

Кроме того, современные инновационные технологии позволяют изготовить витражные конструкции с высокими солнцезащитными и энергосберегающими свойствами, что эффективно реализуется при строительстве высотных энергоэффективных зданий с большими площадями остекленных навесных фасадных систем.

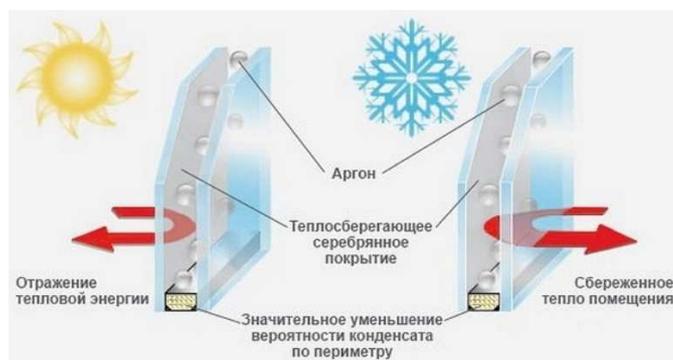


Рис. 4. Принцип работы теплоотражающих покрытий при остеклении зданий

Прозрачные ограждающие конструкции здания используются в основном в качестве естественного освещения. Застекленное пространство действует как буфер, сохраняя тепло зимой или охлаждая помещение летом. Снижение энергозатрат на охлаждение здания также достигается за счет установки герметичных стеклопакетов, заполненных инертным газом и с применением теплоотражающих покрытий, которые отражают инфракрасное излучение (рис. 4) Расширение возможностей для формирования комфортного микроклимата в помещении представлено фасадной системой с двойным остеклением, в которой температура воздуха в буферной зоне на несколько градусов выше температуры окружающей среды. Такие системы долговечны, надежны и ремонту пригодны.

В заключение необходимо отметить, что сегодняшний рынок полон материалов для отделки фасадов зданий, практически никакой другой вид отделки не придаст зданию такой же лаконичный, элегантный вид, как светопрозрачные фасадные системы.

Список используемых источников:

1. Борискина И.В., Плотников А.А., Захаров А.В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий: учебное пособие. М.: Издательство АСВ, 2003. 320 с.
2. Гулюян Ю.А. Технология стекла и стеклоизделий. Владимир: Транзит-Икс, 2015. 710 с.
3. Петров Е.В. Исследование теплового режима оконных откосов и узлов сопряжений оконных блоков с наружными стенами / Сибирь: Экспорт-Импорт Инвест. 2001. № 7. С. 46 – 47.
4. Полезная модель 24495 РФ, МКИ Е 06 В 3/66. Оконный блок / А.И. Гныря, Е.В. Петров, В.И. Терехов, М.И. Низовцев (РФ). 2002101784/20; Заявлено 21.01.2002; Оpubл. 10.08.2002; Приоритет 21.01.2002, Бюл. № 22 // Изобретения. Полезные модели. 2002. № 22. С. 647.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ SLM-ОБРАЗЦОВ ВТ6 ОБРАБОТАННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

С.В. Панин^{1,2}, д.т.н., профессор, А.В. Бяков¹, к.т.н., н.с, Ю.И. Почивалов¹, к.т.н., в.н.с.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

634055, г. Томск пр. Академический 2/4,

Томский политехнический университет

634050, г. Томск пр. Ленина 30,

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Аннотация: В работе исследуется влияние комбинированного ультразвукового воздействия и электрической обработки изготовленного по SLM технологии сплава Ti-6Al-4V. Изготовленные образцы разрезали на электроискровом станке и подвергали комбинированной обработке. Исходные и обработанные образцы были исследованы с помощью рентгеновской компьютерной томографии и оптической микроскопии, а механические свойства были оценены с использованием одноосного испытания на растя-

жение. Результаты показывают влияние обработки на механические свойства: увеличение предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве на 5% и 50% соответственно.

Abstract: The paper studies the effect of combined ultrasonic impact and electrical treatment of SLM-manufactured Ti-6Al-4V. Selectively laser melted specimens were cut along building direction and subjected to combined treatment. Pristine and processed specimens were investigated using X-ray computer tomography and optical microscopy while mechanical properties were evaluated using uniaxial tensile testing. The results reveal the effect of post-build treatment on mechanical properties: the increase of ultimate tensile strength and elongation at break by 5 % and 50 % correspondingly.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ультразвуковая обработка, титановые сплавы

Keyword: additive manufacturing, ultrasonic impact treatment, titanium alloys

Аддитивные технологии (АТ) производства высокопрочных сплавов дают инженерам широкие возможности по созданию конструкций с более оптимизированной макроструктурой. Традиционные технологии не позволяют получать сложные формы деталей, обладают высоким расходом материала, в то время как аддитивные не имеют данных проблем. Особенно АТ актуальны в таких высокотехнологичных отраслях, как аэрокосмическая, где снижение веса является критической проблемой и используется термин «Buy-to-Fly ratio», который представляет собой весовое соотношение между затраченным сырьем и весом готовой детали. Во время традиционного производства это соотношение часто достигает 15-20, в то время как АТ могут уменьшить его вплоть до 1. Одной из основных проблем для широкого использования АТ в аэрокосмической промышленности является сертификация. Это решается частично путем принятия сертификации только отдельных деталей.

Инженеры весьма заинтересованы в АТ, но универсальная сертификация АТ в целом, приводящая к унаследованной сертификации произведенных деталей, является действительно сложной задачей для будущих исследований и разработок. Одна из причин может быть связана с неоднородностью и возможными дефектами конструкции. Явления, происходящие в зоне сверхбыстрого плавления и затвердевания металла, приводят к сложностям в управлении производственным процессом и к образованию дефектов [1]. Проблема формирования дефектов может быть частично решена путем добавления постобработки. В последние годы были предложены различные методы: термообработка, которая является довольно дешевой, но при этом малоэффективной при снижении пористости [2-4]; горячее изостатическое прессование (HIP), которое эффективно снижает пористость, что приводит к улучшению прочностных свойств и долговечности [5-7], но остается довольно дорогим методом из-за необходимости применения оборудования высокого давления [7].

Исследователи ищут новые эффективные методы постобработки изделий, которые будут одновременно эффективными и дешевыми. Одним из возможных способов является использование ультразвуковой ударной обработки (УЗО), которая направлена на формирование сильно деформированной субмикроструктурной структуры на поверхности материала, что приводит к улучшению механических характеристик. УЗО был исследован более подробно в предыдущей работе авторов [8]. В настоящей работе данный метод модифицируется комбинированным применением высокочастотной электрической обработки, и изучается его влияние на деформацию и характеристики разрушения изготовленных методом SLM образцов из Ti-6Al-4V.

Заготовки Ti-6Al-4V были получены путем селективного лазерного плавления с использованием порошка со средним размером частиц ~ 30 мкм с использованием принтера EOSINT M280 (EOS Electro Optical Systems, Мюнхен, Германия). После изготовления заготовки были отожжены, чтобы уменьшить остаточные напряжения и избежать потери формы при электроэрозионной резке. После резки получали пластины размером 70×10 мм² и толщиной 2 мм для ультразвуковой и электрической обработки. Выходная мощность и частота ультразвуковой обработки составляли 2000 Вт и 25 кГц соответственно. Ударник прижимался к обрабатываемой поверхности с усилием 150 Н. Электрическая обработка состояла в импульсной обработке с частотой 250 (f₁), 500 (f₂) Гц и длительностью импульса 10 (n₁), 50 (n₂) мкс. Импульсное напряжение составляло 50 В. Было подготовлено 4 набора образцов, обработанных с различными параметрами.

Чтобы сравнить влияние комбинированной ультразвуковой электрической обработки на деформационные характеристики и полученные механические свойства, исходные и обработанные образцы были исследованы при помощи рентгеновской компьютерной томографии, оптической микроскопии и испытаны на одноосное растяжение. Образцы для испытания на растяжение были вырезаны в форме лопатки толщиной 2 мм и длиной рабочей части 18×3 мм². Испытания проводились с использованием электромеханической испытательной машины Instron 5582 со скоростью нагружения 0,3 мм/мин.

Для детального исследования пористости была выполнена компьютерная рентгеновская томография. Объем необработанного образца из Ti6Al4V составил 24 мм³, а объем пор – 4·10⁻⁴ мм³. Общее содержание пор, которое рассчитывали как отношение объема пор ко всему объему образца, включая поры, составило 0,0016%. После комбинированной ультразвуковой и электрической обработки также была сделана рентгеновская томография; Результаты приведены в Таблице 1. Очевидно, что обработка не влияет на пористость.

Таблица 1

Результаты рентгеновской томографии

| Образец | Параметры электрической обработки | | Пористость, % | Средний размер пор, мкм |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------|-------------------------|
| | Частота, Гц | Длительность импульса, мкс | | |
| Ti6Al4V | - | - | 0.0016 | 19.9 |
| Ti6Al4V-f ₁ n ₁ | 250 | 10 | 0.0044 | 18.8 |
| Ti6Al4V-f ₁ n ₂ | 250 | 50 | 0.0046 | 19.9 |
| Ti6Al4V-f ₂ n ₁ | 500 | 10 | 0.0030 | 20.9 |
| Ti6Al4V-f ₂ n ₂ | 500 | 50 | 0.0050 | 22.3 |

Из-за многоуровневой природы процесса печати первичные зерна β-фазы растут вертикально через слои. Микроструктура в поперечном сечении образцов SLM Ti6Al4V представлена равноосными первичными зернами β-фазы со средним размером 300 мкм. По результатам оптической металлографии установлено, что комбинированная ультразвуковая и электрическая обработка приводит к образованию модифицированного поверхностного слоя толщиной 50-100 мкм.

Результаты испытаний на растяжение исходных и обработанных образцов обобщены в Таблице 2. Для каждого состояния Ti-6Al-4V после и до обработки было протестировано 3 образца. Видно, что исходный SLM Ti-6Al-4V имеет самый низкий предел прочности при растяжении и самое низкое удлинение при разрыве. Можно видеть, что применение комбинированной ультразвуковой электрической обработки привело к небольшому улучшению предела прочности при растяжении и увеличению удлинения при разрыве по сравнению с необработанным SLM Ti-6Al-4V.

Таблица 2

Механические свойства образцов

| Образец | Предел прочности, МПа | Удлинение при разрыве, % |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Ti6Al4V | 1094±28 | 6.4±1.4 |
| Ti6Al4V-f ₁ n ₁ | 1137±20 | 8.8±1.6 |
| Ti6Al4V-f ₁ n ₂ | 1118±13 | 9.9±0.8 |
| Ti6Al4V-f ₂ n ₁ | 1140±4 | 7.9±0.8 |
| Ti6Al4V-f ₂ n ₂ | 1110±93 | 7.7±2 |

Можно сделать вывод, что частота электрической обработки определяет пластичность обрабатываемого сплава. Два образца, обработанные с частотой переменного тока 250 Гц, имеют более высокое удлинение при разрыве (37-54% увеличения по сравнению с необработанным Ti6Al4V), тогда как 500 Гц приводит к более низкому увеличению - 20%.

Исследование механических и структурных свойств образцов SLM Ti6Al4V в исходном состоянии и обработанных комбинированной ультразвуковой и электрической обработкой показало, что:

- рентгеновская томография выявляет низкопористую структуру SLM Ti6Al4V, в то время как после обработки не наблюдается изменений пористости;
- микроструктурные исследования с помощью оптической микроскопии показывают модифицированный слой с толщиной, изменяющейся в диапазоне 50-100 мкм для исследуемых режимов обработки;
- наблюдается небольшое увеличение предела прочности при растяжении после обработки при разных режимах в среднем на 3-5%;
- основное различие проявляется в пластических свойствах образцов - увеличение пластичности после обработки при 500 Гц составляет 20%, достигая ~ 50% для 250 Гц.

Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение №05.583.21.0089, идентификатор проекта RFMEFI58318X0089.

Список используемых источников:

1. Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review / H. Shipley [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2018. – Vol. 128. – P. 1-20.
2. Fan, Z. Study on selective laser melting and heat treatment of Ti-6Al-4V alloy / Z. Fan, H. Feng // Results in Physics. – 2018. – Vol. 10. – P. 660-664.
3. Microstructural evolution and microhardness of a selective-laser-melted Ti-6Al-4V alloy after post heat treatments / S.Q. Wu [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 672. – P. 643-652.
4. Ductility improvement due to martensite α' decomposition in porous Ti-6Al-4V parts produced by selective laser melting for orthopedic implants / E. Sallica-Leva [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2016. – Vol. 54. – P. 149-158.
5. Kasperovich, G. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting / G. Kasperovich, J. Hausmann // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 220. – P. 202-214.
6. Wu, M.-W. The positive effect of hot isostatic pressing on improving the anisotropies of bending and impact properties in selective laser melted Ti-6Al-4V alloy / M.-W. Wu, P.-H. Lai // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 658. – P. 429-438. Ming-Wei Wu, Pang-Hsin Lai, Mat Sci Eng A, 658, 429-438 (2016).
7. Molaei, R. Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects / R. Molaei, A. Fatemi, N. Phan // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 117. – P. 352-370. D.F. Heaney, C. Binet, in Handbook of Metal Injection Molding, Second Edition edited by: Donald F. Heaney (Woodhead Publishing, 2019), p. 195.
8. Static fracture behavior of ultrasonic impact post-built treated SLM-manufactured Ti-6Al-4V / M.V.Burkov [et al.]. – AIP Conference Proceedings– 2019. – P. 020041.