

УДК 621.373.826

DOI:10.30987/2223-4608-2021-8-18-24

А.Г. Григорьянц, д.т.н.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)
E-mail: mt12@bmstu.ru

Аддитивные технологии получения изделий из композиционных материалов

Рассмотрены две основные аддитивные технологии выращивания деталей из металлических порошков – селективное лазерное плавление и коаксиальное лазерное плавление.

Ключевые слова: аддитивные технологии; селективное лазерное плавление; коаксиальное лазерное плавление; композиционные материалы.

A.G. Grigoryants, Dr. Sc. Tech.
(Bauman State Technical University of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

Additive technologies for manufacturing composite products

There are considered two basic additive technologies for metal powder parts growing – selective laser melting and coaxial laser melting.

Keywords: additive technologies; selective laser melting; coaxial laser melting; composites.

В начале XXI века получили распространение аддитивные технологии выращивания деталей из металлических порошков. Наибольшее развитие получили две основные технологии – это селективное лазерное плавление и коаксиальное лазерное плавление.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП) является новейшей разработкой аддитивного производства. Эта технология позволяет осуществить быстрое формирование сложных по форме изделий, значительно уменьшить процедуру механической обработки, сократить цикл производства и уменьшить цены и риски при разработке новых изделий [1, 2]. Общая схема процесса показана на рис. 1.

На подложку рабочей камеры наносится тонкий слой порошкового материала посредством ролика или ракеля из бункера с порошком. Слой переплавляется лазерным излучением в заданных участках согласно управляющей программе. Далее рабочая подложка опускается на высоту слоя, подложка бункера

с порошком – поднимается. Наносится новый слой и процесс повторяется до полного формирования изделия.

В настоящее время технология СЛП широко охватывает самые различные отрасли производства. В последние годы прочность и твердость традиционных сталей не могут удовлетворить некоторые требования для деталей, несущих большую нагрузку и требующих высокую износостойкость. Металломатричные композиты (ММК) имеют много преимуществ, сочетая свойства матрицы и армирующих элементов: теплопроводность; электропроводность; износостойкость; небольшой коэффициент теплового расширения; хорошее демпфирование. Они широко используются в авиации, космической промышленности, атомной энергетике и других областях. Большое количество смежных исследований показало, что механические свойства сталей и сплавов могут быть улучшены путем добавления керамических частиц.

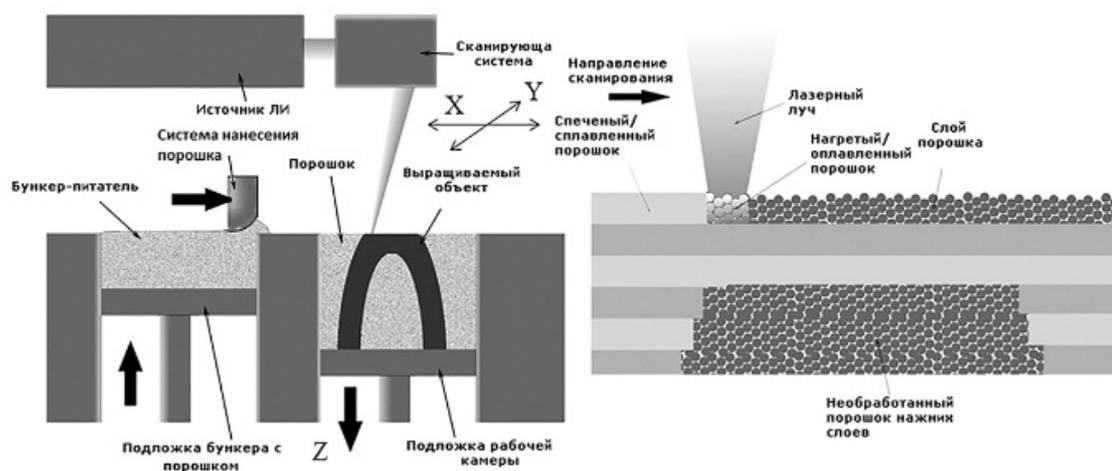


Рис. 1. Схема процесса селективного лазерного плавления

В литературе прослеживается интерес к получению композиционных материалов в процессе выращивания методом СЛП. Исследованы различные материалы матрицы и армирующих элементов.

Дальнейшим совершенствованием аддитивной технологии селективного лазерного плавления является разработка и изготовление комплекса СЛП-250 (рис. 2), не уступающего зарубежным аналогам.



Рис. 2. Комплекс для аддитивной технологии СЛП-250

Процесс осуществляется в вакуумной камере, заполняемой защитным газом (аргон; гелий; азот; углекислый газ и др.) с системой фильтрации газов, с размерами рабочей зоны не более 250x250x250 мм. Скорость выращивания составляет до 15 см³/ч, мощность волоконного лазера не менее 400 Вт, имеется система подогрева рабочей платформы до 200 °С.

Применяемые порошковые материалы: различные стали, титановые, алюминиевые, никелевые сплавы, композиции кобальт-хром и др. Предусмотрена система удаления из камеры выращивания побочных продуктов плавления и наддув в камеру в процессе выращивания чистых защитных газов с полным контролем атмосферы в рабочей камере.

Вся система обладает высокой надежностью и стабильностью, что немаловажно при многочасовой работе установки. Математическое обеспечение позволяет программировать технологический процесс на стадии обработки трехмерной модели детали, использовать различные алгоритмы технологических приемов выращивания и проводить эмуляцию всего процесса. Также заложена возможность корректировки геометрии детали в ходе ее выращивания.

На этой установке выполнен большой объем технологических разработок на разнообразных материалах с изготовлением деталей для различных применений. Один из комплексов СЛП-250 установлен на ведущем предприятии страны и используется для изготовления сложных деталей и узлов в производстве.

Весьма перспективным процессом «выращивания» деталей и изделий аддитивной технологией является коаксиальное лазерное плавление (КЛП), схема которого показана на рис. 3.

Подача порошка в зону действия лазерного излучения с помощью транспортирующего газа аргона, который, проходя через устройство для подачи порошка, захватывает с собой определенное количество порошка, формируя газопорошковую смесь. Далее эта смесь по-

ступает в лазерное технологическое сопло и подаётся через сопло соосно лазерному лучу. Мощное лазерное излучение, сфокусированное оптической системой, расплавляет как подложку, так и газопорошковую смесь.

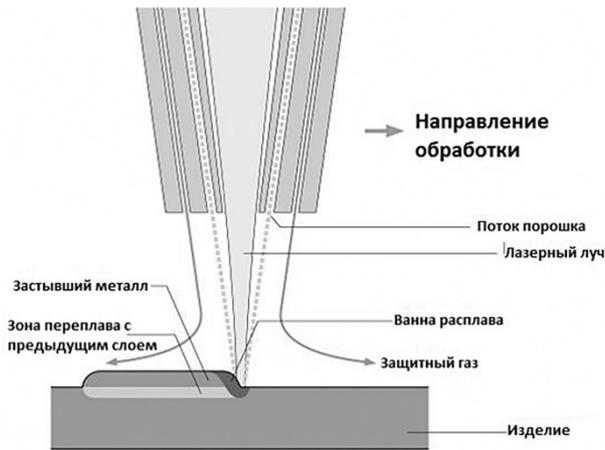


Рис. 3. Схема процесса коаксиального лазерного плавления

В отличие от процесса СЛП данный способ обеспечивает значительно более высокую производительность (в десятки раз); возможность получать изделия с градиентными свойствами за счёт динамического регулирования расходов порошков из различных питателей; возможность выращивания крупногабаритных деталей и узлов машин.

Для реализации технологии коаксиального лазерного плавления (КЛП) впервые в отечественной практике разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию комплекс прямого выращивания методом послойной лазерной наплавки деталей из порошковых материалов (рис. 4).

Эта установка изготовлена на малом предприятии МГТУ им. Н.Э. Баумана ООО «Московский центр лазерных технологий». Комплекс оснащен волоконным лазером со средней выходной мощностью 3 кВт, размер пятна в процессе обработки может изменяться от 300 до 3000 мкм. Данная установка обеспечивает высокую производительность выращивания до 400 см³ /ч. На этой установке можно изготавливать детали габаритом 400×400×400 мм и массой около 500 кг. Погрешность позиционирования составляет 20 мкм. Габариты установки 2×2,2×3 м.

По конструкции установка КЛП-400 представляет собой пятиосевую кинематическую схему с технологической лазерной головкой коаксиальной подачи порошка. Все системы перемещения установки расположены на гра-

нитном основании. Подобная система позволяет осуществлять процесс выращивания с высокой точностью. Используемые линейные двигатели не имеют люфтов, которые неизбежны в традиционных шариковинтовых передачах с редукторами и без них. Обратная связь по положению позволяет в любой момент времени контролировать положение технологической головки, а также положения выращиваемой детали и технологической оснастки внутри установки.

В результате крепления линейных направляющих непосредственно на гранитном основании достигается максимальная жесткость всей конструкции. Наклонно-поворотный стол также закреплен на гранитном основании. Поскольку поворотный стол управляется без редукторов, то реализована возможность позиционирования детали в широком диапазоне углов с точностью в несколько угловых секунд. Разработанная установка КЛП-400 достаточно проста в управлении и позволяет быстро проводить перенастройку на новую деталь. Контроль процесса выращивания осуществляется встроенным в ЧПУ установки датчиками. Поскольку диаметр лазерного луча изменяется непосредственно ЧПУ, то имеется возможность чередования участков с маленькой и большой шириной валиков в любом слое при изготовлении детали.



Рис. 4. Общий вид отечественной установки КЛП-400

Следует подчеркнуть, что система оперативного изменения диаметра пятна излучения позволяет проводить после выращивания такие технологические операции, как лазерная термообработка и лазерная полировка поверхности.

В «Московском центре лазерных технологий» и на кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнено большое количество исследований и разработаны технологии аддитивного выращивания изделий из разнообразных сталей, сплавов и других материалов с использованием процесса коаксиального лазерного плавления на установке КЛП-400, представленные ниже. При этом достигается высокая производительность и появляется возможность получения изделий сложной формы, которые трудно или невозможно получить другими методами. Примеры деталей с внутренними каналами сложной формы показаны на рис. 5.

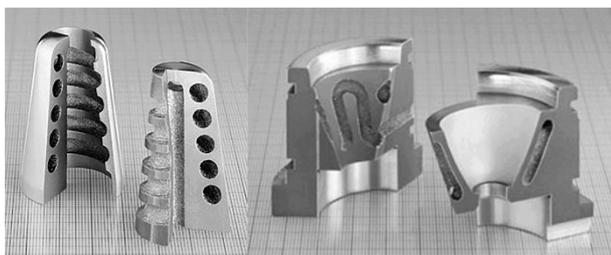


Рис. 5. Детали из стали с внутренними каналами

Создание детали с внутренними каналами сложной формы крайне трудно. Её можно получить только при соединении двух деталей, в каждой из которых созданы половины каналов. В любом случае такая деталь потребует соединения по всей поверхности. В целом ряде случаев эти соединения могут быть разрушены при высоких рабочих температурах; давлениях внутри детали; вибрациях детали и др.

Эффективно применяется технология КЛП в авиастроении для создания и ремонта лопаток турбин двигателей самолетов. В процессе эксплуатации изнашиваются не только концы лопаток, но и области их крепления.

Применение для КЛП материала, используемого для изготовления лопаток, позволяет избежать короблений лопаток, обеспечить локальность наплавки и высокое качество сплавления наплавляемого материала с основой. Обычно для этих целей применяются жаропрочные никелевые сплавы или специальные стали.

Методом КЛП возможно изготовление де-

талей из двух и более материалов. Основная масса детали изготовлена из меди для быстрого охлаждения, а непосредственно ее поверхность – из износостойкой стали.

Применение метода КЛП весьма эффективно для создания различных слоев на поверхности материалов, а также для ремонта изношенных деталей.

Применение КЛП для ремонта штампов позволяет получить высокое качество наплавленных слоев, а также уменьшить время ремонта и простоя производства. За счет лазерного воздействия существенно сокращается введенное количество теплоты, снижается на порядок зона разогрева и обеспечивается минимальная толщина наносимого слоя. В результате этого исключается необходимость пред- и посттермообработки, снижаются расход материалов и объем доводки.

Путем нанесения слоев из смеси порошков различных материалов или одновременно подаваемых в зону обработки разных порошков можно получать структуры с определенной матрицей и вкраплениями других частиц, например, карбидов, т.е. композиционных материалов.

Примером такого композиционного материала является композиция никелевого сплава Inconel 625, упрочненного частицами TiC. Подобный материал обладает высокими износостойкими свойствами при работе в условиях высоких температур. Наличие титана снижает плотность никелевого сплава, что уменьшает массу деталей. Это особенно важно для изделий авиационно-ракетной техники. Из такого композиционного материала изготавливают турбинные лопатки и детали двигателя с улучшенными характеристиками.

Для получения композиционных материалов с требуемыми свойствами без дефектов и хрупких соединений проводится оптимизация лазерной погонной энергии, плотности энергии лазерного излучения, удельного энергетического вклада.

Для увеличения жаростойкости никелевых сплавов в деталях двигателей ракетно-космической техники применяют композиционный материал Ni-60 WC. Создание деталей КЛП из такого материала связано со значительными трудностями. Под действием лазерного источника материал испытывает неравномерный нагрев и изменение объема вследствие термического расширения, при этом происходят фазовые или структурные превращения, приводящие к возникновению остаточных напряжений и распространению

трещин.

При доле упрочняющих частиц больше 40 % увеличивается взаимодействие между ними, что повышает концентрацию напряжений вблизи частиц, а поскольку армирующие частицы WC обладают низкой пластичностью, они становятся инициаторами трещин.

Также в данном случае вследствие существенной разницы плотностей частиц и матрицы наблюдается неравномерное распределение упрочняющих частиц, крупные частицы опускаются в нижнюю часть расплава, а мелкие остаются в средней, что является дополнительным фактором трещинообразования. Оптимизация одних только технологических параметров лазерной наплавки не дает в этом случае положительных результатов.

Одним из перспективных методов сглаживания жесткого термического цикла, присущего КЛП и приводящего к дефектам, является применение дополнительного источника нагрева. Обычно в этом качестве используют предварительный нагрев в печи или нагрев в газовом пламени. Однако эти методы имеют такие недостатки, как низкая эффективность, проблемы с их применением в процессе наплавки, трудности, связанные с постоянством температуры и равномерностью нагрева. Избежать образования трещин и пор, а также увеличить эффективность и производительность процесса позволяет совмещение лазерной наплавки с индукционным нагревом.

Применение лазерной наплавки с индукционным нагревом до температуры 900 °C дает возможность получить покрытие Ni-WC с содержанием карбида вольфрама 20, 35 и 60 % масс. При этом эффективность метода лазерной наплавки с индукционным нагревом увеличилась более чем в 4 раза по сравнению с обычной КЛП без дополнительного нагрева. Микротвердость таких материалов выше, чем материала, полученного КЛП без подогрева.

Для повышения фрикционных свойств алюминиевых материалов в них добавляют частицы карбида кремния (SiC). Композиционные материалы с алюминиевой матрицей, улучшенной частицами SiC, обладают высокой удельной прочностью, малой плотностью, хорошими технологическими свойствами. При нагружении таких композиционных материалов матрица воспринимает основную нагрузку, а дисперсные частицы действуют как барьер, препятствующий движению дислокаций.

При испытаниях на трение и износ дисперсно-упрочненные композиционные мате-

риалы системы Al-SiC показывают высокие результаты по износостойкости. Добавление в алюминиевые сплавы армирующих частиц микронных размеров с резко отличной от матрицы твердостью, с одной стороны, повышает износостойкость сплавов, а с другой – может расширить область существования во фрикционном контакте вторичных структур, обеспечивающих нормальное протекание процессов трения и износа в широком диапазоне параметров нагружения.

Антифрикционные композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов рекомендуется использовать в парах трения (трибосопряжениях). В частности, целесообразной является замена антифрикционных материалов, таких как Бр06Ц6С3 или ФЦ20-1, дисперсно-упрочненными композиционными материалами на базе алюминиевых сплавов АК12, армированных частиц SiC с объемной долей армирования 5 % и более. Эти композиционные материалы обладают более чем на порядок меньшими значениями интенсивности изнашивания по сравнению с бронзой Бр06Ц6С3.

Также композиционные материалы имеют коэффициенты трения, характерные для антифрикционных материалов, таких как Бр06Ц6С3, и сохраняют постоянство в значительно более широком диапазоне скоростей скольжения и нагрузок. Антифрикционные композиционные материалы применяются при производстве вкладышей подшипников скольжения; поршней; тормозных колес; шкивов; гильз цилиндров и других аналогичных изделий.

Для создания таких материалов используют преимущественно литейные технологии, однако они дают возможность изготавливать только всю деталь из композиционного материала, в то время как часто требуется только контактирующая часть из композита. Применение КЛП позволяет изготавливать детали с основой из алюминиевого сплава и контактирующей частью из композита Al-SiC.

Технологии лазерной обработки характеризуются высокими скоростями нагрева и охлаждения, поэтому путем регулирования термического цикла можно добиться очень малого времени пребывания частиц карбида кремния в высокотемпературной области, что приводит к ограничению растворения частиц карбида кремния и получению покрытия с высокими свойствами.

В качестве примера рассмотрим изготовление композиционного материала Inconel 625 с

частицами TiC методом прямого лазерного нанесения. Смесь порошков Inconel 625 с размером частиц 20...45 мкм и нанопорошков TiC с размером частиц 80...150 нм в количестве 1 % помещали в питатель лазерной установки для выращивания, а затем проводили процесс КЛП. Микротвердость такого материала увеличилась на 12 %, предел текучести на 30 %, предел прочности на 18,5 %, а растяжение и относительное удлинение – на 4,4 % по сравнению с наплавленным чистым Inconel 625.

Повышение свойств материала можно объяснить двумя причинами. Это произошло, во-первых, в результате измельчения зерна, так как меньший размер зерен приводит к увеличению напряжений, необходимых для движения дислокации через границу зерна: кроме того, большее количество границ зерен создает большее сопротивление движению дислокаций, а во-вторых, вследствие образования различных карбидов, являющихся эффективными фазами усиления.

Методом КЛП был получен композиционный материал системы Ni-WC. В качестве матрицы в этом композиционном материале использован Ni, а в качестве упрочнителей частицы WC в количестве 60 % с размером частиц 100...145 мкм и в количестве 5 % с размером частиц 40...70 нм. Содержание наночастиц в 5 % является оптимальным, так как в результате смешивания данная порошковая композиция обеспечивает равномерное распределение частиц наноразмера вокруг микрометровых частиц.

Полученное покрытие имеет повышенную эрозионную стойкость под воздействием абразивной струи по сравнению со стандартным покрытием и материалом подложки, что связано с уменьшением размера кристаллической матрицы Ni и заполнением пространства между микрометровыми частицами WC и частицами WC наноразмера.

Обычно при аддитивных технологиях получения композиционного материала упрочняющие частицы (карбиды; оксиды и т.д.), а также материал матрицы смешиваются и подаются в зону обработки. Из-за разности коэффициентов расширения упрочнителя и матрицы, а также вследствие возможного загрязнения и угловатой формы упрочняющих частиц поверхность взаимодействия частицы с матрицей в этом случае может являться наиболее слабой зоной.

Для устранения недостатков традиционного подхода в последнее время в наших исследованиях развивается новый способ получения композиционных материалов, который заключается в выделении упрочняющей фазы

в результате химической реакции между элементами в процессе затвердевания. Данный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным. При его использовании: образуется термодинамически стабильная упрочняющая фаза; сохраняется чистая поверхность упрочнителя; армирующие частицы обладают меньшим размером и распределены более равномерно; расширяются возможности контроля процесса создания композиционного материала.

При формировании упрочняющих частиц в процессе реакции особое внимание уделяется двум аспектам: тщательному подбору состава и соотношения компонентов порошковой смеси для конкретного применения; контролю параметров нагрева, охлаждения и затвердевания.

Подобный композиционный материал был получен на основе системы Ni-Ti-C методом КЛП. При плавлении смеси таких порошков упрочняющие частицы TiC образуются в процессе химической реакции в ванне расплава. В качестве исходного материала используется порошковая смесь из Ni с размером частиц в среднем 150 мкм, Ti с размером частиц в среднем 75 мкм и C с размером частиц в среднем 150 мкм. Титан и углерод предварительно смешиваются в соотношении, соответствующем стехиометрическому составу TiC. Эта смесь порошков помещается в питатель установки для лазерного послойного выращивания. С использованием этой смеси осуществляется процесс КЛП.

Микроструктура полученных композиционных материалов представляет собой никелевую матрицу с расположенными в ней частицами TiC, образовавшимися в процессе химической реакции в расплаве. С повышением содержания карбидной фазы форма и размер упрочняющих частиц изменяется. Так, при содержании 8 % TiC частицы имеют дендритное строение и средний размер 1,0 мкм, при содержании 14 % частицы приобретают сферическую форму с размером менее 5 мкм, а при содержании 20 % частицы объединяются в блоки, которые имеют уже средний размер около 10 мкм. То есть с уменьшением содержания Ni размер частиц TiC постепенно увеличивается.

Максимальную твердость и износостойкость имеют композиционные материалы с содержанием TiC около 20 %.

Метод формирования упрочняющих частиц в процессе химической реакции может применяться для создания специальных покрытий с высоким содержанием упрочняющей фазы без дефектов и равномерным распределением частиц.

Легирование порошковой смеси дополни-

тельными компонентами (редкоземельные элементы и наночастицы) повышает качество композиционных материалов, полученных аддитивными методами. Благодаря своим уникальным свойствам редкоземельные элементы успешно используются во многих областях, таких как металлургия, электроника и химическая промышленность. Применение редкоземельных элементов для создания композиционных материалов аддитивными лазерными методами – достаточно новое направление.

Введение в композиционные материалы системы WC-Co-Cu, полученные методом КЛП, 1 % масс. оксида La₂O₃ (редкоземельного элемента лактана) способствует измельчению микроструктуры, повышению однородности дисперсии частиц и улучшению межфазного взаимодействия частицы с матрицей, а также увеличению теоретической плотности образца на 11,5 %.

Приведенные выше примеры показывают, что использование аддитивных технологий позволяет получать композиционные материалы различного состава, как металлические, так и металлокерамические, причем целый ряд материалов невозможно получить другими методами.

Исследование механизма формирования композита на основе стали и TiC при обработке лазерным лучом в процессе КЛП является актуальной задачей, так как есть предпосылки достигнуть высоких эксплуатационных свойств наряду со снижением веса изделия, что может быть актуальным для авиационной и космической техники.

Таким композиционным материалом может служить легированная сталь, упрочненная карбидами титана с массовой долей от 20 до 70 % [1].

Соотношение тугоплавкой карбидной и стальной составляющей выбирается в зависимости от её назначения и требований, предъявляемых к получаемому композиционному материалу. Чем выше содержание в стали тугоплавкой фазы, тем труднее композиционный материал поддается механической обработке в отожженном состоянии, тем больше его твердость и износостойкость.

Карбид титана снижает массу композиционного материала, что делает его удобным для изготовления деталей летательных аппаратов. Карбид титана хорошо смачивается сталями. Легирующие элементы, которые содержатся в сталях, такие как хром, никель, молибден, углерод, способствуют увеличению смачиваемости карбидных зерен расплавом стали и росту механических свойств композиционного материала. Поэтому для изготовления подоб-

ных материалов чаще используют стали с высоким содержанием углерода, молибдена, хрома и никеля.

Аддитивные технологии имеют явные преимущества и некоторые недостатки, требующие дальнейшего исследования и, главное, серийного изготовления комплексов для промышленного использования.

В настоящее время аддитивные технологии активно развиваются и широко используются в промышленности. Следует особенно подчеркнуть, что аддитивные технологии представляют собой цифровое производство, которое сменит в ближайшие годы целый ряд нынешних производственных процессов. Развитие цифрового производства приведет к снижению потребности в громоздком заводском оборудовании и к снижению производственных площадей. В результате будут возрастать возможности для создания более мелких, распределенных и мобильных производств.

Цифровое производство может устранить потребность в содержании больших складов, распределительных центров, больших капитальных вложениях в инфраструктуру и производство оснастки и инструментов. Таким образом, изготовление продукции непосредственно на месте потребления дает преимущества для региональных производств. Это, по сути, промышленная революция шестого уклада. Аддитивные технологии способны изменить распределение трудовой занятости и трудовых ресурсов во всем мире.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиченко, Д.Ю., Григорьянц, А.Г., Смуров, И.Ю. Изготовление композиционного материала с металлической матрицей прямым лазерным нанесением // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 14-18.
2. Григорьянц, А.Г., Колчанов, Д.С., Третьяков, Р.С., Малов, И.Е. Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур // Технология машиностроения. – 2015. – №10. – С. 6-11.

REFERENCES

1. Novichenko, D.Yu., Grigoriyats, A.G., Smurov, I.Yu. Manufacturing composites with metal matrix by direct laser application // *Engineering Technique*. – 2011. – No.11. – pp. 14-18.
2. Grigoriyants, A.G., Kolchanov, D.S., Tretiyakov, R.S., Malov, I.E. Metal powder selective laser melting, thin-walled and grid structure growing // *Engineering Technique*. – 2015. – No.10. – pp. 6-11.

Рецензент д.т.н.
Игорь Николаевич Шиганов