

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.3-11.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.3-11.

Научная статья  
УДК 621.791.92/620.186.82  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

## Влияние стратегий прямого лазерного выращивания на структуру и свойства титанового сплава ВТ6

Дмитрий Александрович Ронжин<sup>1</sup>, аспирант  
Александр Иванович Мисюров<sup>2</sup>, к.т.н.  
Александр Григорьевич Григорьянц<sup>3</sup>, д.т.н.  
Андрей Андреевич Холопов<sup>4</sup>, к.т.н.

Марина Вячеславовна Таксанц<sup>5</sup>, старший преподаватель

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup>kynavino@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5446-7261>

<sup>2</sup>misyurov50@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup>mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>4</sup>holopiy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6108-5023>

<sup>5</sup>marina270263@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Проблема использования и развития технологий ремонта в газотурбиностроении является актуальной в связи с постоянно растущим объемом производства и развитием газотурбинных двигателей. Процесс изготовления колеса-вентилятора включает штамповку с последующей механической обработкой. Восстановление лопастей колеса-вентилятора является многообещающей технологией, учитывая их большую стоимость при производстве, а также высокий риск повреждения и выхода из строя. Наиболее перспективной ремонтной технологией в авиационном двигателестроении является прямое лазерное выращивание. Применение низкокзатратной технологии ремонта деталей путем лазерной наплавки с обеспечением комплекса свойств, сопоставимых с традиционными методами изготовления деталей, является первоочередной задачей. В статье представлено комплексное исследование стратегий сканирования, полученных методом прямого лазерного выращивания с коаксиальной подачей порошка на подложке из поковки титанового сплава ВТ6. Показано, что стратегия сканирования существенно влияет на структуру наплавленного слоя. Структура влияет на механические свойства. Тепло накапливается с увеличением числа слоев. Материал прогревается и находится на этом уровне продолжительное время, что можно сравнить с термической обработкой. Происходит постепенное изменение микроструктуры от неравновесной с различным соотношением  $\alpha/\alpha'$  к равновесной с фазовым составом  $\alpha + \beta$ . Для всех образцов характерно формирование вытянутых столбчатых зерен первичной  $\beta$ -фазы. Многократные тепловые циклы приводят к укрупнению исходного  $\beta$ -зерна. Материалом, изучаемым в данной работе, является широко применяемый в авиационной промышленности титановый сплав ВТ6.

**Ключевые слова:** прямое лазерное выращивание, титановый сплав ВТ6, размер зерна, структура, механические свойства

**Для цитирования:** Ронжин Д.А., Мисюров А.И., Григорьянц А.Г., Холопов А.А., Таксанц М.В. Влияние стратегий прямого лазерного выращивания на структуру и свойства титанового сплава ВТ6 // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

## The effect of direct laser growth patterns on the structure and properties of titanium alloy VT6

Dmitry A. Ronzhin<sup>1</sup>, PhD student  
Alexander I. Misyurov<sup>2</sup>, PhD. Eng.  
Alexander G. Grigoryants<sup>3</sup>, D. Eng.  
Andrey A. Kholopov<sup>4</sup>, PhD. Eng.  
Marina V. Taksants<sup>5</sup>, Senior Lecturer

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Moscow State Technical University named after Bauman, Moscow, Russia

<sup>1</sup>kynavino@bk.ru

<sup>2</sup>misyurov50@yandex.ru

<sup>3</sup>mt12@bmstu.ru

<sup>4</sup>holopiy@yandex.ru

<sup>5</sup>marina270263@yandex.ru

**Abstract.** The problem of using and developing repair technologies in gas turbine engineering is relevant due to the constantly growing volume of production and the development of gas turbine engines. The manufacturing process of the fan wheel includes stamping followed by machining. The restoration of the fan wheel blades is a promising technology, owing to the high cost of blades in production, as well as the high risk of damage and failure. The most promising repair technology in the aviation engine industry is direct laser growth. The use of low-cost technology for repairing parts by laser clad with the suitable property package compatible with traditional methods of parts production is a priority task. The article presents a comprehensive study of scanning strategies obtained by direct laser growth with coaxial powder feeding on a support plate made of titanium alloy VT6. It is shown that the scanning strategy significantly affects the structure of the pad. The structure affects the mechanical properties. Heat accumulates with an increase in the number of layers. The material warms up and stays at this level for a long time, which can be compared to heat treatment. There is a gradual change in the microstructure from a nonequilibrium one with a different ratio  $\alpha/\alpha'$  to an equilibrium one with a phase composition  $\alpha + \beta$ . All samples are characterized by the formation of elongated columnar grains of the primary  $\beta$ -phase. Multiple thermal cycles lead to the enlargement of the initial  $\beta$ -grain. The data for study in this work is the titanium alloy VT6, which is widely used in the aviation industry.

**Keywords:** direct laser growth, titanium alloy VT6, grain size, structure, mechanical properties

**For citation:** Ronzhin D.A., Misyurov A.I., Grigoryants A.G., Kholopov A.A., Taksants M.V. The effect of direct laser growth patterns on the structure and properties of titanium alloy VT6 / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

### Введение

При эксплуатации ГТД наблюдаются разрушения лопаток колеса вентилятора первой и второй ступеней газогенератора. В связи с тем, что колесо вентилятора является монолитным узлом, то разрушение одной лопатки приводит к необходимости замены всего узла. Современные лазерные технологии позволяют восстановить разрушенную часть лопатки непосредственно на монолитном узле. Известно использование для этих целей технологических процессов таких как сварка трением [1] и электронно-лучевая сварка [2] которые не всегда способны обеспечить работоспособность узла и обладают высокой трудоемкостью. Для этих целей возможно использование технологии прямого лазерного выращивания [3, 4]. Получение изделия из титановых сплавов сопряжено с определенными трудностями, связанными с технологическими особенностями процесса. Данными вопросами занимались российские и зарубежные авторы.

В частности, в работе [4] предлагается технология восстановления лопаток из титанового сплава VT8. Данная технология позволяет ремонтировать сколы и забоины по кромке пера лопатки. Однако часто возникают дефекты в центральной части лопатки. Ремонт по разработанной технологии становится проблематичным.

Известно, что накопление тепла приводит к изменению условий кристаллизации ванны расплава при восстановительной лазерной наплавке. Последовательное нанесение формообразующих валиков, циклический нагрев и быстрое охлаждение во время лазерной наплавки создают уникальные особенности микроструктуры и механические свойства. Таким образом служебные свойства детали, выращенной методом ПЛВ, в существенной мере зависят от тепловой обстановки, которой можно управлять изменением стратегии выращивания.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи: произведена

лазерная наплавка образцов с разной стратегией выращивания; произведены механические испытания образцов на растяжение и определение предела выносливости; выявлена структура механические свойства которой подходят для продления ресурса работы лопаток ГТД.

### Материалы и методы

Образцы были выращены в МГТУ им. Н.Э. Баумана на универсальном комплексе прямого лазерного выращивания КЛП-400. В качестве источника излучения использован волоконный лазер мощностью 3 кВт с длиной волны излучения 1,07 мкм [5]. Режимы лазерной наплавки выбраны исходя из предыдущих исследований [6]. Мощность и скорость не изменялись, 600 Вт и 800 м/мин. Как известно, титан и его сплавы активно взаимодействуют с кислородом, азотом и другими газами в атмосфере при температуре свыше 350 °С. Это значительно снижает эксплуатационные качества производимых изделий, такие

как пластичность, прочность и усталость. Поэтому процесс выращивания осуществляли в герметичной камере в среде инертного газа.

Предел выносливости определяли на образцах прямоугольной формы: толщиной 3 мм, шириной 40 мм и высотой 60 мм с разной стратегией движения наплавочной головы относительно образца: однонаправленной (вдоль образца); двунаправленной (вдоль и поперек образца); в четырех направлениях (вдоль, поперек, под углом 45° и -45°). Каждый слой был получен из перекрывающихся дорожек, которые соответствовали форме исходного образца. Перекрывание между соседними дорожками составляло 50 %. После подъема по оси Z, наплавка смещалась на  $\pm \frac{1}{2}\Delta Y$ .

После лазерной наплавки образцы прошли термообработку для снятия остаточных напряжений в цилиндрической печи при температуре  $650^\circ \pm 10^\circ \text{C}$  и низком вакууме ( $5 \times 10^{-5}$  Мбар), время нагрева 120 мин, выдержка на режиме 120 мин, охлаждение в среде аргона [6]. Исследования проводили применительно к титановому сплаву ВТ6.

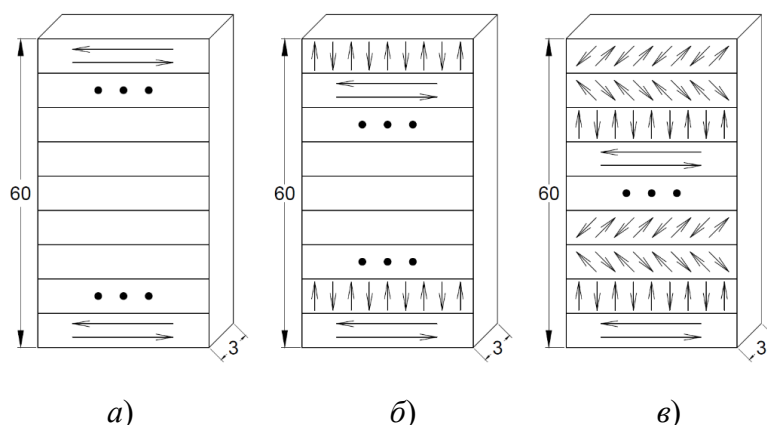


Рис. 1. Типы стратегий выращивания:

*a* – в одном направлении; *b* – вдоль и поперек образца; *c* – вдоль, поперек, под углом 45° и -45°

Fig. 1. Types of growth strategies:

*a* – in one direction; *b* – along and across the sample; *c* – along, across, angle-wise 45° and -45°

Для полученных образцов была исследована структура, а также измерен размер зерна. Для определения типов микроструктуры и изменения размера зерен использовали сканирующий электронный микроскоп Quanta 650 (FEI США).

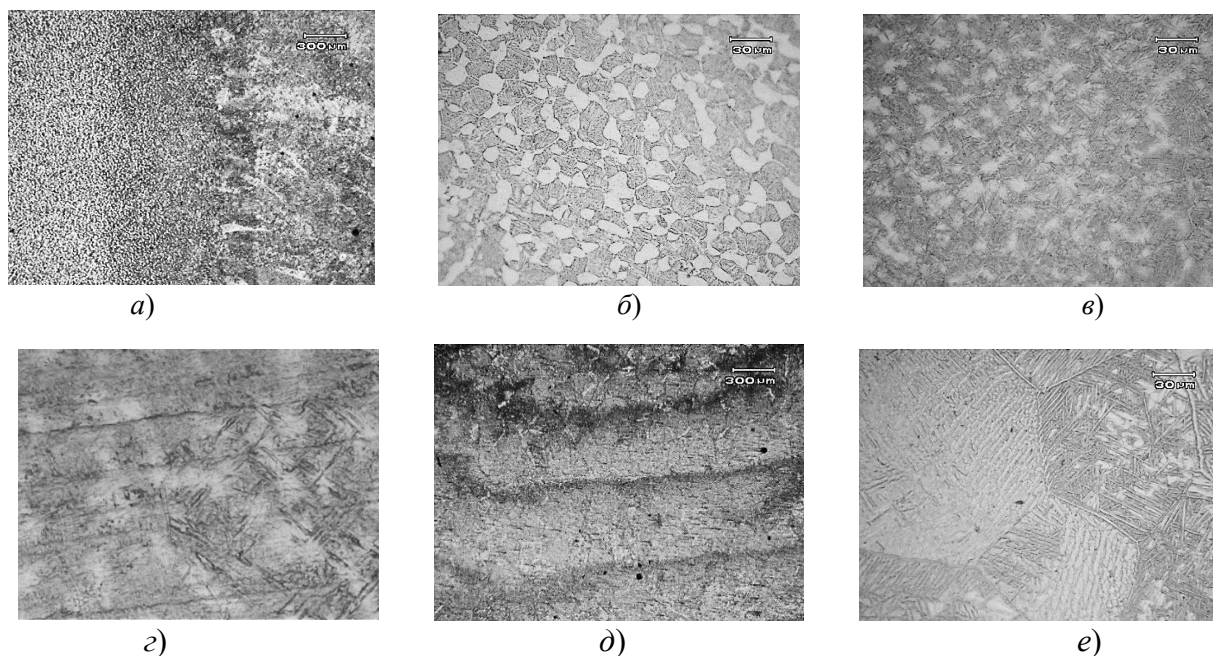
### Результаты и обсуждение

Предлагаемая технология ремонта рабочего колеса компрессора низкого давления заключается в удалении части пера лопатки с

дефектом и последующем восстановлении удаленной части методом прямого лазерного выращивания. Характерной особенностью титановых сплавов является наличие полиморфного превращения, приводящего к значительным изменениям структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) и литом металле восстановленной части лопатки. На металлографических шлифах видны несколько участков, принципиально отличающихся друг от друга по структуре и фазовому составу (рис. 2, *a*). Из

них можно выделить участок основного металла, не претерпевшего термического воздействия (рис. 2, б); зону термического влияния, примыкающую к линии сплавления (рис. 2, в, з); участок литого металла,

образующийся при переплаве присадки (рис. 2, д, е). В нем имеются явно выраженные зоны повторного нагрева металла предыдущих валиков при укладке последующего.



**Рис. 2. Структура участка, переходной зоны от ковального к литому металлу:**

*a* – внешний вид переходной зоны ( $\times 150$ ); *b* – металл поковки ( $\times 1000$ ); *в* – начало растворения  $\alpha$ -фазы ( $\times 1000$ ); *з* – участок, прилегающий к линии сплавления ( $\times 1000$ ); *д* – литой металл ( $\times 150$ ); *е* – зоны повторного нагрева в наплавленном металле ( $\times 1000$ )

**Fig. 2. Structure of the area, a transition zone from forged to cast metal:**

*a* – appearance of the transition zone ( $\times 150$ ); *b* – press forging metal ( $\times 1000$ ); *c* – the beginning of the  $\alpha$ -phase ( $\times 1000$ ); *d* – the area close to the fusion line ( $\times 1000$ ); *e* – cast metal ( $\times 150$ ); *f* – reheating zones in the added metal ( $\times 1000$ )

В зоне наплавленного металла, металл нагревается до температуры плавления и определенное время находится в жидком состоянии. После кристаллизации формируется характерная литая структура, имеющая фазовую неоднородность в зонах повторного нагрева (см. рис. 2, д). В этот период происходит насыщение металла газами, рост зерна, развивается физическая, химическая и структурная неоднородность, изменяется фазовый состав, образуются метастабильные фазы и т. д. В структуре этой зоны наблюдаются равноосные или вытянутые поперек линии сплавления  $\beta$ -зерна, имеющие окантовку в виде  $\alpha$ -фазы и крупнопластинчатое внутризеренное строение (см. рис. 2, е). Это значительно изменяет свойства в сравнении с металлом основы.

Кинетика фазовых превращений в ВТб сильно зависят от предшествующего теплового воздействия и скоростей охлаждения в процессе изготовления [7]. В случае полного плавления и затвердевания металл претерпевает различные этапы фазового

превращения в следующей последовательности:  $\alpha + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \text{жидкость} \rightarrow \beta \rightarrow \alpha + \beta/\alpha'$ . При закалке из жидкой фазы  $\alpha'$ -мартенсит образуется в определенном диапазоне скоростей охлаждения [8]. Если скорость охлаждения превышает  $410^\circ\text{C}/\text{с}$ , будет происходить неравновесное превращение из  $\beta$ -фазы в мартенситную  $\alpha'$ -фазу. Охлаждение со скоростями в интервале между  $410^\circ\text{C}/\text{с}$  и  $20^\circ\text{C}/\text{с}$  приведет к неполному превращению в  $\alpha'$ -фазу, при охлаждении со скоростью менее  $10^\circ\text{C}/\text{с}$  формируется равновесный фазовый состав  $\alpha + \beta$  [8, 9].

Рост  $\beta$ -зерен в двухфазных титановых сплавах происходит в направлении роста образца [9, 10]. Наблюдается прорастание  $\beta$ -зерен через наплавленные слои. Это связывают с тем, что частично расплавленные зерна предыдущего слоя служит центрами кристаллизации при затвердевании последующего [11, 12]. Новые зерна, сформировавшиеся от этих центров кристаллизации, растут в сторону максимального теплоотвода. Процесс продолжается пока не снизится потеря



тепла через подложку, после чего изменяется механизм кристаллизации. Такое формирование структуры является основной причиной анизотропии свойств в образцах.

В зависимости от скорости охлаждения в твердожидком состоянии, в литом металле могут образовываться либо равноосные, либо удлинённые столбчатые зерна, а также комбинация обоих. Более высокие скорости охлаждения приводят к более мелкой макроструктуре. При уменьшении скорости затвердевания происходит измельчение зерен и переход их формы от столбчатой к равноосной. Зоной, определяющей свариваемость и свойства титановых сплавов, является зона термического влияния (ЗТВ) [13]. Ее протяженность и структура зависят от термического цикла наплавки, основными параметрами которого являются скорость нагрева  $\omega_n$ , в интервале фазовых превращений, максимальная температура нагрева  $T_{\max}$ , время пребывания выше температуры полиморфного превращения и скорость охлаждения  $\omega_{\text{охл}}$  в интервале превращений. При проведении восстановительной наплавки следует учитывать, что  $T_{\max}$  и  $\omega_{\text{охл}}$  оказывают преобладающее влияние на конечную структуру и свойства нагретого металла. Наиболее резкие изменения происходят на участке, непосредственно прилегающем к литому металлу, поэтому работоспособность восстановленной лопатки во многом определяется свойствами этой зоны.

В сплавах типа ВТ6 в зоне термического влияния  $\beta \rightarrow \alpha'$  – превращение происходит при сравнительно низких температурах. Если металл нагревается до температур выше, чем температура начала  $\beta$ -превращения, первичные зерна  $\alpha$  почти полностью растворяются, тогда как первичные  $\beta$  зерна немного увеличиваются. Если максимальная температура нагрева ниже температуры начала  $\beta$ -превращения, то структура в этой зоне будет состоять из комбинации  $\alpha$  и  $\beta$  фаз. Морфология выделения  $\alpha'$ -фазы зависит от максимальной температуры нагрева. Если она существенно ниже температуры начала  $\beta$ -превращения, то толщина пластин в матрице ( $\alpha + \beta$ ) может слегка увеличиться, в то время как средний размер первичных  $\alpha$  зерен остается постоянным. При максимальной температуре нагрева несколько ниже температуры начала  $\beta$ -превращения пластинчатая структура матрицы ( $\alpha + \beta$ ) может трансформироваться в столбчатую структуру с более тонкими  $\alpha$  пластинками.

Как правило, структура у линии сплавления представляет собой смесь остаточной  $\beta$ -фазы и мартенситной игольчатой  $\alpha'$ -фазы (или  $\alpha''$ -фазы), количество которой с увеличением скорости охлаждения возрастает. Мартенситная  $\alpha'$  фаза является неравновесной с

деформированной кристаллической решёткой и высокой плотностью дислокаций [14], что приводит к упрочнению матрицы [15]. Механические свойства в значительной степени зависят от остаточных напряжений и микроструктуры, включая фазовый состав, размеры зерен, текстуру первичных  $\beta$ -зерен, а также наличие дефектов. Результаты исследований [13, 16, 17] показывают, что металл со структурой, содержащей  $\alpha'$ -фазу имеет прочность выше, а пластичность ниже, чем металл с равновесной  $\alpha + \beta$  – структурой.

При назначении режимов лазерной восстановительной наплавки следует обратить внимание на то, что у двухфазных титановых сплавов снижение пластичности наблюдается как при охлаждении с большими скоростями из-за образования мартенситных структур, так и при замедленном охлаждении из-за развития процессов  $\beta$  – хрупкости [13]. Показано, что существует довольно узкий диапазон скоростей охлаждения литого металла и ЗТВ, обеспечивающих удовлетворительное сочетание их свойств [18], поэтому для повышения пластичности желательнее проводить термообработку после изготовления детали. Расширить диапазон режимов, обеспечивающих равнопрочность участков восстановленной лопатки, можно также изменением состава присадочного порошка. Так, для сварки изделий из сплава ВТ6 рекомендовано использование присадочного металла состава ВТ6С [17].

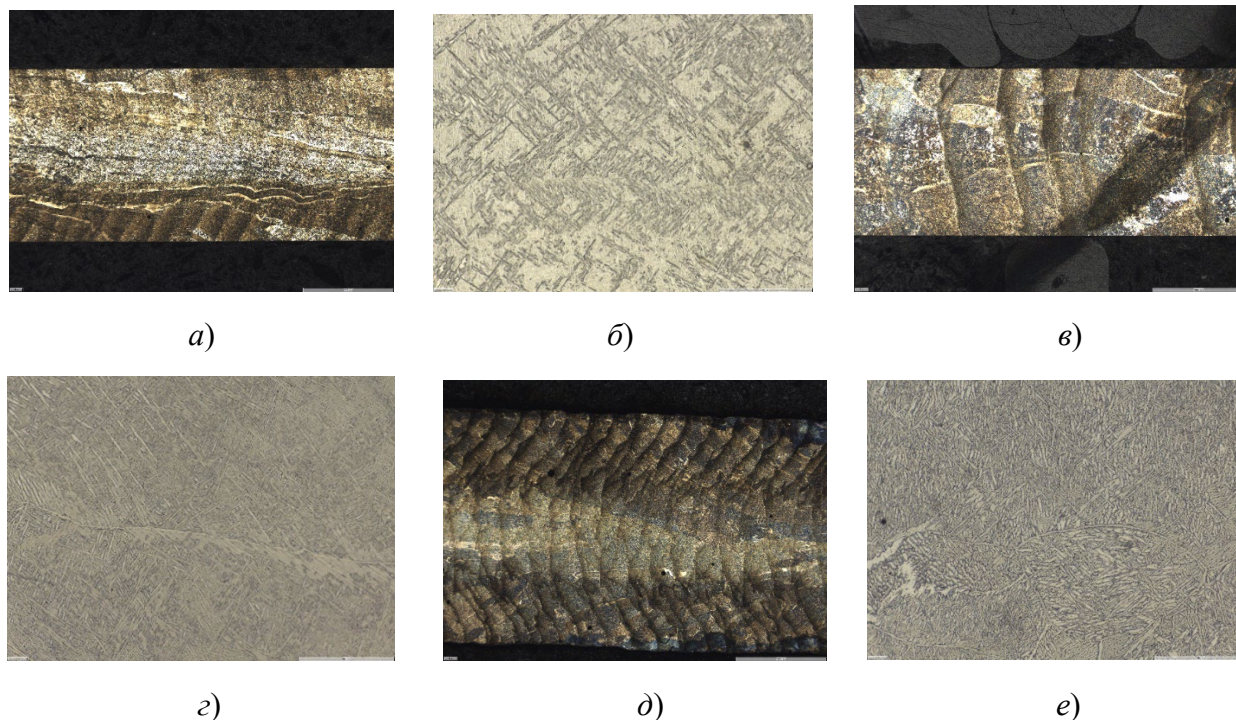
Для проведения восстановительной наплавки были использованы различные стратегии, обеспечивающие формирование различных температурных полей и полей остаточных напряжений. Движение наплавочной головы осуществлялась: в одном направлении вдоль образца; вдоль и поперек образца; вдоль, поперек, под углом  $45^\circ$  и  $-45^\circ$  (рис. 1).

Изменение стратегии выращивания, а следовательно, и схемы введения тепла, от первого к третьему приводит к увеличению времени пребывания металла в высокотемпературной зоне. Наряду с этим постоянное введение тепла при выращивании пера лопатки и низкая теплопроводность ВТ6 (около  $7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ) [19] создают условия для его накопления и возрастания температуры металла с увеличением числа слоев. Это создает условия для укрупнения исходного размера зерна  $\beta$ -фазы и снижению скорости охлаждения при температурах полиморфного превращения в зонах повторного нагрева.

Для литого металла образцов, выращенных по любой из исследованных стратегий, характерно формирование вытянутых столбчатых зерен первичной  $\beta$ -фазы (рис. 3). Зерна прорастают через границы слоев в направлении нанесения валиков. Внутри зерен формируются колонии

$\alpha$ -пластин. В образцах с разными стратегиями выращивания происходит изменение размера зерен и границ слоев. Размер зерна увеличивается с увеличением количества направлений наплавки (третья стратегия). Необходимо отметить, что в

случае использования первой стратегии ось  $\beta$  зерна прорастает преимущественно вверх, в то время как для других стратегий наблюдается разориентировка зерен относительно ванны расплава, т. е. относительно границ слоев.



**Рис. 3. Структура литого металла, полученного с разной стратегией выращивания:**

*a, b* – в одном направлении 1500 мкм ( $\times 25$ ) и 80 мкм ( $\times 500$ ); *в, г* – в двух направлениях 1500 мкм ( $\times 25$ ) и 80 мкм ( $\times 500$ ); *д, е* – в четырех направлениях 1500 мкм ( $\times 25$ ) и 80 мкм ( $\times 500$ )

**Fig. 3. The structure of cast metal obtained with different growing strategies:**

*a, b* – in one direction 1500 microns ( $\times 25$ ) and 80 microns ( $\times 500$ ); *c, d* – in two directions 1500 microns ( $\times 25$ ) and 80 microns ( $\times 500$ ); *e, f* – in four directions 1500 microns ( $\times 25$ ) and 80 microns ( $\times 500$ )

Для первой стратегии характерны очень узкие вытянутые в высоту зерна с незначительным отклонением оси зерна в сторону боковых стенок образца. Это можно связать с направлением максимального теплоотвода и высокими скоростями кристаллизации в условиях повышенного термоконцентрационного переохлаждения. Высокие скорости охлаждения обуславливают возможность возникновения хрупкой игольчатой  $\alpha'$ -фазы при  $\beta \rightarrow \alpha'$  – превращении.

Увеличение тепловложения при проведении процесса выращивания по второй стратегии повышает время нахождения металла при высоких температурах в условиях изменившегося направления теплоотвода, что способствует формированию равноосных зерен и некоторому увеличению их размера (см. рис. 3, *г*). Уменьшение скорости

охлаждения приводит к более полному протеканию полиморфного превращения, снижению количества  $\alpha'$ -фазы, росту пластин  $\alpha$ -фазы и изменению их взаимного расположения. Эти два обстоятельства должны привести к повышению пластичности наплавленного металла.

В образцах, полученных с использованием третьей стратегии, происходит чередование направления движения фронта кристаллизации от слоя к слою, связанное с изменением направления движения наплавочной головы. Направление роста зерна смещается преимущественно в сторону боковых стенок. Увеличенное тепловложение снижает скорость охлаждения и увеличивает время пребывания при высоких температурах. Возникают длинные и широкие столбчатые  $\beta$ -зерна, содержащие пластинчатую  $\alpha$ -фазу (см. рис. 3 *д, е*). Несмотря на уменьшение  $\alpha'$ -фазы в результате частичного

перехода  $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ , пластичность может снижаться из-за развития процессов  $\beta$ -хрупкости.

Повторный нагрев металла предыдущих валиков последующими может приводить к возникновению неравномерности механических свойств по длине восстановленного пера лопатки. В этом случае высокотемпературный нагрев создает условия для изменения

фазового состава зоны повторного нагрева и повышению пластичности этого объема металла за счет получения более равновесных структур  $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ . Фрагмент структуры литого металла части лопатки, выращенной по второй стратегии показан на рис. 4. В зонах перекрытия отдельных валиков четко видны участки снижения микротвердости.

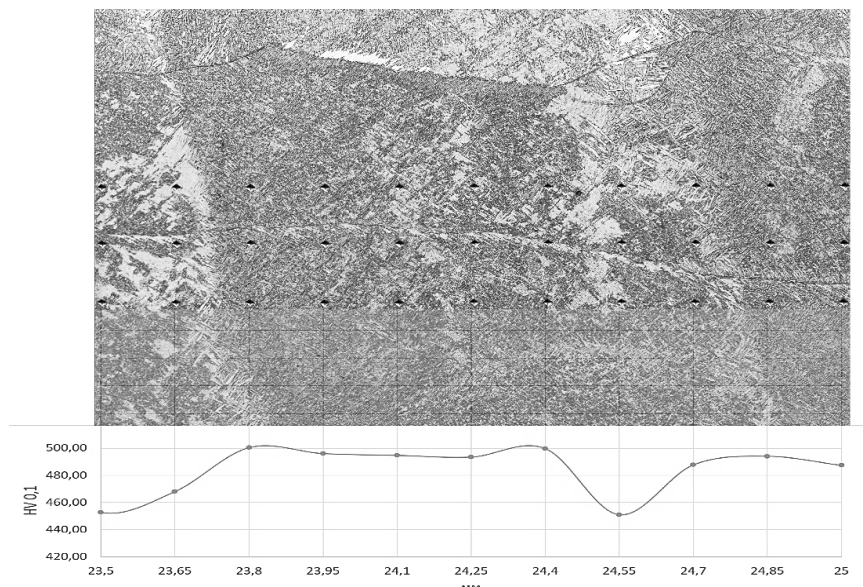


Рис. 4. Изменение микротвердости на участке восстановленной части лопатки в зонах перекрытия наплавленных слоев

Fig. 4. Change in microhardness in the area of the restored part of the blade in the overlap zones of pad welds

Таким образом, стратегия выращивания оказывает заметное влияние на фазовый состав и форму фазовых выделений. При переходе от первой стратегии выращивания к третьей, с уменьшением скорости охлаждения и периодической сменой направления роста первичных кристаллитов, происходит постепенное изменение микроструктуры от неравновесной с фазовым составом  $\alpha + \beta + \alpha'$  и различным соотношением  $\alpha / \alpha'$  к равновесной с фазовым составом  $\alpha + \beta$ . При этом мартенситные иглы уменьшаются в длину и увеличиваются в ширину. Можно предположить, что литой металл восстановленной части лопатки, выращенный по второй стратегии, будет иметь наибольшую пластичность. Так, в восстановленной части лопатки, полученной по третьей стратегии, наблюдались хрупкие разрушения в твердом состоянии. Их возникновение можно связать со снижением деформационной способности литого металла в неравновесном состоянии и возникновением трехосного напряженного состояния при преимущественном направлении получения единичного валика в поперечном,

относительно плоскости пера лопатки, направлении. Следует иметь в виду, что увеличение длительности пребывания металла при повышенных температурах, в случае нарушения защиты от окружающей атмосферы может привести к повышенному газонасыщению и снижению технологической и хрупкой прочности.

Зона термического влияния, у границы раздела поковка-наплавка, может иметь протяженность 0,8...1,6 мм в зависимости от степени термического воздействия. Ее свойства во многом определяют работоспособность лопатки в условиях циклических нагрузений. Микроструктура ЗТВ имеет мелко-пластинчатое внутризеренное строение на фоне глобулярных выделений  $\alpha$ -фазы. В зоне термического влияния на участке, примыкающем к поковке, наблюдается частичное растворение  $\alpha$ -пластин, что может способствовать повышению пластичности.

Результаты статических испытаний на растяжение показали увеличенные значения предела прочности и сниженные значения пластичности, для образцов со структурой,

изготовленных по первой стратегии. Наилучшие значения показал металл, полученный по второй стратегии. В этом случае значения предела прочности и относительного удлинения сопоставимы со свойствами материала поковки из титанового сплава ВТ6.

Оценка усталостной прочности выявила влияние стратегии выращивания на предел выносливости. Его значения для лопатки, выращенной по второй стратегии, имели наибольший показатель и составили 31 кгс/мм<sup>2</sup> при  $N = 2 \times 10^7$  циклов, по сравнению с вариантом выращивания по первой стратегии, обеспечивающей 28 кгс/мм<sup>2</sup> при тех же условиях испытаний. Структура полученного металла имеет достаточно высокую пластичность. Характер излома образцов после испытаний свидетельствует о развитии вязкого внутризеренного разрушения по ямочному механизму.

#### Выводы:

1. Стратегия выращивания оказывает существенное влияние на фазовый состав, форму фазовых выделений и свойства детали. Наилучшие результаты получены при нанесении формообразующих слоев последовательно в продольном и поперечном направлениях относительно восстанавливаемой части лопатки;

2. Во время лазерной наплавки титанового сплава ВТ6 необходимо контролировать скорость охлаждения наплавленного слоя. Режимы наплавки, обеспечивающие высокие скорости охлаждения, вызывают повышение содержания хрупкой неравновесной  $\alpha'$ -фазы. При замедленном охлаждении в условиях многократных тепловых циклов наблюдается значительное увеличение размера исходного  $\beta$ -зерна в направлении роста, а также развитие  $\beta$ -хрупкости. В обоих случаях снижается пластичность наплавленного металла;

3. Рекомендуемая стратегия выращивания обеспечивает необходимые скорости охлаждения и повышение пластических свойств, за счет формирования равноосных исходных  $\beta$ -зерен, более полного протекания процесса полиморфного превращения, обеспечивающего распад хрупкой неравновесной  $\alpha'$ -фазы, увеличения за счет этого количества пластичных составляющих  $\alpha + \beta$ , изменения формы фазовых выделений и их взаимного расположения;

4. Структура металла, полученная при восстановительной наплавке по рекомендуемой технологии, обеспечивает предел прочности и относительное удлинение сопоставимые со свойствами материала поковки из титанового сплава ВТ6. Значения показателя

усталостной прочности сопоставимы с усталостной прочностью поковки.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 6219916 США, МПК7 В 23 Р 15/00. Метод линейной сварки трением и производство данным методом / Волкер Г. Л.; заявитель и патентообладатель Юнайтед Технолоджи, корп.; № 08/994769; заявл. 19.12.1997; опубл. 24.04.2001. 14 с.

2. Пат. 1771161 СССР, МПК6 В 23 Р 6/04. Способ ремонта деталей / Пузанов С.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель НИИД.; № 4871169/27; заявл. 04.10.1990; опубл. 15.01.1994, Бюл. № 01. 4 с.

3. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие \ [А.Г. Григорьянц, и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 278 с.

4. Горунев А. И. Восстановление титановых лопаток компрессора авиационного газотурбинного двигателя методом лазерной наплавки // *Металлург*. 2017. № 6. С. 80–85.

5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И. Оборудование для лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022 г. 285 с.

6. Ronzhin D.A., Grigoryants A.G., Kholopov A.A. Effect of Operational Parameters on Metal Structure in Products Manufactured by Direct Laser Deposition from VT6 Titanium Powder. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 9, pp. 30–42, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-30-42

7. Dipankar Banerjee, Williams J.C. Perspectives on Titanium Science and Technology // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 844–879.

8. Antonino Ducato, Livan Fratini, Marco La Cascia, Giuseppe Mazzola. An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of Ti-6Al-4V Titanium Alloy // *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2013: Computer Analysis of Images and Patterns*. P. 362–369.

9. Dabrowski R. The Kinetics of Phase Transformations During Continuous Cooling of the Ti6Al4V Alloy from the Single-Phase  $\beta$  / R. Dabrowski // *Range Archives of Metallurgy and Materials*. 2011. Vol. 56. P. 703–707.

10. Carroll B.E., Palmer T.A., Beese A.M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 87. P. 309–320.

11. Srikanth Bontha, Nathan W. Klingbeil, Pamela A. Kobryn, Hamish L. Fraser. Effects of process variables and size-scale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures // *Materials Science and Engineering A*. 2009. Vol. 513-514. P. 311–318.

12. Kyung-Min Hong, Yung C. Shin. Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti-6Al-4V with a multiphysics prediction model // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 237. P. 420–429.

13. Титановые сплавы в машиностроении Л.: «Машиностроение», 1977. 248 с.

14. Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, Ming Gao, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting // *Materials and Design*. 2016. Vol. 108. P. 308–318.



15. Shun Guo, Qingkun Meng, Guangyue Liao, Liang Hu, Xinqing Zhaon. Microstructural evolution and mechanical behavior of metastable  $\beta$ -type Ti-25Nb-2Mo-4Sn alloy with high strength and low modulus // Progress in Natural Science: Materials International 2013. Val. 23(2).P. 174–182.

16. Galarraga H., Warren R.J., Lados D.A., Dehoff R.R., Kirka M.M., Nandwana P. Nandwana. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 685. P. 417–428.

17. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Кириллов. М.: Металлургия, 1979. 248 с.

18. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. М.: Наука, 1965.

19. Titanium. 2nd ed. / G Luetjering, J.C. Williams New York: Springer; 2007. 442.

## REFERENCES

1. Pat. 6219916 USA, IPC7 B 23 P 15/00. The method of linear friction welding and production by this method / Volker G. L.; applicant and patent holder of United Technology Corp.; No. 08/994769; applied for 12/19/1997; publ. 04/24/2001, 14 p.

2. Pat. 1771161 USSR, MPK6 B 23 P 6/04. A method for repairing parts / Puzanov S.G. [et al.]; applicant and patent holder of the NIID.; No. 4871169/27; applied for 10/04/1997; publ. 01/15/1997, cert. no. 01, 4 p.

3. Laser additive technologies in mechanical engineering: a textbook by A.G. Grigoriyants, et al.; edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of the Baumann Moscow State Technical University, 2018, 278 p.

4. Goryunov A. I. Restoration of titanium compressor blades of an aviation gas turbine engine by laser surfacing // Metallurg, 2017, no. 6, pp. 80–85.

5. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Equipment for LBM / ed. by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022, 285 p.

6. Ronzhin D.A., Grigoryants A.G., Kholopov A.A. Effect of Operational Parameters on Metal Structure in Products Manufactured by Direct Laser Deposition from VT6 Titanium Powder. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2022, no. 9, pp. 30–42, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-30-42

7. Dipankar Banerjee, Williams J.C. Perspectives on Titanium Science and Technology // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. P. 844–879.

8. Antonino Ducato, Livan Fratini, Marco La Cascia, Giuseppe Mazzola. An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of Ti-6Al-4V Titanium Alloy // International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2013: Computer Analysis of Images and Patterns. P. 362–369.

9. Dabrowski R. The Kinetics of Phase Transformations During Continuous Cooling of the Ti6Al4V Alloy from the Single-Phase  $\beta$  / R. Dabrowski // Range Archives of Metallurgy and Materials. 2011. Vol. 56. P. 703–707.

10. Carroll B.E., Palmer T.A., Beese A.M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing // Acta Materialia. 2015. Vol. 87. P. 309–320.

11. Srikanth Bontha, Nathan W. Klingbeil, Pamela A. Kobryn, Hamish L. Fraser. Effects of process variables and size-scale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 513-514. P. 311–318.

12. Kyung-Min Hong, Yung C. Shin. Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti-6Al-4V with a multiphysics prediction model // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 237. P. 420–429.

13. Titanium alloys in mechanical engineering Leningrad, «Mashinostroenie», 1977, 248 p.

14. Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, Ming Gao, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting // Materials and Design. 2016. Vol. 108. P. 308–318.

15. Shun Guo, Qingkun Meng, Guangyue Liao, Liang Hu, Xinqing Zhaon. Microstructural evolution and mechanical behavior of metastable  $\beta$ -type Ti-25Nb-2Mo-4Sn alloy with high strength and low modulus // Progress in Natural Science: Materials International 2013. Val. 23(2). P.174–182.

16. Galarraga H., Warren R.J., Lados D.A., Dehoff R.R., Kirka M.M., Nandwana P. Nandwana. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 685. P. 417–428.

17. Welded joints of titanium alloys / V. N. Moiseev, F. R. Kulikov, Yu. G. Kirillov. Moscow: Metallurgiya, 1979, 248 p.

18. Shorshorov M.H. Metallurgical science of steel and titanium alloys welding. Moscow: Nauka, 1965.

19. Titanium. 2nd ed. / G Luetjering, J.C. Williams New York: Springer; 2007. 442

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; одобрена после рецензирования 18.04.2024; принята к публикации 05.06.2023.

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 18.04.2024; assepted for publication 05.06.2023.