

УДК 67.02

А. А. ЖУКОВА, кандидат технических наук, А. Ф. ЗАЙКО, кандидат технических наук, З. В. МАШАРСКИЙ, кандидат психологических наук, С. О. СТОЙКО, магистр технических наук, Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

3D-печать (метод аддитивного производства) считается одним из самых прорывных нововведений в производственной сфере. Он полностью изменил способ производства деталей/компонентов и оборудования в промышленности, а также их дизайн и разработку. 3D-печать позволяет исследователям и производителям разрабатывать сложные формы и структуры, которые ранее считались невозможными при использовании традиционных методов изготовления. Растущая потребность в гибких объектах для различных применений, таких как адаптивные ветряные турбины, способствовала появлению 4D-печати. Внедрение аддитивного производства – важный виток в развитии авиастроительной отрасли, что позволяет создавать технические объекты облегченной конструкции с уникальными физико-механическими свойствами, при этом снизить вес летательного аппарата, а значит, сократить издержки на топливо и материалы.

Важным этапом в развитии авиации является внедрение аддитивных технологий. Традиционные технологии, которые используются в авиационной промышленности, базируются на ручной сварке, механической обработке литейных процессов. Такой подход требует больших затрат труда, времени и сырья. Метод аддитивного производства осуществляется в автоматическом режиме и является более быстрым и экономным. Оборудование может работать круглосуточно. При этом количество отходов на 70–95 % меньше. В сравнении с классическими методами аддитивная печать снимает производственные ограничения – можно получать детали с более точными геометрическими параметрами, чем при использовании традиционного производства.

Пионером отрасли стала компания GE Aviation (Бостон, США). Производитель авиационных двигателей обратил внимание на то, что использование разных сплавов в детали существенно улучшает её физико-технические свойства и даёт возможность вывести лётные характеристики самолета на принципиально новый уровень. Традиционный метод литья не позволяет объединить разные материалы в рамках одного технологического процесса. В GE Aviation начали работать над усовершенствованием форсунок. Для производства одной детали необходимо по отдельности изготовить около 20 элементов, после чего соединить их в одной запчасти. 3D-принтер, работающий с металлическим материалом, даёт возможность изготовить деталь из цельного куска материала, экономя время и деньги. Опытные образцы форсунок прошли сертификацию в 2016 году. Теперь производитель намеревается выпускать по 25000 деталей, сделанных с помощью принтера для трехмерной печати в год.

В научно-исследовательской лаборатории на базе завода производителя Airbus (Тулуза, Франция) пошли еще дальше. Инженеры создали беспилотный летательный аппарат, напечатанный на 3D-принтере [1].

3D-печать уже используется в серийных самолетах Airbus. В широкофюзеляжных лайнерах A350 устанавливается напечатанный кронштейн в составе пилон двигателя. Деталь изготавливается из титанового по-

рошка. В экспериментальных моделях A350 и узкофюзеляжных A320neo тестируются более 1000 деталей, сделанных методом аддитивного производства [1].

В России над внедрением аддитивных технологий в авиапромышленности работают Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ) и Томский политехнический университет. Команда ВИАМ тестирует 3D-печатные комплектующие в двигателях для самолетов MC-21.

В американском «Boeing» не отстают от европейских коллег. Первой серийной моделью, в которой будут использоваться напечатанные металлические элементы, станет лайнер 787.

Продолжением 3D-печати стала прорывная технология – 4D-печать на основе концепции программируемой матери. 4D-печать способна возвести 3D-печать на совершенно новый уровень, вводя еще одно измерение самоорганизации – время. Введение четвертого измерения в технологию аддитивного производства называется 4D-печать. Благодаря этому новому измерению объекты, напечатанные на 3D-принтере, могут самостоятельно изменять свою конфигурацию непосредственно под воздействием различных факторов, таких как физические (температура, влажность, ультрафиолетовый свет), химические (окислители и восстановители органической природы) и биологические (глюкоза и ферменты). Ввиду интеграции измерения времени объекты с печатным изображением динамически изменяют свою форму без внедрения в детали какой-либо электроники, стандартных машинных приводов или громоздких батарей [2].

Концепция 4D-печати опирается преимущественно на пять факторов, которые представлены на рисунке 1 [2].



Рисунок 1 – Концепция 4D-печати

4D процесс печати в основном требует сочетания нескольких материалов и однократного процесса печати. Различия в свойствах материалов обеспечат желаемое поведение при изменении формы. Вот почему 3D-печать является одной из потребностей процесса 4D-печати. В настоящее время применяемые методы 4D-печати включают прямое отверждение, моделирование расплавленного осаждения, стереолитографию, селективное лазерное плавление [4, 5].

В соответствии с изменением физических свойств, таких как форма, типы реагирующих на различные факторы материалы можно разделить на два основных класса: *материалы с изменением формы* (SCM – Shape-changing Materials) и *материалы с памятью формы* (SMM – Shape Memory Materials). Изменяющие форму материалы – это материалы, которые обладают свойствами, вызванными факторами, известные как эффект изменения формы (SCE – Shape-changing Effect). Они деформируются в ответ на воздействующие факторы и могут вернуться к своей постоянной форме, когда факторы удалены. Материалы с памятью формы способны восстанавливать свою первоначальную форму из деформированной формы при воздействии определенных факторов, и это известно как эффект памяти формы (SME). SMM требуют двух шагов для формирования полного цикла памяти формы. Первым шагом является деформация материала во временную форму посредством «процесса программирования» (рисунок 2), за которым следует «процесс восстановления формы». SMM будут оставаться постоянными во временной форме, пока не будет применен правильный оптимальный фактор, чтобы запустить процесс восстановления формы [6].

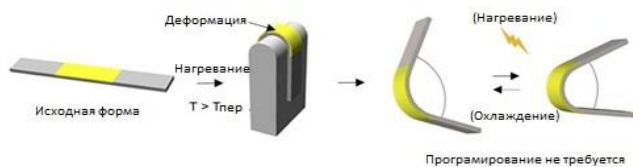


Рисунок 2 – Двусторонний эффект памяти формы

В 4D-печати используются следующие материалы с памятью формы: сплавы с памятью формы (SMA – Shape Memory Alloys), полимеры с памятью формы (SMP – Shape Memory Polymers), гели с памятью формы (SMG – Shape Memory Gels), керамика с памятью формы (SMC – Shape Memory Ceramics) и другие гибридные материалы с памятью формы (SMH – Shape Memory Hybrid) [7]. Кратко о каждом из них.

SMA: демонстрируют эффект памяти формы на основе мартенситного перехода. Мартенситное превращение – полиморфное превращение, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристаллов атомов происходит путем их упорядоченного перемещения, причем относительные смещения соседних атомов малы по сравнению с межуатомным расстоянием. В качестве примера можно рассматривать интерметаллиды сплава Ni-Ti с составом, близким к эвтектическому, характерен переход от кубической (аустенитной фазы) к моноклинной (мартенситной) фазе при комнатной температуре. Такие превращения обычно происходят в сплавах при высоких напряжениях, но в результате наличия эффекта памяти или суперэластичности превращения могут происходить и

при низких напряжениях. При разгрузке мартенсит становится нестабильным и переходит в аустенит с компенсацией всех макроскопических напряжений [8].

Перестройка кристаллической решетки в микрочастицах обычно сводится к деформации ее ячейки, и конечная фаза мартенситного превращения – однородно деформированная исходная фаза. Величина деформации мала (~1–10 %), и, соответственно, мал по сравнению с энергией связи в кристалле энергетический барьер, препятствующий однородному переходу исходной фазы в конечную (рисунок 3) [9].

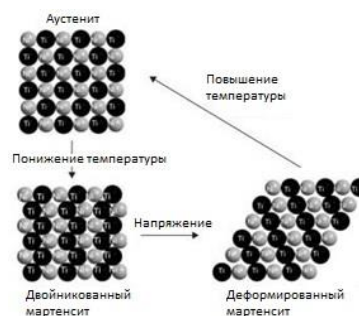


Рисунок 3 – Эффект памяти на основе мартенситного перехода

SMP: аморфно-кристаллические и аморфные полимеры, определяющиеся высокомолекулярным строением материала и связаны, в основном, с фазовым (кристаллизация, плавление) или релаксационными (стеклование) переходами. Восстановление формы происходит в управляемом режиме при воздействии различных внешних факторов: тепло, электрический ток, магнитные поля, различные излучения и тому подобное. Кроме того, SMP, в отличие от металлов и керамик, испытывают более низкие напряжения при деформировании и могут сохранять значительные восстанавливаемые деформации.

SMC: аналогичный эффект для сплавов ожидается в керамике с определенным фазовым переходом.

SMG: в последние годы исследователи сосредоточились на геле с памятью формы (SMG), и он рассматривается как один из самых многообещающих новых материалов, которые могут удовлетворить будущий спрос как «умный» материал. Данный гель может запомнить свою первоначальную форму, которая происходит во время процесса гелеобразования, и это явление называется свойством восстановления формы. SMG становится мягким и эластичным, если его нагреть при температуре выше критической, где он меняет свое состояние фазы. После деформации этот гель может восстановить свою первоначальную форму при нагревании при температуре выше критической [10].

SMH: материал обычно состоит как минимум из двух компонентов, один из которых является упругим, а другой – переходным. В этой комбинации кластический компонент сохраняет энергию после программирования, в то время как переходный компонент способен размягчаться при нагревании до температуры выше температуры перехода и затем в значительной степени сохраняет деформированную форму после охлаждения для затвердевания. При нагревании для повторного смягчения переходной компоненты запас упругой энергии, накопленной в упругом компоненте, высвобождается, что обеспечивает движущую силу для восстановления формы гибрида [11].

На основании вышеизложенного следует сделать выводы о перспективе использования 4D-печати в авиационной промышленности. Что касается материалов с памятью формы, существует острая необходимость в разработке методик их включения в авиационную отрасль, для обеспечения гарантии различного качества. 4D-печать имеет существенные преимущества при непосредственном изготовлении сложных трехмерных деталей. Здесь наиболее важным моментом является то, что изготовление менее сложного менее размерного объекта позволило бы получить легкие, быстро изготавливаемые компоненты с более низкими производственными затратами. Кроме того, были бы многообещающим хранение и транспортировка компонентов меньшего размера. Несмотря на то, что 4D-печать является перспективной технологией, ей необходимо преодолеть несколько технологических препятствий, прежде чем она будет широко распространена. Наличие различных авиационных конструкций делает необходимой разработку новых методик их совершенствования. Наконец, рациональным будет внедрение новейших технологических инноваций аддитивного производства, чтобы удовлетворить растущие потребности авиационной промышленности в производстве более крупных и сложных деталей.

Список литературы

- 1 **Wohlers, T.** The Faces of Additive Manufacturing / T. Wohlers // Wohlers Report [Electronic resource]. – 2019. – August, 12. – Mode of access : [https:// wohlersassociates.com/](https://wohlersassociates.com/). – Date of access : 20.01.2020.
- 2 **Tibbits, S.** 4D printing. MIT self-assembly lab and Stratasys [Electronic resource] / S. Tibbits. – 2013. – Mode of access :

<http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>. – Date of access : 18.04.2020.

3 A review of 4D printing / F. Momeni [et al.] // *Materials Design*. – 2017. – Vol. 122. – P. 42–79. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.matdes.2017.02.068>.

4 Biomimetic 4D printing / A. Sydney Gladman, [et al.] // *Nature Materials*. – 2016. – Vol. 15. – P. 413–418. – DOI: 10.1038/nmat4544.

5 4D Printing with Mechanically Robust, Thermally Actuating Hydrogels / Sh.E. Bakarich [et al.] // *Macromol Rapid Commun.* – No. 36(12). – 2015. – P. 1211–1217. – DOI: [org/10.1002/marc.201500079](http://dx.doi.org/10.1002/marc.201500079).

6 **Kuksenok, O.** Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers / O. Kuksenok, A. C. Balazs // *Materials Horizons*. – 2016. – No. 3 (1). – P. 53–62.

7 **Zhou, J.** Reversible shape-shifting in polymeric materials / J. Zhou, S. S. Sheiko // *Polymer Physics*. – Part B. – 2016. – No. 54. – P. 1365–1380. – DOI: [org/10.1002/polb.24014](http://dx.doi.org/10.1002/polb.24014).

8 4D printing: processability and measurement of recovery force in shape memory polymers / M. D Monzon [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 89(5–8). – P. 1827–1836. – DOI: [org/10.1007/s00170-016-9233-9](http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9233-9).

9 4D printing with smart materials. [Electronic resource] / presented by I. A. Khan [et al.]. – 2015. – Mode of access : [https://www. slideshare.net/Funk98/4d-printing-with-smart-materials](https://www.slideshare.net/Funk98/4d-printing-with-smart-materials). – Date of access : 18.04.2020.

10 Stimulus-responsive shape memory materials : a review / L. Sun [et al.] // *Materials & Design*. – 2012. – Vol. 33. – P. 577–640. – DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.065.

11 **Sethna, J. P.** Digital material : Overview [Electronic resource] / J. P. Sethna. – 2017. – Mode of access : <http://www.lassp.cornell.edu/sethna/DM/>. – Date of access : 18.04.2020.

Получено 15.05.2020

A. A. Zhukova, A. F. Zaiko, Z. V. Masharsky, S. O. Stoiko. Technologies of the future in the aerospace industry.

3D printing (the additive production method) is considered one of the most breakthrough innovations in the field of modern production. He completely changed the way manufacturing parts / components and equipment in industry, as well as their design and development. 3D printing allows manufacturers and researchers to develop complex shapes and structures that were previously considered impossible using traditional manufacturing methods. The growing demand for flexible objects for various applications, such as adaptive wind turbines, has contributed to the emergence of 4D printing. The introduction of additive production is an important step in the development of the aircraft industry, which allows the creation of lightweight technical objects with unique physical and mechanical properties, while lightening the aircraft, which means reducing fuel and material costs.