либо непосредственно, либо через кронштейн 570, или прикреплен к кронштейну, который может быть таким 35 же, что и кронштейн 250 или может отличаться от кронштейна 250, но подобно кронштейну 250 может быть прикреплен к / может держать один или более элементов системы. Для иллюстрации фиг. 8 изображает датчик 560

температуры присоединенным к кронштейну 250 подобно датчику 550 температуры, при этом кронштейн 250, как говорилось ранее, может быть прикреплен к устройству 300 подачи проволоки, или может держать устройство 300 или один или более других элементов системы, или их сочетание.

5

В некоторых конструкциях датчики температуры могут включать в себя инфракрасный волоконно-оптический датчик или детектор, чтобы обеспечить возможность бесконтактных измерений поверхности нанесенного слоя 480, на которую направлены струи 530 охлаждающего газа, и одновременно – датчик средней объемной температуры, прикрепленный к другому компоненту системы в месте удаленном от инфракрасного волоконно-оптического датчика или детектора. Датчик 550 температуры расположен так, чтобы он позволял снимать показания температуры с поверхности обрабатываемого изделия, спереди от зоны падения струй охлаждающего газа. Датчик 560 температуры расположен так, чтобы он позволял снимать показания температуры с поверхности обрабатываемого изделия, позади зоны падения струй охлаждающего газа. Расположение датчиков температуры и струйного устройства может зависеть от того, какая область температур обрабатываемого изделия является самой важной для измерения скорости охлаждения и для воздействия на скорость охлаждения. Это расположение можно регулировать, исходя из сплава металла, который необходимо наплавлять на изделие.

На фиг. 8 изображен пример системы, которая содержит первое струйное устройство, которое направляет турбулентный поток охлаждающего газа на границу жидкой-твердой фаз лунки расплава, и второе струйное устройство, которое обеспечивает принудительное конвективное охлаждение, направляя турбулентный поток охлаждающего газа на свежезотвержденный материал нанесенного слоя 480. Изображенная система содержит один плавящий инструмент 200, который представляет собой основной плавящий инструмент (плазмотрон), который создает основную дугу 330, которая нагревает и плавит металлическую проволоку 350, поступающую от устройства 300 подачи проволоки, формируя капли 375 расплавленного металла, которые падают и формируют лунку 425 расплава на обрабатываемом изделии 400. Без применения охлаждающего газа, подаваемого от струйного устройства 100, могут возникать столбчатые кристаллические структуры характерные для процессов аддитивной технологии, такие как кристаллы 435 в наплавленном слое 480. Например, в сплавах Ti-6Al-4V отвердевание является направленным и

эпитаксиальным, в пространственном и кристаллографическом отношении с β -зернами в первой области или зоне 430 отвердевания, обусловленной резким температурным градиентом от источника тепла / лунки расплава к обрабатываемому изделию. По мере остывания кристаллы твердеют во второй

5 зоне 450, содержащей затвердевший материал, за которой может следовать переходный участок, где происходят кристаллографические и морфологические изменения α - β микроструктур при аллотропическом превращении. На них непосредственно влияет предшествующая структура β -зерен за счет ориентационной взаимозависимости, образования центров кристаллизации на

10 границах зерен и группировки, вызванной разницей энергий на границе раздела двух фаз, скоростей диффузии и теплопроводности между разными кристаллографическими направлениями в решетке.

В изображенной системе струи 30 охлаждающего газа из сопел 25

15 струйного устройства 100 направлены на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава. Падение газовых струй 30 на указанную границу жидкой и твердой фаз лунки 425 расплава инициирует и ускоряет движение противонаправленного фронта 440 отвердевания у поверхности лунки расплава. Блокирование эпитаксии достигается, когда в последующих слоях образуются центры

20 кристаллизации, и слои твердеют от зерен верхнего слоя. Принудительное охлаждение, вызываемое газовыми струями 30 струйного устройства 100, обостряется за счет сосредоточенного турбулентного потока, посылаемого струйным устройством через лунку расплава, на поверхность лунки расплава, на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава или в любое сочетание указанных

25 мест.

Принудительное охлаждение посредством сосредоточенного турбулентного потока может быть применено к свежоотвержденному материалу нанесенного слоя 480 для управления фазовым превращением в твердом

30 состоянии посредством удлинителя охлаждающего струйного устройства 100, или, как показано, посредством второго струйного устройства 500, чтобы направить струи 525 охлаждающего газа на свежоотвержденный материал в зоне 450 для управления фазовым переходом твердого состояния, например, β - α фазовым превращением твердого состояния в титановых сплавах, или

35 реакциями выделения вторичных фаз в никелевых жаропрочных сплавах.

Как показано на фигуре, система содержит второе струйное устройство 500 и по меньшей мере два датчика температуры для контроля температуры на протяжении всего аддитивного процесса. В изображенном варианте осуществления первый датчик 550 температуры, прикрепленный к кронштейну 250, может контролировать температуру на поверхности свеженаплавленного материала перед местом падения струй охлаждающего газа, например, в области 400 отвердевания. Второй датчик 560 температуры, расположенный после струйного устройства, может быть включен в состав системы для измерения температуры поверхности 565 обрабатываемого изделия в точке после места падения струй охлаждающего газа от второго струйного устройства на наплавленную нить обрабатываемого изделия. Контроль температур путем использования данных от первого и второго датчиков температуры, например, может дать возможность пользователю управлять скоростью охлаждения путем регулирования величины расхода охлаждающего газа, подаваемого от второго струйного устройства 500, или продолжительности подачи охлаждающего газа к обрабатываемому изделию, или путем регулирования обеих величин. Когда используются два отдельные охлаждающие струйные устройства, для подачи охлаждающего газа к каждому струйному устройству может быть использован один источник охлаждающего газа. С другой стороны, каждое охлаждающее струйное устройство может быть присоединено к отдельному источнику охлаждающего газа.

Показано, что в системе, представленной в качестве примера, используется одна горелка, но рассматриваемые способы не ограничиваются такими системами. Также может быть использована система с двумя горелками.

На фиг. 9 изображен пример системы с двумя горелками. В изображенной системе плавящий инструмент 600 обеспечивает предварительный разогрев обрабатываемого изделия 400, формируя предварительно разогретую область 415, что делает обрабатываемое изделие 400 более восприимчивым к расплавленному металлу. Второй плавящий инструмент 200, который представляет собой основной плавящий инструмент (плазмотрон), создающий основную дугу 330, которая нагревает и плавит металлическую проволоку 350, поступающую от устройства 300 подачи проволоки, формируя капли 375 расплавленного металла, которые падают и формируют лунку 425 расплава. Без применения охлаждающего газа, подаваемого от струйного устройства 100, могут возникать столбчатые кристаллические структуры характерные для процессов

аддитивной технологии, такие как кристаллы 435 в наплавленном слое 480. Например, в сплавах Ti-6Al-4V отвердевание является направленным и эпитаксиальным, в пространственном и кристаллографическом отношении с β -зернами в первой области или зоне 430 отвердевания, обусловленной резким температурным градиентом от источника тепла / лунки расплава к обрабатываемому изделию. По мере остывания кристаллы твердеют во второй зоне 450, содержащей затвердевший материал,

В изображенной системе струи 30 охлаждающего газа из сопел 25 струйного устройства 100 направлены на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава. Падение газовых струй 30 на указанную границу жидкой и твердой фаз лунки 425 расплава инициирует и ускоряет движение противонаправленного фронта 440 отвердевания у поверхности лунки расплава. Блокирование эпитаксии достигается, когда в последующих слоях образуются центры кристаллизации, и слои твердеют от зерен верхнего слоя. Принудительное охлаждение, вызываемое газовыми струями 30 струйного устройства 100, обостряется за счет сосредоточенного турбулентного потока, посылаемого струйным устройством через лунку расплава, на поверхность лунки расплава, на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава или в любое сочетание указанных мест.

Принудительное охлаждение посредством сосредоточенного турбулентного потока может быть применено к свежоотвержденному материалу для управления фазовым превращением твердого состояния посредством второго струйного устройства 500, чтобы направить струи 525 охлаждающего газа на свежоотвержденный материал в зоне 450 для управления фазовым переходом твердого состояния, например, β - α фазовым превращением твердого состояния в титановых сплавах, или реакциями выделения вторичных фаз в никелевых жаропрочных сплавах.

Как показано на фигуре, система содержит второе струйное устройство 500 и по меньшей мере два датчика температуры для контроля температуры на протяжении всего аддитивного процесса. В изображенном варианте осуществления первый датчик 550 температуры может контролировать температуру на поверхности свеженаплавленного материала перед местом падения струй охлаждающего газа, например, в области 555 контроля температуры после отвердевания материала. Второй датчик температуры,

расположенный после струйного устройства, может быть включен в состав системы для измерения температуры поверхности 565 обрабатываемого изделия в точке после места падения струй охлаждающего газа от второго струйного устройства 500 на наплавленную нить обрабатываемого изделия, например, в области 565 контроля температуры итоговых фазовых превращений. Контроль температур путем использования данных от первого и второго датчиков температуры, например, может дать возможность пользователю управлять скоростью охлаждения путем регулирования величины расхода охлаждающего газа, подаваемого от второго струйного устройства 500, или продолжительности подачи охлаждающего газа к обрабатываемому изделию, или путем регулирования обеих величин.

D. СПОСОБЫ

В настоящем изобретении также предлагаются способы изготовления трехмерного объекта из металлического материала по аддитивной технологии, посредством которой изготовление объекта осуществляется путем сплавления следующих друг за другом слоев нанесенного металла с материалом основы, причем указанные способы содержат использование первого нагревательного устройства для предварительного разогрева по меньшей мере части поверхности материала основы, например, в том месте, где должно производиться наплавление металлического материала; использование второго нагревательного устройства для нагревания и плавления металлического материала, так чтобы этот расплавленный металлический материал наносить на предварительно разогретую область материала основы; использование струйного устройства, предусмотренного в настоящем изобретении, чтобы направлять охлаждающий газ для его пересечения лунки расплава, или падения в лунку расплава, или падения на затвердевший материал вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или на любое сочетание указанных мест; и перемещение материала основы относительно положения первого и второго нагревательных устройств, и струйного устройства по заранее установленной схеме, так чтобы происходило твердение последовательно наносимых слоев расплавленного металлического материала и формирование трехмерного объекта.

Согласно одному способу, соответствующее настоящему изобретению струйное устройство направляет охлаждающий газ в виде турбулентного потока поперек лунки расплава, на поверхность лунки расплава, на границу жидкой-

твердой фаз лунки расплава или в любое сочетание указанных мест. Согласно другому способу, соответствующее настоящему изобретению струйное устройство направляет охлаждающий газ в виде турбулентного потока на свежееотвержденный материал, такое как в зоне превращений твердого состояния, например, в область аллотропического превращения, или область, в которой могли бы происходить реакции выделения вторичных фаз. Согласно еще одному способу, предусмотренное в изобретении первое струйное устройство направляет охлаждающий газ в виде турбулентного потока поперек лунки расплава, на поверхность лунки расплава, на границу жидкой-твердой фаз лунки расплава или в любое сочетание указанных мест, а предусмотренное в изобретении второе струйное устройство направляет охлаждающий газ в виде турбулентного потока на свежееотвержденный материал, такое как в зоне превращений твердого состояния.

В способах, соответствующих настоящему изобретению, охлаждающий газ может представлять собой инертный газ, такой как аргон, гелий, неон, ксенон, криптон и их сочетания. Охлаждающим газом может служить и неинертный газ. Охлаждающий газ может представлять собой смесь различных одноэлементных газов. Охлаждающий газ, направляемый поперек лунки расплава, на поверхность лунки расплава, на границу жидкой-твердой фаз лунки расплава или в любое сочетание указанных мест может иметь расход от приблизительно 1 л/мин до приблизительно 200 л/мин. Охлаждающий газ, направляемый на свежееотвержденный материал, может иметь расход от приблизительно 0,01 л/мин до приблизительно 300 л/мин. Охлаждающий газ можно подавать в виде непрерывного потока, или можно подавать периодически, или можно подавать импульсами.

Температура подаваемого охлаждающего газа может быть любой. Температура охлаждающего газа может быть равной наружной температуре аддитивного процесса. В типичном случае температура охлаждающего газа может быть приблизительно равной комнатной температуре или менее, например, около 25°C или менее. Температура газа может быть любой температурой, которая охлаждает поверхность, с которой газ взаимодействует. Указанная температура может быть менее 100°C, или менее 50°C, или менее 30°C, или менее 25°C, или менее 10°C, или менее 5°C, или менее 0°C. Можно также использовать газ при криогенной температуре. Например, температура

охлаждающего газа, подаваемого на вход струйного устройства может быть равной приблизительно от -195°C до приблизительно 25°C .

В способах, соответствующих настоящему изобретению, струйное устройство, содержащее по меньшей мере два датчика температуры, используют для измерения и получения целевой скорости охлаждения. Расположение датчиков температуры и струйного устройства может зависеть от области температур, которая определяется как критически важная для измерения скорости охлаждения и воздействия на скорость охлаждения. Расположение можно регулировать в зависимости от металлического сплава, который подлежит нанесению. Датчики температуры могут включать в себя ИК термометры для измерения температуры поверхности материала нити, наплавляемой на обрабатываемое изделие, до и после применения турбулентных струй охлаждающего газа. На основе указанных данных величину расхода охлаждающего газа или продолжительность его подачи или обе эти величины можно регулировать, чтобы увеличить или уменьшить скорость охлаждения. Согласно некоторым способам, данные по температуре собирают и используют, чтобы осуществить управление с обратной связью в ходе процесса обработки, и реализовать частичное или полностью автоматическое управление скоростью охлаждения, используемой в аддитивном технологическом процессе. Указанные данные можно также собирать и использовать, чтобы по завершении процесса составить программу/регламент итеративной разработки наплавления (англ. *iterative deposit development program/schedule*), чтобы автоматизировать нанесение материала на обрабатываемое изделие.

25

Требуемая скорость охлаждения может зависеть от сплава. Различные сплавы могут демонстрировать различные изменения при фазовом превращении в твердом состоянии в зависимости от интервала температур, и времени пребывания сплава в конкретном интервале температур. Например, для многих титановых сплавов, способы, соответствующие настоящему изобретению, чтобы способствовать аллотропическим превращениям, предусматривают целевую температуру охлаждения в интервале от 1200°C до приблизительно 600°C или от 1050°C до приблизительно 800°C . Для сплавов стали, чтобы способствовать требуемым превращениям в твердом состоянии, целевая температура охлаждения может находиться в интервале от 1000°C до приблизительно 300°C или до приблизительно 800°C - 400°C . Например, для сплава Ti-6Al-4V охлаждающий эффект струйного устройства, нацеленного

на свежееотвержденный материал в указанном температурном диапазоне, может быть использован для увеличения скорости охлаждения от некоторых условий, при которых обычно получают нежелательные структуры с колониально/ламеллярной организацией до условий, которые способствуют образованию полезных мелкозернистых структур плетеного типа. Согласно измерениям температур во время испытаний, это соответствует увеличению скорости объемного охлаждения в области фазового превращения приблизительно от 10°C/с до 15°C/с. Благодаря локальному воздействию газовой струи, температура, зарегистрированная на поверхности обрабатываемого изделия, в тех случаях составляла между 80°C/с до 140°C/с. Для рассматриваемого сплава необходимо установить соотношение между измеренной скоростью охлаждения поверхности и полученной опытным путем скоростью объемного охлаждения. Верхняя поверхность наплавленной нити испытывает увеличенную скорость охлаждения, но она будет снова нагрета до температуры выше температуры превращений при укладке последующих слоев, и поэтому в готовом наплавленном материале будут оставаться только участки ближайšie к нижней части зоны теплового воздействия для каждого слоя. У сталей ключевой температурный диапазон превращений при охлаждении обычно лежит между 800°C и 400°C.

20

В способах, соответствующих настоящему изобретению, надлежащее локальное охлаждение в течение периода времени, определяемого данными температуры от датчиков температуры, измеряющих температуру поверхности наплавленной нити, может быть использовано для рассеяния любого повышенного локального притока энергии, которое может быть необходимо, чтобы сформировать контакты и переходы в обрабатываемом изделии. Указанные способы дают возможность непрерывного управления скоростью охлаждения в ходе добавления материала, и могут быть использованы для локальной предварительной подготовки материала между актами наплавления нити. В способах, соответствующих настоящему изобретению, величину расхода охлаждающего газа можно регулировать, исходя из изменения температурных условий в обрабатываемом изделии в ходе обработки. Турбулентный поток охлаждающего газа можно увеличивать по мере накопления остаточного тепла в ходе аддитивного процесса, или, чтобы рассеивать добавляемое тепло, чтобы формировать определенную структуру, такую как соединение или переход.

35

В способах, соответствующих настоящему изобретению, турбулентный поток, исходящий из сопел струйного устройства, обычно может быть получен за счет высокой скорости прохождения охлаждающего газа через сопла. Другие приемы также могут быть использованы для получения турбулентного потока охлаждающего газа. Например, некоторые из сопел струйного устройства могут
5 быть расположены так, чтобы струи охлаждающего газа, исходящие по меньшей мере из двух сопел, сталкивались друг с другом, создавая турбулентное течение охлаждающего газа в окрестности лунки расплава. Определенные сопла могут содержать выступ или впадину или их сочетание в своем отверстии или корпусе,
10 которое нарушает ламинарное течение газа и способствует турбулентному течению. Обычно скорость течения охлаждающего газа через сопло выбирают так, чтобы охлаждающий газ на выходе из сопел имел турбулентное течение вместо ламинарного.

15 Число сопел и их конфигурация может быть выбрана так, чтобы при подаче охлаждающий газ охватывал заданную длину обрабатываемого изделия, например, приблизительно 5-50 мм, или приблизительно 10-40 мм, или приблизительно 15-30 мм вдоль направления движения изделия.

20 Типичные условия обработки, традиционно используемые в аддитивной технологии изготовления, приводят к направленному отверждению и росту столбчатых кристаллов в силу присутствия резких температурных градиентов, но это может зависеть от используемого сплава. Например, в сплавах Ti-6Al-4V отверждение является направленным и эпитаксиальным, в пространственном и
25 кристаллографическом отношении с β -зернами, обусловленной характеристиками процесса, которые включают в себя резкие температурные градиенты от источника тепла / лунки расплава к обрабатываемому изделию. На кристаллографические и морфологические свойства α - β микроструктур сплава Ti-6Al-4V при аллотропическом превращении непосредственно влияет
30 предшествующая структура β -зерен за счет ориентационной взаимозависимости, образования центров кристаллизации на границах зерен и группировки, вызванной разницей энергий на границе раздела двух фаз, скоростей диффузии и теплопроводности между разными кристаллографическими направлениями в решетке. Данное макро-/микровзаимодействие приводит к ограничениям в
35 широких пределах кристаллографического и морфологического разнообразия в предшествующих β -зернах, и таким образом к выраженным различиям деформационного отклика по границам β -зерен.

Способы, соответствующие настоящему изобретению, позволяют сократить длину лунки расплава. Это может быть достигнуто увеличением скорости отвердевания на заднем краю лунки расплава. Подача турбулентного потока охлаждающего газа к лунке расплава увеличивает интенсивность отвердевания, сокращает время отвердевания. В зависимости от скорости отвердевания, достигнутой за счет подачи охлаждающего газа с использованием струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению, общая длина лунки расплава может быть сокращена приблизительно на 10-50%. Например, по сравнению с традиционными способами и системами аддитивной технологии, длина лунки расплава может составлять 90% или менее, или 80% или менее, или 70% или менее, или 60% или менее, или 50% или менее от длины лунки расплава при традиционной аддитивной технологии.

Струйные устройства, соответствующие настоящему изобретению, инициируют измельчение зерна. Управление параметрами процесса может способствовать эффективности измельчения. Это в особенности справедливо для сплавов, которые резистентны к уменьшению размеров зерна при отвердевании, таких как Ti-6Al-4V по причине узкого температурного интервала отвердевания, который обнаруживается у этого сплава. Характеристики отвердевания делают структурное недоохлаждение (англ. constitutional undercooling) маловероятным при типичных температурных градиентах и скоростях отвердевания при аддитивной технологии изготовления металлоизделий.

Струйные устройства, соответствующие настоящему изобретению, могут быть использованы в схемах аддитивной технологии изготовления металлоизделий, в которых используется одно плавящее устройство, или в одnogорелочных схемах. Струйные устройства, предлагаемые в изобретении, могут быть использованы в двухгорелочных схемах аддитивной технологии изготовления металлоизделий. Горелка предварительного разогрева может быть использована для обеспечения целенаправленного управления температурой поверхности обрабатываемого изделия. Отдельная вторая горелка может быть использована в качестве плавильной горелки для плавления исходного материала, такого как металлическая проволока. Температурные градиенты можно изменять путем ограничения интенсивности энергии, необходимой для плавильной горелки, и для получения требуемых краевых углов смачивания

расплавленного металла за счет обеспечения смачивания на периметре лунки расплава без чрезмерного перегрева самой лунки расплава. Это полезно для измельчения зерна, но не требуется для достижения того эффекта, который достигается за счет использования струйного устройства.

5

Целенаправленная передача энергии проволоке (также вместе с резистивным подогревом проволоки) позволяет реализовать высокие скорости наплавления без избыточной передачи энергии непосредственно лунке расплава, что имело бы место, если бы энергия источника, который плавит проволоку, передавалась лунке расплава. Такая схема может ограничивать перегрев лунки расплава, и, следовательно, уменьшает температурные градиенты. Она также дает возможность реализовать скорости нанесения материала достаточные для поддержания увеличенной длины лунки расплава, и позволяет осуществить взаимодействие газовых струй, исходящих из струйного устройства, с поверхностью лунки расплава или с окрестностью лунки расплава. Хотя указанные сокращения температурных градиентов могут быть полезными для уменьшения размеров зерен, эти сокращения не требуются для достижения эффекта уменьшения размеров зерен, который реализуется за счет подачи охлаждающего газа с использованием струйных устройств, соответствующих настоящему изобретению.

Дополнительные аспекты управления лункой расплава и формой наплавляемой нити будут очевидны из результатов испытаний струйного устройства. Как говорилось ранее, способы, соответствующие настоящему изобретению, позволяют сократить длину лунки расплава, что может быть достигнуто увеличенной скоростью отвердевания у заднего края лунки расплава. Способы обеспечивают возможность задавать форму наплавляемой нити для получения более широких стенок одного ряда, и исключить необходимость заделки конца нити путем смещения плавления за счет давления газовой струи в направлении конца. Предлагаемые в изобретении способы позволяют уменьшить размер зерен кристаллизующихся структур в обрабатываемых изделиях, изготавливаемых по аддитивной технологии. Данные способы могут исключить или значительно сократить крупнозернистую столбчатую структуру, создаваемую традиционными системами аддитивной технологии. Устранение указанных крупнозернистых столбчатых структур может привести к получению изделий, которые демонстрируют увеличенную прочность, вязкость и усталостную

прочность по сравнению с теми показателями, которые достигаются в традиционных процессах аддитивной технологии.

Метод дифракции отраженных электронов (ДОЭ (EBSD, англ. Electron Back Scatter Diffraction)) позволяет проводить анализ кристаллических структур, включая размер зерен и типы границ, разориентировку, деформации, разделение фаз и распределение, измерения кристаллографической ориентации и текстуры (микро-, и макро-кристаллографической текстуры). Для нанесенных слоев метод ДОЭ может быть использован для наблюдения эпитаксии между слоями, а также кристаллической ориентации. Вытянутые столбчатые структуры, типичные для традиционных процессов аддитивной технологии, накладывают ограничения на ряд благоприятных разновидностей α -зерен, какие могут возникать в образце Ti-6Al-4V. Это может быть видно на фиг. 4А и 4В, которые изображают полученную методом ДОЭ кристаллографическую характеристику типичного материала, полученного в процессе традиционной аддитивной технологии (фиг. 4А), в сравнении с характеристикой материала, полученного способами, соответствующими настоящему изобретению, когда обдув газовой струей дает материал, обладающий более мелким зерном (фиг. 4В). Как можно видеть на фиг. 4А, выравнивание в широких пределах и однородность пластинчатых структур вдоль границ предшествующих β -зерен проявляется в типичном крупнозернистом материале из традиционного процесса. В материале, изготовленном с использованием струйного устройства и способов, соответствующих настоящему изобретению, увеличилось кристаллографическое разнообразие; материал демонстрирует множество изначальных ориентаций β -зерен. Как можно видеть на фиг. 4В, степень выравнивания границ зерен уменьшена в мелкозернистом материале, изготовленном с использованием струйного устройства и способов, предлагаемых в изобретении.

Также в настоящем изобретении предложены способы минимизации или исключения образования крупнозернистых столбчатых структур при отвердевании в металлических изделиях, изготавливаемых по аддитивной технологии. Способы включают в себя подачу турбулентной струи охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава от струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению. Струи охлаждающего газа, направленные на лунку расплава, например, на границу жидкой и твердой фаз лунки расплава, инициируют или ускоряют (или совершают оба действия) рост противонаправленного фронта отвердевания у свободной поверхности лунки

расплава. Это может приводить к блокированию эпитаксии, когда в следующих друг за другом слоях возникают центры кристаллизации, и отвердевание происходит от зерен верхнего слоя, и тем самым при отвердевании минимизируется или исключается образование крупнозернистой столбчатой структуры. Образование центров кристаллизации на свободной поверхности лунки расплава может вызывать прекращение образования столбчатых структур за счет более мелких зерен с нерегулярными интервалами, что может приводить к тому, что в ходе аддитивного процесса изготовления можно будет получать материалы с улучшенными и воспроизводимыми характеристиками. Данные способы могут приводить к увеличению кристаллографического разнообразия, например, к формированию множества изначальных ориентаций β -зерен. Способ может также уменьшить степень выравнивания границ зерен. Рассматриваемые способы могут также приводить к сокращению деформационного членения (англ. strain segmentation) металлического изделия, изготавливаемого по аддитивной технологии. Способ может приводить к тому, что конечный материал будет демонстрировать увеличение деформационного упрочнения, особенно при нагрузках параллельных направлению выращивания материала по сравнению с типовым материалом, который не был изготовлен способами, соответствующими настоящему изобретению, которые содержат подачу газовой струи от предлагаемых в изобретении струйных устройств. Изделия, изготавливаемые по аддитивной технологии с применением рассматриваемых способов, могут также демонстрировать увеличение ковкости в направлении выращивания (вдоль наплавленных нитей).

В настоящем изобретении также предложены способы улучшения микроструктуры металлических изделий, изготавливаемых по аддитивной технологии. Способы содержат использование охлаждающего струйного устройства, предусмотренного для увеличения скорости охлаждения за счет подачи струй охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный отвержденный материал. Принудительное охлаждение свеженаплавленного материала в ходе процесса нанесения может улучшить микроструктуру изделия, изготавливаемого по аддитивной технологии. Скорость охлаждения может существенно влиять на микроструктуры, которые формируются в процессе изготовления изделия. Согласно некоторым способам, подача турбулентного потока охлаждающего газа на свежееотвержденный наплавленный материал *in situ* может регулировать аллотропические превращения или управлять ими. В способах, в которых нанесенным материалом является титановый сплав Ti-6Al-4V, путем

принудительного охлаждением за счет подачи турбулентного потока охлаждающего газа на свежеотвержденный наплавленный материал *in situ* можно управлять β - α фазовым превращением в твердом теле. Способы уменьшения размера зерен, соответствующие настоящему изобретению, могут парировать деформационное несоответствие в широких пределах на границах, вызванное двойственностью микроструктур, за счет получения более однородных и тонко распределенных различных микроструктурных элементов.

Влияние скорости охлаждения на микроструктуру можно наблюдать на фиг. 10А и 10В. Для формирования изделия был использован аддитивный технологический процесс с высокой скоростью нанесения, основанный на применении плазменно-дуговой сварки и проволоки, и использовании сплава Ti-6Al-4V. Установлено, что охлаждение с более высокой скоростью существенно улучшает микроструктуру наплаваемого материала и изделия. Гораздо более мелкая микроструктура плетеного типа (англ. basket-weave type) была получена, когда температуру наплаваемого материала уменьшили от 1000°C до 900°C при измеренной скорости объемного охлаждения 15°C/с (фиг. 10В), чем при охлаждении с измеренной скоростью объемного охлаждения 10°C/с (фиг. 10А). При испытании твердости, внедрение индентора (темный пирамидальный отпечаток в центре фигур) показывает увеличенную однородность пластической деформации в случае улучшенной микроструктуры плетеного типа (фиг. 10В) по сравнению с микроструктурой плетеного типа (фиг. 10А), которая оптимизирована в меньшей степени. Как можно видеть на фиг. 10А, имеет место локальная концентрация пластической деформации вблизи индента. Фиг. 10В не демонстрирует никакой локальной концентрации пластической деформации. Таким образом, применение струй охлаждающего газа для принудительного охлаждения свеженаплавленного материала в ходе процесса нанесения дает возможность получать более тонкую микроструктуру плетеного типа, а также оптимизировать аллотропические фазовые превращения (превращение одной кристаллической структуры в другую), выделение вторичных фаз и другие термохимические реакции твердого состояния.

Также в настоящем изобретении предложены способы принудительного охлаждения *in situ* металлического объекта, изготавливаемого по аддитивной технологии. Данные способы включают в себя подачу струй охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный затвердевший материал, чтобы увеличить скорость охлаждения материала. Струи охлаждающего газа подают посредством струйных

устройств в виде турбулентного потока, достигая при этом скорости объемного охлаждения от приблизительно 10°C/с до приблизительно 25°C/с, или зарегистрированной скорости охлаждения от приблизительно 80°C/с до 150°C/с, измеренной на поверхности, на которую направляют охлаждающий газ.

5

Также в настоящем изобретении предложены способы увеличения однородности пластической деформации в титановом сплаве, обрабатываемом по аддитивной технологии, например, *in situ* в металлическом изделии из сплава Ti-6Al-4V. Способы включают в себя подачу струй охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный затвердевший материал, чтобы увеличить скорость охлаждения материала, и тем самым способствовать формированию более тонкой микроструктуры плетеного типа вместо микроструктуры с колониально/ламеллярной организацией, какая типично получается. Струи охлаждающего газа подают посредством струйных устройств в виде турбулентного потока. Более тонкие микроструктуры плетеного типа могут быть получены при увеличении скорости охлаждения, при этом более тонкие микроструктуры плетеного типа увеличивают однородность пластической деформации. Например, увеличение скорости объемного охлаждения приблизительно от 10°C/с до приблизительно 15°C/с при охлаждении объекта от 1000°C до 900°C, может дать более тонкую микроструктуру плетеного типа и увеличить однородность пластической деформации.

10

15

20

30

Предложенные в изобретении способы могут быть реализованы в любой системе аддитивной технологии. Способы могут быть реализованы в системе, которая содержит закрытую камеру, заполненную инертным газом, чтобы обеспечить инертную атмосферу, когда весь процесс осуществляется в инертной атмосфере. Инертная атмосфера может представлять собой или содержать аргон, ксенон, неон, криптон, гелий или сочетания указанных газов, позволяющие осуществлять нанесение материала в инертной атмосфере.

Е. ПРИМЕРЫ

Последующие примеры включены в описание только для иллюстрации, и не преследуют цели ограничения объема вариантов осуществления изобретения, рассмотренных в описании.

35

Пример 1

Аdditивный процесс, основанный на плазменно-дуговой сварке проволоки, с высокой скоростью нанесения с применением сплава Ti-6Al-4V был использован без струйного устройства (А) и со струйным устройством (В), которое соответствует настоящему изобретению, и подает охлаждающий газ в
5 ходе аддитивного процесса. Использовался охлаждающий газ аргон, имеющий комнатную температуру. Расход охлаждающего газа составлял 20 л/мин; подача производилась от струйного устройства такого типа, какой изображен на фиг. 1. Скорость нанесения составила 5 кг/ч, при этом температура поверхности изготавливаемого изделия / температура между проходами была равной 650°C.
10 Скорость нанесения и температура были одинаковыми и при использовании струйного устройства, и без использования струйного устройства для подачи охлаждающего газа.

Микрофотографии результатов представлены на фиг. 5А и 5В. Фиг. 5А
15 изображает структуру металлического объекта, изготовленного по типовой аддитивной технологии. Структура изготовленного изделия на фиг. 5А содержит крупное зерно, при этом видны столбчатые структуры. Фиг. 5В демонстрирует благоприятные результаты, которые получаются, когда используется струйное устройство для подачи охлаждающего газа к лунке расплава в ходе аддитивного
20 процесса, как рассмотрено в настоящем описании. Зерно в структуре изготовленного изделия фиг. 5В приблизительно равноосное и мелкое. Соответственно, использование струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению, для подачи охлаждающего газа в ходе аддитивного процесса приводит к получению изделия со структурой более высокого качества.
25 Изготовленные изделия, обладающие такой оптимизированной структурой зерен, демонстрируют повышенную прочность, сопротивление усталости и долговечность.

Пример 2

30 Аддитивный процесс, основанный на плазменно-дуговой сварке проволоки, с высокой скоростью нанесения с применением сплава Ti-6Al-4V был использован с односторонней подачей охлаждающего газа на одну сторону лунки расплава при наплавлении одного ряда нити Ti-6Al-4V с использованием струйного устройства, которое соответствует настоящему изобретению.
35 Использовался охлаждающий газ аргон, имеющий комнатную температуру. Расход охлаждающего газа составлял 25 л/мин; подача производилась от струйного устройства такого типа, какой изображен на фиг. 1. Скорость нанесения

составила 5 кг/ч, при этом температура поверхности между проходами была равной 500°C. Охлаждающий газ аргон подавали на одну половину лунки расплава, при этом другую половину газом не обрабатывали. Этого добились, задействовав сопла струйного устройства только на одной стороне плавящего инструмента.

Результаты показаны на фиг. 6. Как можно видеть на фиг.6, необработанная сторона (на фигуре – правая часть) демонстрирует крупнозернистую структуру, столбчатую структуру. Структура зерен на обработанной стороне изготовленного изделия (на фиг. 6 – левая часть) содержит зерна металла, которые являются приблизительно равноосными и мелкими. Прерывистые линии на фигуре очерчивают типичный размер зерна и его форму с каждой стороны изделия. Размер зерен на обработанной стороне значительно меньше (максимальный размер зерна <2 мм, а средняя площадь <1 мм²) по сравнению с размером, получаемым способами традиционной аддитивной технологии, как показано справа. Необработанная сторона (правая) демонстрирует слабый наклон столбчатой структуры, что можно связать с тем влиянием, которое падающий поток охлаждающего газа оказывает на температурный градиент. Микрофотография также иллюстрирует то, что манипуляция с соплами струйного устройства может дать возможность получать спланированные по классу микроструктуры и задавать локальные свойства материала путем использования в аддитивной технологии струйного устройства, соответствующего настоящему изобретению.

Для специалистов должно быть очевидно, что в настоящее изобретение могут быть внесены различные изменения и предложены варианты, не выходящие за границы идеи или объема изобретения. Таким образом, предполагается, что настоящее изобретение охватывает варианты и модификации при условии, что они остаются в рамках объема изобретения, определяемого прилагаемой формулой изобретения и ее эквивалентами.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Ниже приведен перечень позиционных обозначений, использованных в описании и прилагаемых чертежах.

35	10	Первый трубопровод
	15	Впускное отверстие первого трубопровода
	20	Рассеиватель

	25	Сопло	
	30	Газовая струя	
	40	Источник охлаждающего газа	
	50	Источник охлаждающего газа	
5	60	Второй трубопровод	
	65	Впускное отверстие второго трубопровода	
	70	Рассеиватель	
	75	Сопло	
	80	Газовая струя	
10	85	Перемычка	
	90	Лунка расплава	
	95	Наплавленная нить	
	100	Струйное устройство	
	200	Плавящий инструмент	
15	250	Кронштейн	
	300	Устройство подачи проволоки	
	330	Плавящая дуга или луч	
	350	Металлическая проволока	
	375	Капли расплавленного металла	
20	400	Обрабатываемое изделие	
	415	Предварительно разогретая область	
	425	Лунка расплава	
	430	Зона отвердевания	
	435	Твердеющие кристаллы	
25	440	Противонаправленное отвердевание, вызванное падением охлаждающей газовой струи	
	450	Зона затвердевшего материала	
	480	Нанесенный слой	
	500	Второе струйное устройство	
30	525	Сопло	
	530	Струя охлаждающего газа	
	550	Датчик температуры	
	555	Область контроля температуры после отвердевания	
	560	Датчик температуры	
35	565	Область контроля температуры после превращений	
	570	Кронштейн	
	575	Кронштейн	

- 600 Плавящий инструмент
- 630 Плавящая дуга или луч
- D Направление перемещения

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Струйное устройство, содержащее:

первый трубопровод, содержащий:

5 впускное отверстие для приема охлаждающего газа, и
 отверстие, соединенное с соплом для выпуска охлаждающего газа;

второй трубопровод, содержащий:

 впускное отверстие для приема охлаждающего газа, и
 отверстие, соединенное с соплом для выпуска охлаждающего газа;

10 причем:

 первый трубопровод присоединен к плавящему инструменту,
образующему источник тепловой энергии, с одной стороны источника
тепловой энергии, а второй трубопровод присоединен к плавящему
инструменту с противоположной второй стороны источника тепловой
15 энергии;

 по меньшей мере одно сопло выполнено с возможностью
формирования турбулентного потока охлаждающего газа, когда
охлаждающий газ выходит из указанного сопла; при этом

20 сопла выполнены и расположены так, чтобы препятствовать
нагнетанию охлаждающего газа в сторону источника тепловой энергии.

2. Струйное устройство по п. 1, отличающееся тем, что дополнительно
содержит переключку для соединения первого и второго трубопроводов в единую
структуру.

25

3. Струйное устройство, содержащее:

трубопровод, содержащий:

впускное отверстие для приема охлаждающего газа, и

30 по меньшей мере одно отверстие, соединенное по меньшей
 мере с одним соплом для выпуска охлаждающего газа *in situ* на
поверхность свеженаплавленной металлической нити, нанесенной во
время осуществления аддитивного технологического процесса
изготовления металлических объектов; и

35 кронштейн, позволяющий крепить трубопровод к элементу системы для
осуществления аддитивного технологического процесса изготовления
металлических объектов, и подачи охлаждающего газа на поверхность
свеженаплавленной металлической нити.

4. Струйное устройство по любому из п.п. 1-3, отличающееся тем, что по меньшей мере одно сопло выполнено с возможностью формирования турбулентного потока охлаждающего газа, когда охлаждающий газ выходит из
5 указанного сопла.

5. Струйное устройство по п. 3 или п. 4, отличающееся тем, что содержит первый наружный трубопровод, средний трубопровод, смежный с первым наружным трубопроводом, и второй наружный трубопровод, смежный со средним
10 трубопроводом, причем каждый из них по-отдельности соединен со своим источником газа, при этом:

первый наружный трубопровод содержит по меньшей мере одно сопло, направленное на одну боковую поверхность наплавляемой нити;

средний трубопровод содержит по меньшей мере одно сопло,
15 направленное на верхнюю поверхность наплавляемой нити; и

второй наружный трубопровод содержит по меньшей мере одно сопло, направленное на другую боковую поверхность наплавляемой нити.

6. Струйное устройство по любому из п.п. 3-5, отличающееся тем, что
20 выполнено с возможностью крепления к устройству подачи проволоки или порошка.

7. Струйное устройство по любому из п.п. 1-6, отличающееся тем, что выполнено из теплостойкого материала или содержит теплостойкий материал.
25

8. Струйное устройство по п. 7, отличающееся тем, что теплостойкий материал выбран из следующих материалов: титан, титановый сплав, вольфрам, сплав вольфрама и его сплавы, нержавеющей сталь, сплав, содержащий хром и никель, и сплав, содержащий два или более из следующих элементов: никель,
30 железо, кобальт, медь, молибден, тантал, вольфрам и титан.

9. Струйное устройство по любому из п.п. 1-8, отличающееся тем, что дополнительно содержит расходомер, выполненный с возможностью измерения величины потока охлаждающего газа.
35

10. Струйное устройство по любому из п.п. 1-9, отличающееся тем, что по меньшей мере одно сопло расположено у дальнего конца трубопровода.

11. Струйное устройство по любому из п.п. 1-9, отличающееся тем, что по меньшей мере одно сопло расположено относительно трубопровода так, что угол между соплом и трубопроводом составляет 90° или менее.

5

12. Струйное устройство по любому из п.п. 1-11, отличающееся тем, что один или более трубопроводов содержит:

множество сопел; и

10 множество каналов, труб, трубок или линий внутри каждого трубопровода, причем каждый канал, труба, трубка или линия отдельно присоединена к одному соплу из указанного множества сопел.

13. Струйное устройство по любому из п.п. 1-12, отличающееся тем, что сопло имеет цилиндрическую форму.

15

14. Струйное устройство по любому из п.п. 1-13, отличающееся тем, что:

сопло имеет поперечное сечение, форма которого выбрана среди следующих: круглая, овальная, овоидная, квадратная, прямоугольная, ромбовидная, звездообразная, пятиугольная, шестиугольная и восьмиугольная;

20 или

сопло имеет поперечное сечение асимметричной формы.

15. Струйное устройство по любому из п.п. 1-14, отличающееся тем, что сопло имеет длину в диапазоне приблизительно от 5 мм до приблизительно

25 50 мм.

16. Струйное устройство по любому из п.п. 1-15, отличающееся тем, что сопло имеет толщину стенки в диапазоне приблизительно от 0,1 мм до приблизительно 5 мм.

30

17. Струйное устройство по любому из п.п. 1-16, отличающееся тем, что сопло содержит отверстие, через которое протекает охлаждающий газ.

18. Струйное устройство по п. 17, отличающееся тем, что:

35

указанное отверстие имеет поперечное сечение, форма которого идентична форме поперечного сечения сопла или отличается от последней, при этом форма поперечного сечения отверстия выбрана среди следующих: круглая,

овальная, овоидная, квадратная, прямоугольная, ромбовидная, шестиугольная и восьмиугольная; или

отверстие имеет поперечное сечение асимметричной формы.

5 19. Струйное устройство по п. 17 или п. 18, отличающееся тем, что указанное отверстие имеет диаметр, равный внутреннему диаметру сопла или меньший внутреннего диаметра сопла.

10 20. Струйное устройство по любому из п.п. 17-19, отличающееся тем, что указанное отверстие имеет диаметр в диапазоне приблизительно от 1 мм до приблизительно 5 мм.

15 21. Струйное устройство по любому из п.п. 1-20, отличающееся тем, что трубопровод содержит дефлектор, выполненный с возможностью взаимодействия с охлаждающим газом, протекающим через трубопровод.

22. Струйное устройство по любому из п.п. 1-21, отличающееся тем, что:

20 (a) трубопровод дополнительно содержит выступ или впадину или их сочетание на пути протекания охлаждающего газа через трубопровод, для возмущения ламинарного течения охлаждающего газа, чтобы способствовать созданию турбулентного потока охлаждающего газа; или

25 (b) сопло дополнительно содержит выступ или впадину или их сочетание на пути протекания охлаждающего газа через сопло, для возмущения ламинарного течения охлаждающего газа, чтобы способствовать созданию турбулентного потока охлаждающего газа; или

30 (c) отверстие сопла дополнительно содержит выступ или впадину или их сочетание на пути протекания охлаждающего газа через отверстие, для возмущения ламинарного течения охлаждающего газа, чтобы способствовать созданию турбулентного потока охлаждающего газа; или

30 (d) имеет место любая комбинация (a), (b) и (c).

35 23. Струйное устройство по любому из п.п. 1-22, отличающееся тем, что дополнительно содержит теплоизолятор, чтобы термически изолировать струйное устройство от плавящего инструмента, или струйное устройство от лунки расплава на обрабатываемом изделии, или струйное устройство от устройства подачи проволоки.

24. Струйное устройство по любому из п.п. 1-23, отличающееся тем, что дополнительно содержит источник охлаждающего газа.

25. Струйное устройство по п. 24, отличающееся тем, что каждый
5 трубопровод соединен со своим собственным источником охлаждающего газа.

26. Струйное устройство по п. 24 или п. 25, отличающееся тем, что источник охлаждающего газа содержит регулятор, выполненный с возможностью настройки вручную или автоматически для регулирования величины потока
10 охлаждающего газа, подаваемого в трубопровод.

27. Система для выращивания металлического объекта с помощью аддитивной технологии, содержащая:

первый плавящий инструмент для предварительного разогрева материала
15 основы до нанесения расплавленного металла;

второй плавящий инструмент для плавления исходного металла на капли расплавленного металлического материала, которые наносятся на предварительно разогретый материал основы или в лунку расплава на материале основы;

20 струйное устройство по любому из п.п. 1-26 для направления потока охлаждающего газа поперек лунки расплава или в лунку расплава, или в затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или в затвердевший материал или в любое сочетание указанных мест;

25 источник охлаждающего газа;

систему для позиционирования и перемещения материала основы относительно нагревательного устройства и струйного устройства; и

управляющую систему, выполненную с возможностью считывания модели конструкции металлического объекта, который необходимо сформировать, и
30 использования модели конструкции для регулирования положения и перемещения системы для позиционирования и перемещения материала основы, и приведения в действие нагревательного устройства и струйного устройства, так чтобы осуществлять выращивание физического объекта путем наплавления последовательных слоев металлического материала на материал
35 основы.

28. Система по п. 27, отличающаяся тем, что дополнительно содержит компьютер.

29. Система по п. 27 или п. 28, отличающаяся тем, что модель конструкции
5 представляет собой модель в системе автоматизированного проектирования (CAD-модель) подлежащего изготовлению металлического объекта.

30. Система по любому из п.п. 27-29, отличающаяся тем, что:

10 первый плавящий инструмент представляет собой плазмотрон, лазерное устройство, лазерную систему с коаксиальным газопорошковым соплом или любое сочетание указанных устройств; и

второй плавящий инструмент представляет собой плазмотрон, лазерное устройство, лазерную систему с коаксиальным газопорошковым соплом или любое сочетание указанных устройств.

15

31. Система по любому из п.п. 27-30, отличающаяся тем, что второй плавящий инструмент представляет собой плазмотрон, причем плазмотрон электрически соединен с источником питания постоянного тока, так что электрод плазмотрона является катодом, а расходуемый электрод является анодом.

20

32. Система по любому из п.п. 27-31, отличающаяся тем, что струйное устройство соединено со вторым плавящим инструментом, чтобы направлять охлаждающий газ поперек лунки расплава или в лунку расплава или на затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз
25 лунки расплава, или в любое сочетание указанных мест.

33. Система по любому из п.п. 27-32, отличающаяся тем, что по меньшей мере одно сопло струйного устройства выполнено с возможностью формирования турбулентного потока охлаждающего газа.

30

34. Система по любому из п.п. 27-33, отличающаяся тем, что дополнительно содержит устройство подачи проволоки, выполненное с возможностью доставки проволоки ко второму плавящему инструменту.

35

35. Система по п. 34, отличающаяся тем, что дополнительно содержит дополнительное струйное устройство, соединенное с устройством подачи проволоки или с элементом системы и расположенное с возможностью

направлять охлаждающий газ по меньшей мере из одного сопла на поверхность свеженаплавленного затвердевшего материала.

36. Система по п. 35, отличающаяся тем, что дополнительно содержит:

- 5 первый датчик температуры, прикрепленный к элементу системы и расположенный с возможностью измерять температуру поверхности свеженаплавленного затвердевшего материала до подачи охлаждающего газа;
- 10 второй датчик температуры, прикрепленный к элементу системы и расположенный с возможностью измерять температуру поверхности нанесенного свеженаплавленного материала после подачи охлаждающего газа.

37. Система по п. 35 или 36, отличающаяся тем, что указанным элементом системы является кронштейн, удерживающий устройство подачи проволоки, или кронштейн, удерживающий плавящий инструмент, или кронштейн, удерживающий устройство подачи проволоки и плавящий инструмент.

38. Система по п. 37, отличающаяся тем, что каждый датчик температуры – первый и второй – представляет собой инфракрасный термометр.

- 20 39. Система по любому из п.п. 36-38, отличающаяся тем, что струйное устройство выполнено с возможностью направления охлаждающего газа на поверхность в области аллотропического превращения.

- 25 40. Система по любому из п.п. 36-39, отличающаяся тем, что свеженаплавленным затвердевшим материалом является сплав Т-6Al-4V, а струйное устройство выполнено с возможностью направления охлаждающего газа на поверхность в зоне β - α перехода.

- 30 41. Система по любому из п.п. 27-40, отличающаяся тем, что дополнительно содержит компьютер.

42. Система по п. 41, отличающаяся тем, что компьютер выполнен с возможностью коммуникации с одним или более элементами системы.

- 35 43. Система по любому из п.п. 27-42, отличающаяся тем, что заключена в закрытую камеру, содержащую инертную атмосферу.

44. Система по п. 43, отличающаяся тем, что инертная атмосфера содержит аргон, неон, ксенон, криптон, гелий или сочетание указанных газов.

45. Способ изготовления трехмерного объекта из металлического материала по аддитивной технологии, при которой объект формируют путем сплавления друг с другом последовательных слоев металлического материала, наносимых на материал основы, включающий этапы, на которых:

используют первый плавящий инструмент для предварительного разогрева по меньшей мере части поверхности материала основы;

используют второй плавящий инструмент для разогрева и плавления металлического материала, так чтобы наносить данный расплавленный металлический материал на предварительно разогретую область материала основы, формируя лунку расплава;

используют струйное устройство по любому из п.п. 1-26, чтобы направлять охлаждающий газ поперек лунки расплава или в лунку расплава или на затвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или в любое сочетание указанных мест; и

перемещают материал основы относительно положения первого и второго нагревательных устройств по заранее установленной схеме, так чтобы последовательно наносимый расплавленный металлический материал затвердевал, образуя трехмерный объект.

46. Способ по п. 45, отличающийся тем, что дополнительно включает использование второго струйного устройства, чтобы направлять охлаждающий газ на свеженаплавленный затвердевший материал в области превращений твердого состояния.

47. Способ по п. 46, отличающийся тем, что свеженаплавленным затвердевшим материалом является сплав T-6Al-4V, а второе струйное устройство выполнено с возможностью направления охлаждающего газа на поверхность в зоне β - α перехода.

48. Способ по п. 46 или п. 47, отличающийся тем, что охлаждающий газ, направленный на свеженаплавленный затвердевший материал, обеспечивает скорость объемного охлаждения приблизительно от 10°C/с до приблизительно 15°C/с.

49. Способ по любому из п.п. 45-48, отличающийся тем, что первый плавящий инструмент выполнен с возможностью предварительного разогрева материала основы в том месте, куда должен быть нанесен расплавленный металлический материал, или формирования лунки расплава в материале основы в том месте, куда должен быть нанесен металлический материал, или с
5 возможностью обоих указанных действий.

50. Способ по любому из п.п. 45-49, отличающийся тем, что первым плавящим инструментом является плазмотрон, и вторым плавящим
10 инструментом является плазмотрон.

51. Способ по любому из п.п. 45-49, отличающийся тем, что первым плавящим инструментом является лазерное устройство, а вторым плавящим инструментом является плазмотрон.
15

52. Способ по п. 51, отличающийся тем, что плазмотрон электрически соединен с источником питания постоянного тока, так что электрод плазмотрона является катодом, а металлический материал представляет собой расходуемый электрод, который является анодом.
20

53. Способ по любому из п.п. 45-49, отличающийся тем, что первым плавящим инструментом является плазмотрон, а вторым плавящим инструментом является лазерное устройство.

54. Способ по любому из п.п. 45-49, отличающийся тем, что первый плавящий инструмент представляет собой лазерную систему с коаксиальным газопорошковым соплом, а второй плавящий инструмент представляет собой лазерное устройство.
25

55. Способ по любому из п.п. 45-49, отличающийся тем, что первый плавящий инструмент представляет собой лазерную систему с коаксиальным газопорошковым соплом, а второй плавящий инструмент представляет собой плазмотрон.
30

56. Способ по любому из п.п. 45-55, отличающийся тем, что охлаждающий газ представляет собой инертный газ, выбранный среди следующих газов: аргон, гелий, неон, ксенон, криптон и их сочетания.
35

57. Способ по любому из п.п. 45-56, отличающийся тем, что величина расхода охлаждающего газа составляет приблизительно от 1 л/мин до приблизительно 160 л/мин.

5

58. Способ по любому из п.п. 45-57, отличающийся тем, что охлаждающий газ подают в виде постоянного потока, или периодически или импульсами.

59. Способ по любому из п.п. 45-58, отличающийся тем, что температура охлаждающего газа составляет 25°C или менее.

10

60. Способ по любому из п.п. 45-59, отличающийся тем, что:

по меньшей мере одно сопло производит турбулентный поток охлаждающего газа; или

15 скорость охлаждающего газа достаточна, чтобы вызывать турбулентное течение охлаждающего газа, выходящего из сопел.

61. Способ по любому из п.п. 45-60, отличающийся тем, что охлаждающий газ обладает турбулентным характером течения вблизи лунки расплава, или поперек лунки расплава, или при попадании на лунку расплава, или при попадании на отвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или при попадании на сочетание указанных мест.

20

62. Способ по любому из п.п. 45-61, отличающийся тем, что струйное устройство содержит по меньшей мере два сопла, выполненных с возможностью получения газовых струй, которые сталкиваются друг с другом, образуя турбулентный поток вблизи лунки расплава, или поперек лунки расплава, или при попадании на лунку расплава, или при попадании на отвердевший материал, расположенный вблизи границы жидкой и твердой фаз лунки расплава, или при попадании на сочетание указанных мест.

25

30

63. Способ по любому из п.п. 45-62, отличающийся тем, что струйное устройство выполнено с возможностью подачи охлаждающего газа так, чтобы он охватывал длину приблизительно от 5 мм до приблизительно 50 мм в направлении перемещения формируемого трехмерного объекта.

35

64. Способ по любому из п.п. 45-63, отличающийся тем, что струйное устройство выполнено с возможностью подачи охлаждающего газа так, чтобы он охватывал длину приблизительно от 15 мм до приблизительно 30 мм в направлении перемещения формируемого трехмерного объекта.

5

65. Способ по любому из п.п. 45-64, отличающийся тем, что охлаждающий газ направляют на затвердевший металл с большей величиной расхода, чем охлаждающий газ, направляемый в лунку расплава или поперек поверхности лунки расплава.

10

66. Способ по любому из п.п. 45-65, отличающийся тем, что каждый этап способа выполняют в закрытой камере, содержащей инертную атмосферу.

15

67. Способ по п. 66, отличающийся тем, что инертная атмосфера содержит аргон, неон, ксенон, криптон, гелий или сочетание указанных газов.

20

68. Способ минимизации или исключения образования крупнозернистых столбчатых структур при отвердевании в металлическом изделии, изготавливаемом по аддитивной технологии, включающий подачу турбулентной струи охлаждающего газа на свободную поверхность лунки расплава посредством струйного устройства по любому из п.п 1, 2 или 5-26, причем струи охлаждающего газа инициируют и/или ускоряют рост противонаправленного фронта отвердевания у поверхности лунки расплава.

25

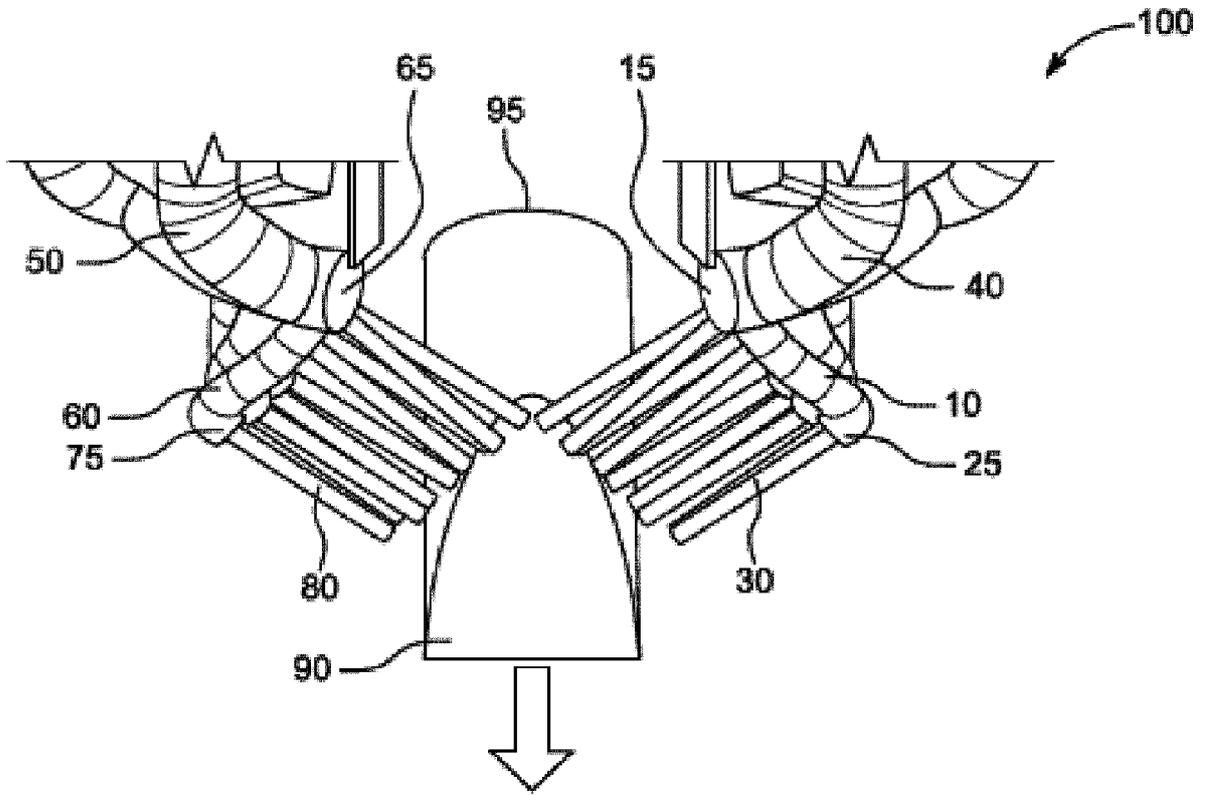
69. Способ оптимизации микроструктуры металлического изделия, изготавливаемого по аддитивной технологии, включающий подачу турбулентной струи охлаждающего газа посредством струйного устройства по любому из п.п. 3-26, на свеженаплавленный затвердевший материал *in situ* для увеличения скорости объемного охлаждения по меньшей мере на 5°C/с.

30

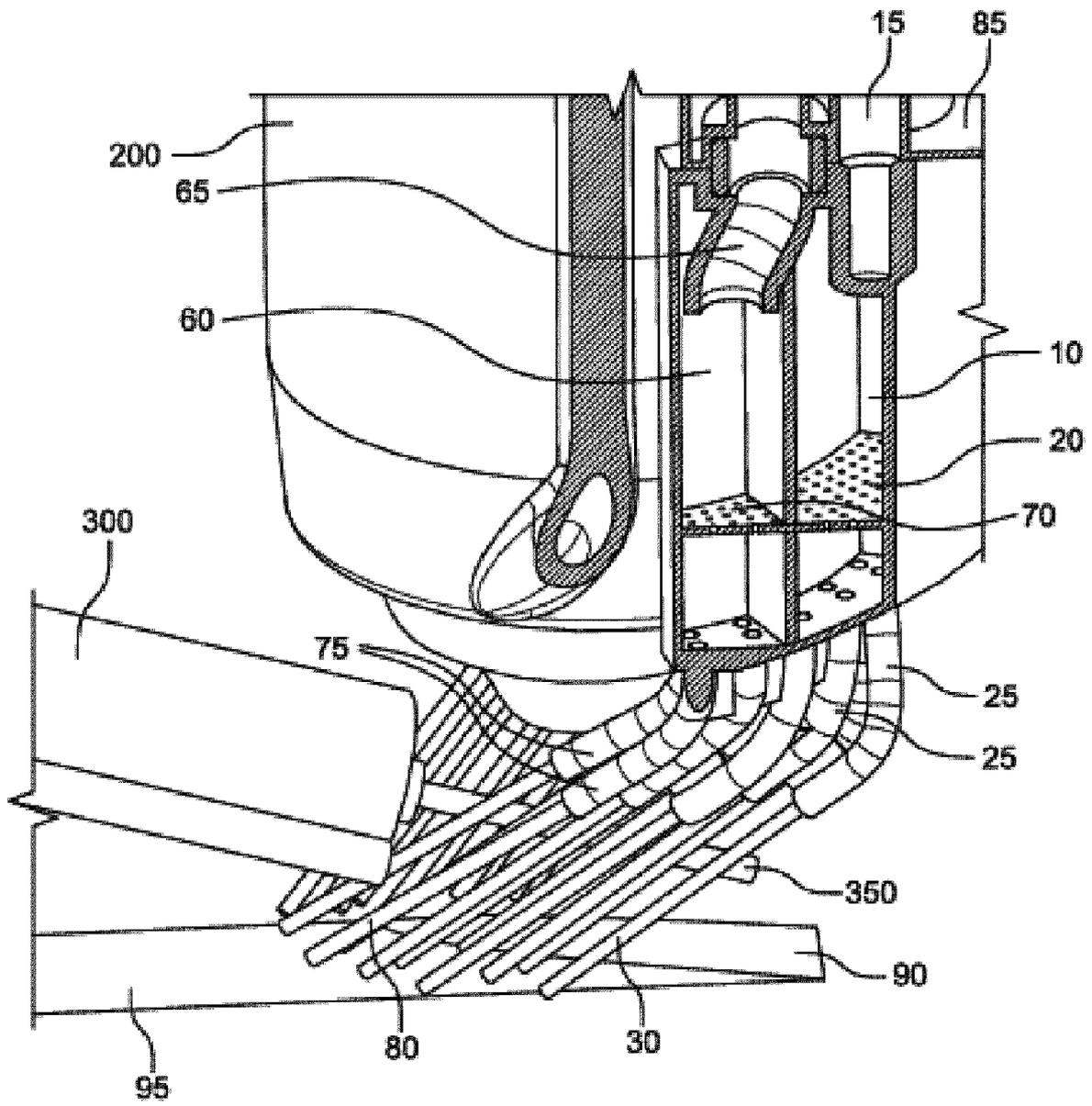
35

70. Способ принудительного охлаждения *in situ* металлического объекта, изготавливаемого по аддитивной технологии, включающий подачу струи охлаждающего газа *in situ* на свеженаплавленный отвердевший материал для увеличения скорости охлаждения материала, и достижения скорости объемного охлаждения от приблизительно 10°C/с до приблизительно 25°C/с, или скорости охлаждения поверхности от приблизительно 80°C/с до 150°C/с, измеренной на поверхности, на которую направлен охлаждающий газ.

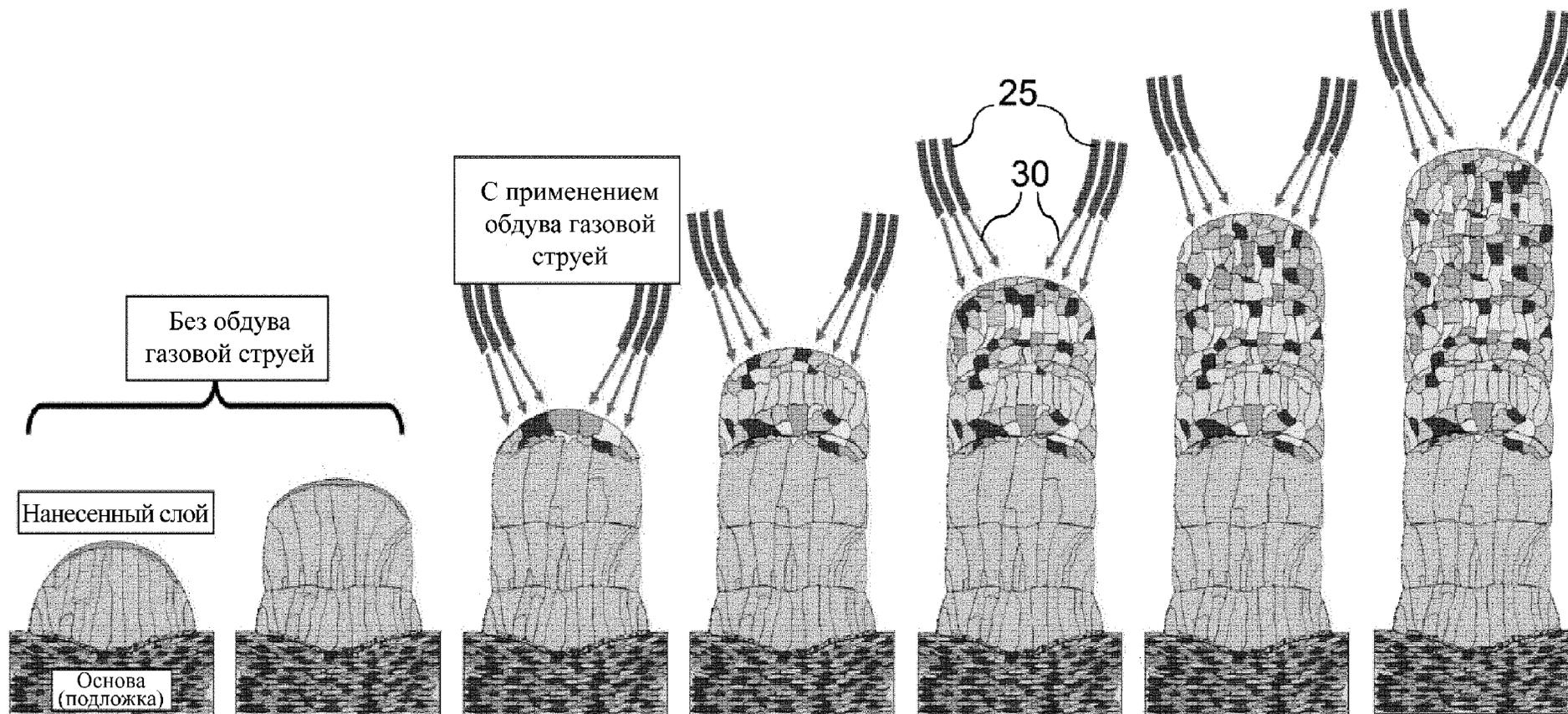
71. Способ увеличения однородности пластической деформации в объекте из титанового сплава, изготавливаемого по аддитивной технологии, включающий подачу струй охлаждающего газа *in situ* посредством струйного устройства по любому из п.п. 3-26, на поверхность области свеженаплавленного отвердевшего материала объекта для увеличения скорости охлаждения указанной области, и тем самым содействия формированию микроструктуры плетеного типа вместо обычно получаемой колониально/ламеллярной микроструктуры.



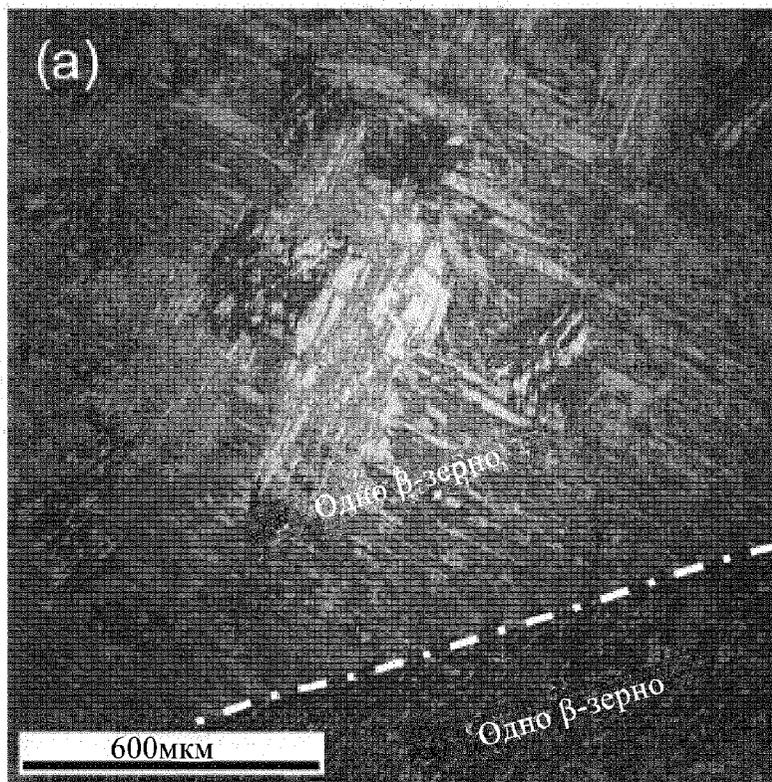
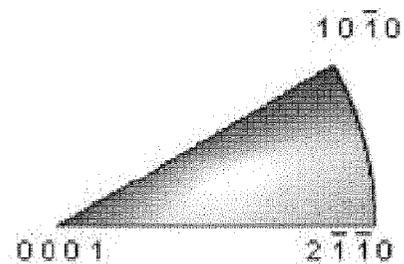
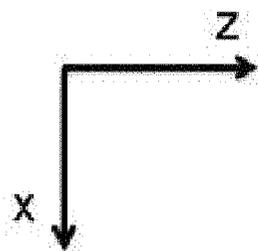
ФИГ. 1



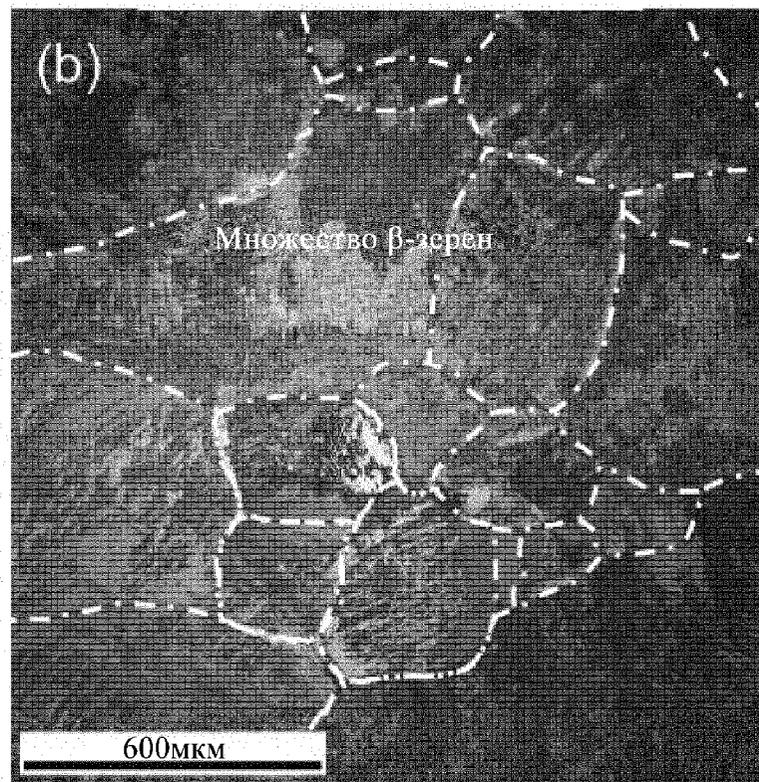
ФИГ. 2



ФИГ. 3

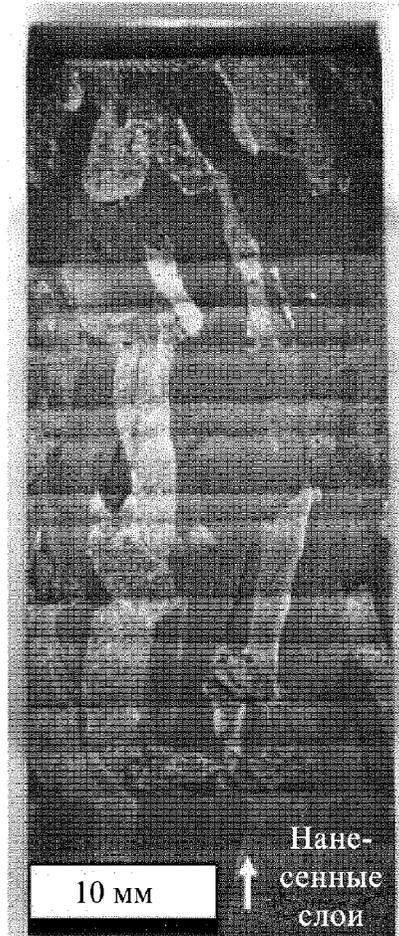


ФИГ. 4А



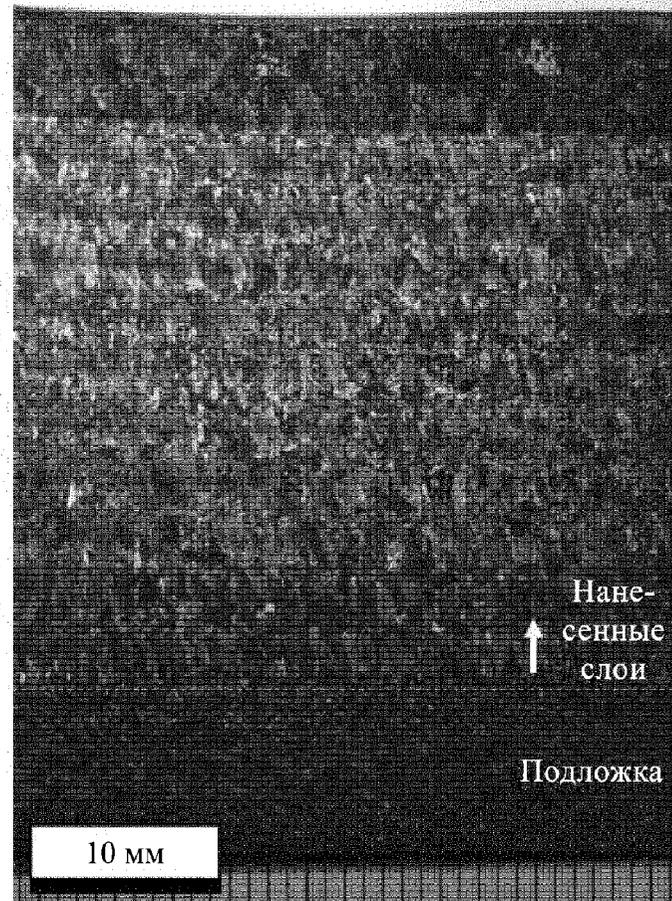
ФИГ. 4В

Типичная структура
(Ti-6Al-4V)

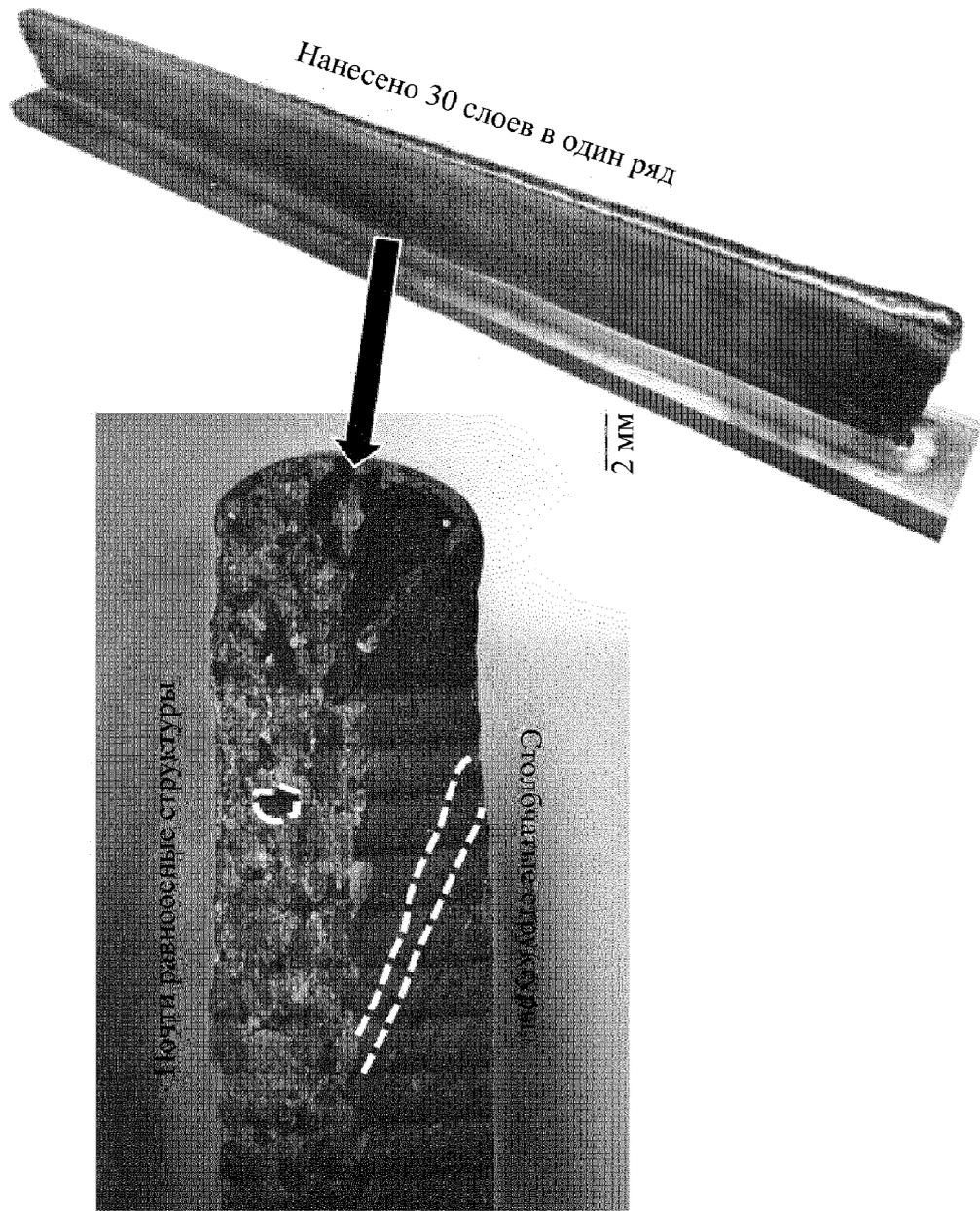


ФИГ. 5А

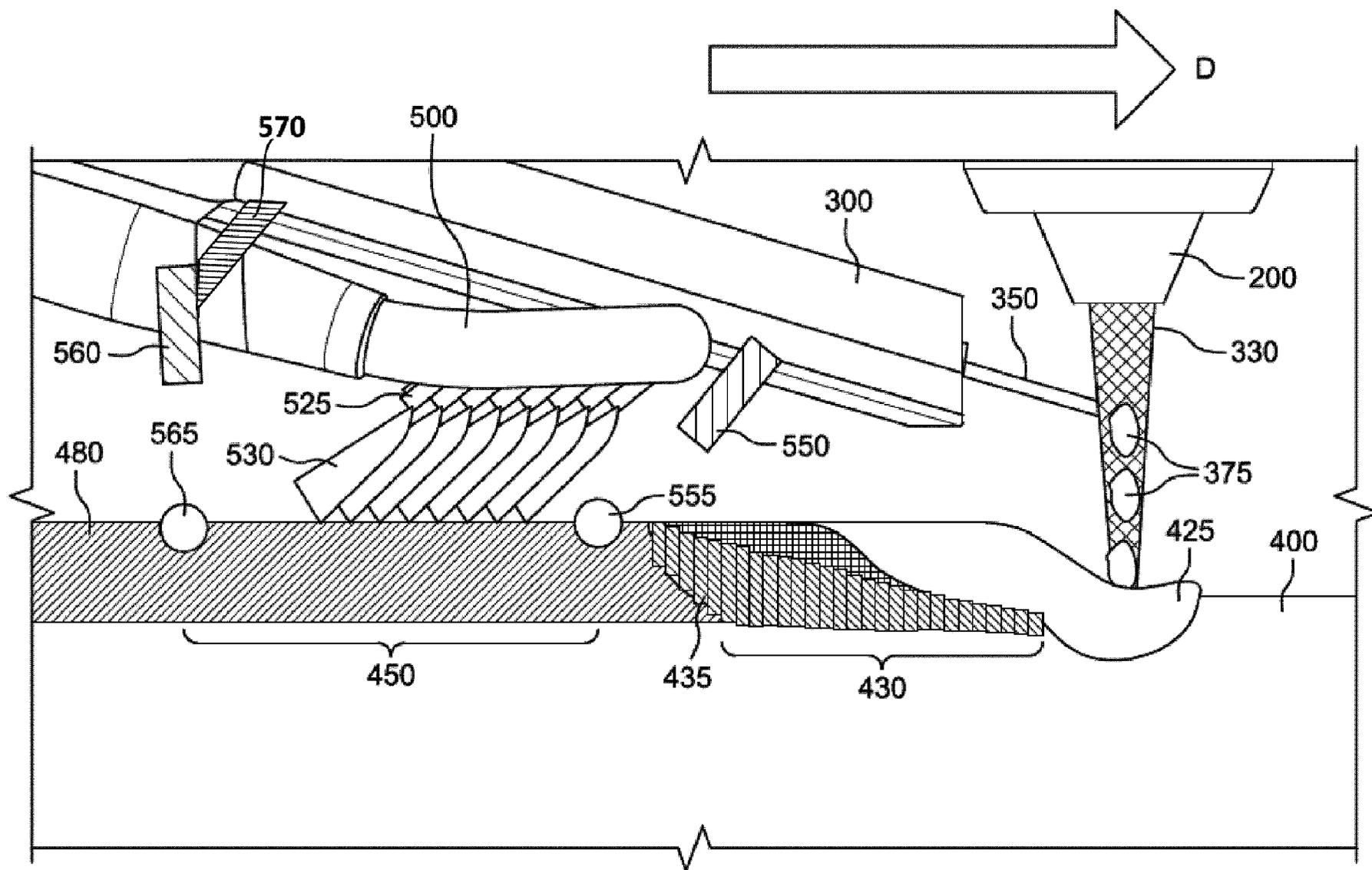
Структура при обдуве лунки расплава струей газа
(Ti-6Al-4V)



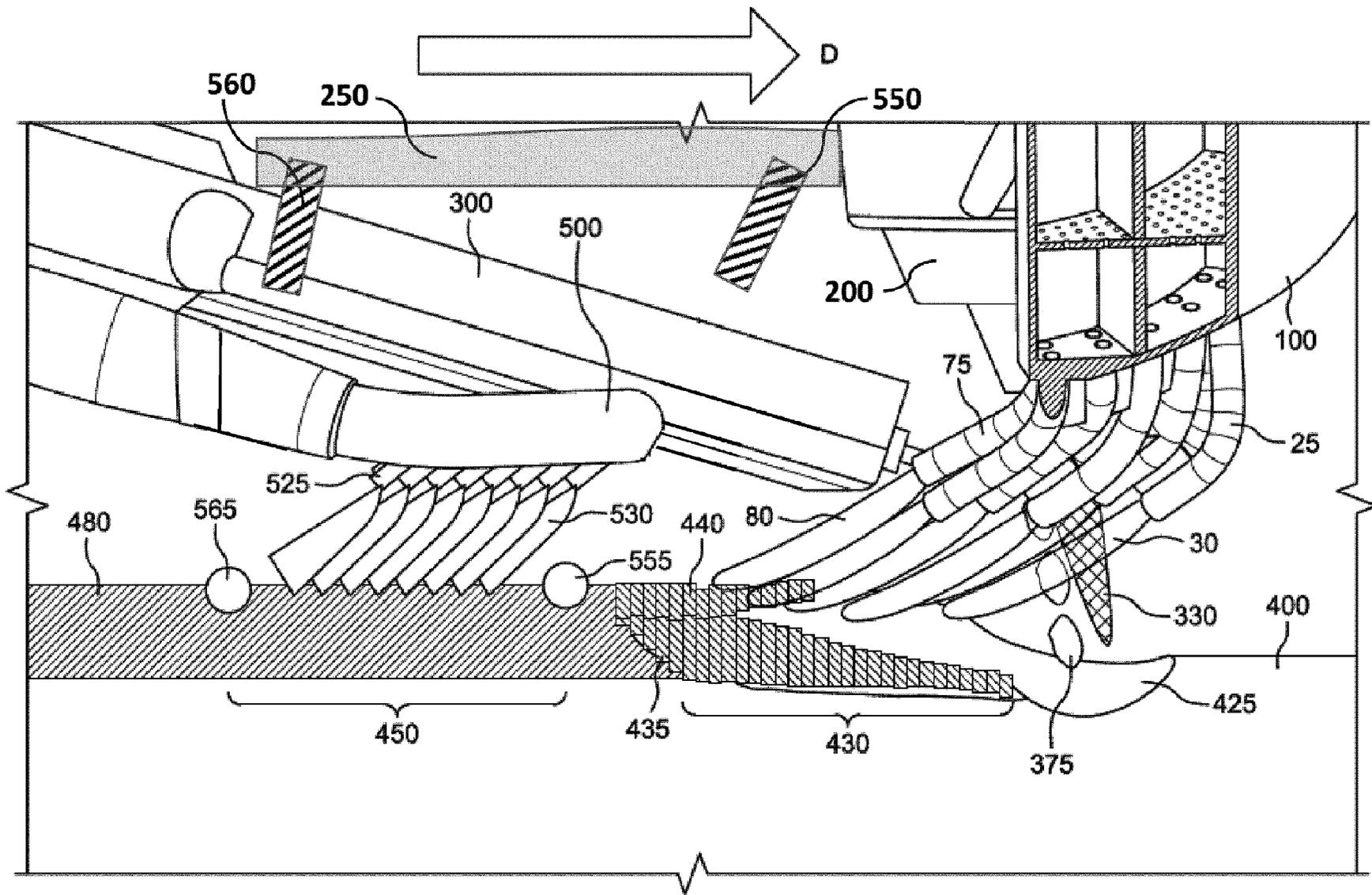
ФИГ. 5В



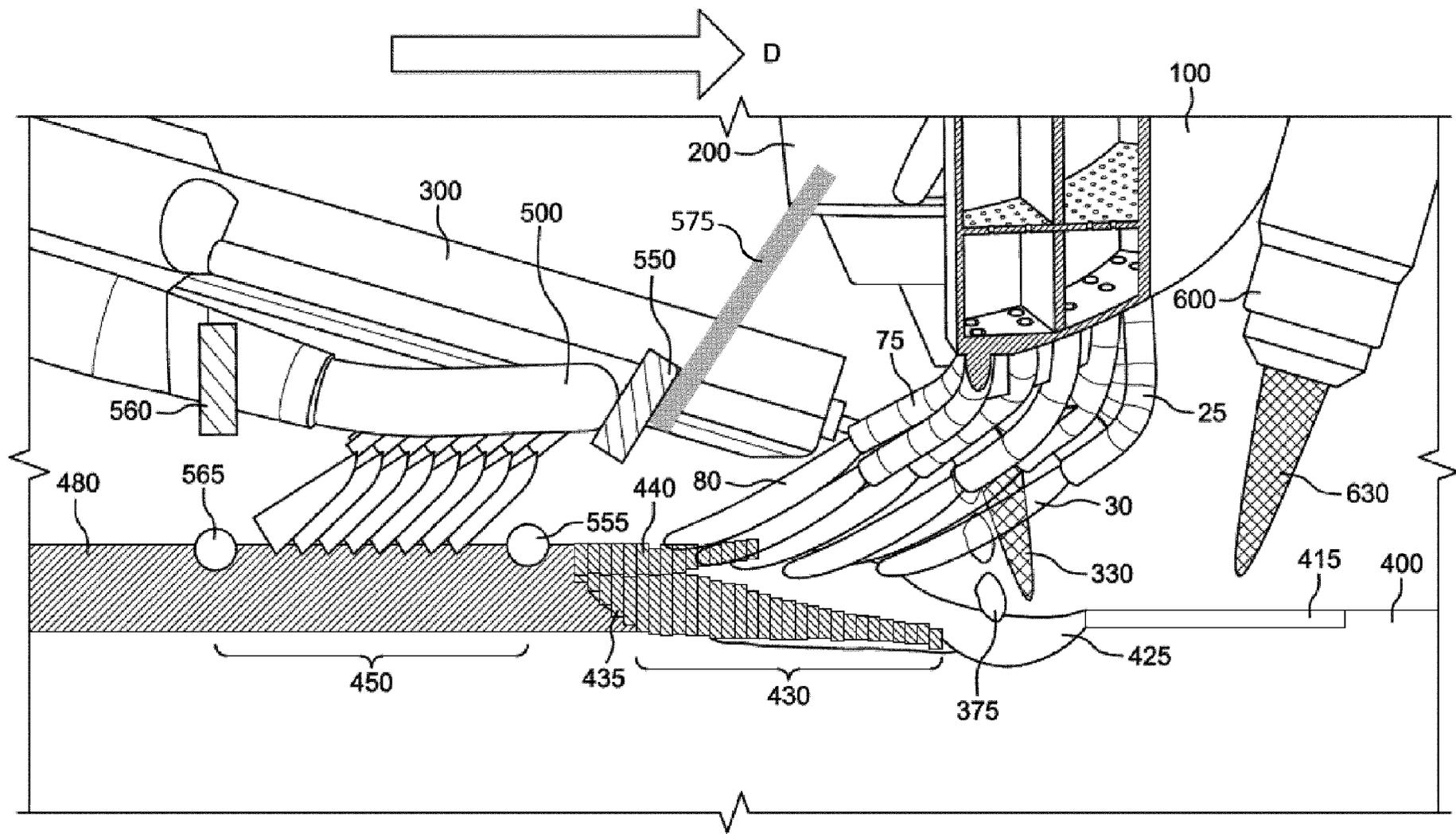
ФИГ. 6



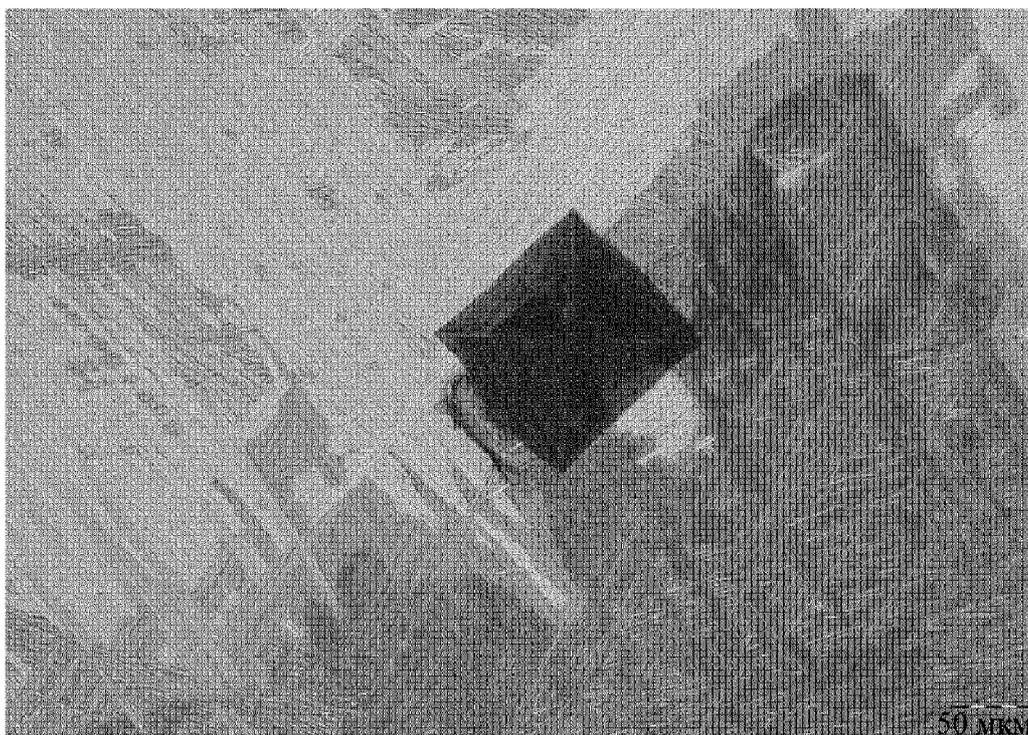
ФИГ. 7



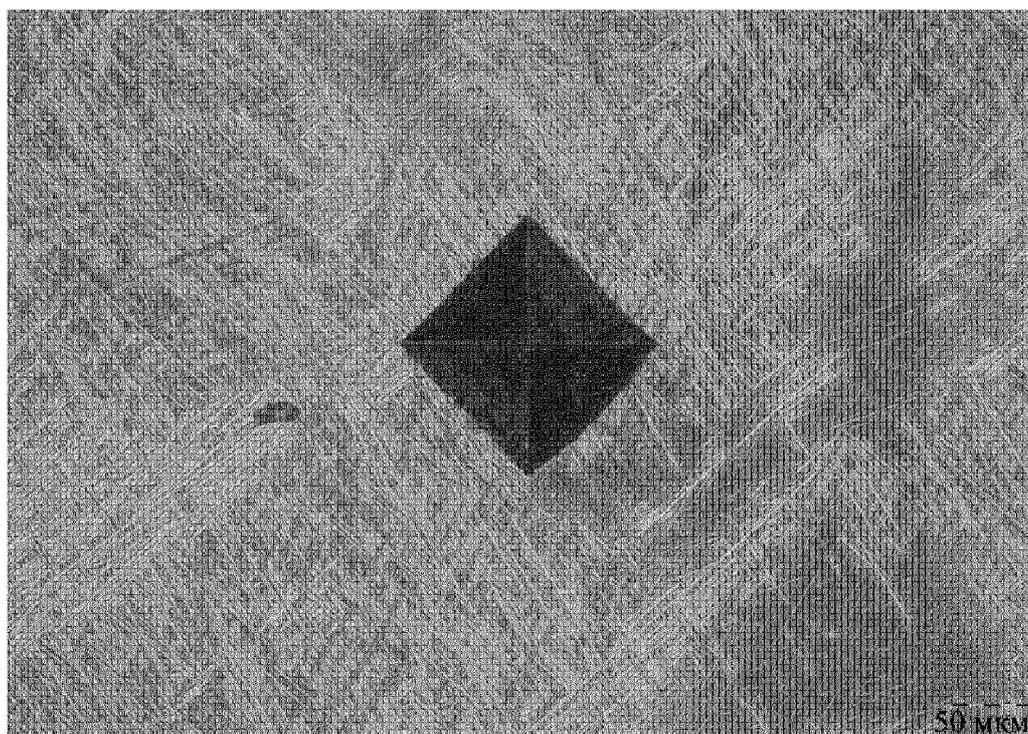
ФИГ. 8



ФИГ. 9



ФИГ. 10А



ФИГ. 10В