

УДК 620.17

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ ХОЛОДНОГО ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА

© 2025 г. А. В. Ильиных^{а, *}, А. М. Паньков^а, А. В. Лыкова^а,
Г. Л. Пермяков^а, М. Ю. Симонов^а, Д. Н. Трушников^а

^аПермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

*E-mail: ilinih@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.11.2024 г.

После доработки 25.11.2024 г.

Принята к публикации 26.11.2024 г.

В работе представлены результаты экспериментального исследования циклической долговечности титанового сплава ВТ6, полученного при аддитивном производстве проволоочно-дуговой наплавкой с использованием метода холодного переноса металла. Данная технология аддитивного производства используется для наплавки крупногабаритных изделий в Лаборатории методов создания и проектирования систем “материал-технология-конструкция” ПНИПУ. Качество полученной заготовки подтверждено результатами химического анализа, микроструктурного исследования и результатами статических испытаний при растяжении. Из напавленной пластины были вырезаны образцы в продольном и поперечном направлениях по отношению к плоскости формирования слоев. Экспериментальные исследования мало- и многоциклового усталости проводились на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ с использованием испытательного оборудования фирмы Instron. По результатам испытаний получены зависимости циклической долговечности от уровня прикладываемых напряжений. Отмечено, что направление вырезки образцов из напавленного фрагмента значительно сказывается на характеристиках сопротивления мало- и многоциклового усталости аддитивного титанового сплава ВТ6. Сделан вывод о наличии значительной анизотропии циклических свойств, которую нужно учитывать при проектировании и производстве изделий из аддитивных материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, проволоочно-дуговая наплавка, холодный перенос металла, титановый сплав, малоцикловая усталость, многоцикловая усталость

DOI: 10.31857/S1026351925030099, EDN: BALUSN

1. Введение. Аддитивные технологии — это современные технологии для производства деталей со сложной геометрией. Аддитивные материалы в настоящее время широко применяются в области строительства, медицины, транспорта и авиации [1–5]. На свойства аддитивных материалов влияют технологические параметры изготовления, качество исходного сырья и последующая термическая и/или механическая обработка [6–11]. Технология послойного формирования позволяет получать детали сложной формы с высокой точностью, что является несомненным преимуществом данной технологии.

Титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) широко применяется при изготовлении деталей авиационной промышленности. ВТ6 обладает хорошими механическими свойствами. Поэтому представляет большой интерес использование этого материала в качестве исходного сырья для аддитивного производства. Получаемые аддитивные материалы по механическим свойствам при статическом нагружении соответствуют материалам, получаемыми традиционными способами.

Усталость является одной из основных проблем разрушения конструктивных элементов [3, 12, 13]. Для деталей из аддитивных материалов проблема усталости наиболее актуальна, что вызывает значительные трудности при их внедрении. Поэтому важным является изучение механического поведения аддитивных материалов в условиях циклического нагружения [12, 14–21]. Информация о механическом поведении аддитивных материалов в условиях усталости является необходимой для прогнозирования усталостного ресурса аддитивных элементов конструкций в реальных эксплуатационных условиях.

На циклическое поведение аддитивных материалов оказывает влияние множество факторов (стратегия сканирования, механическая анизотропия, остаточные напряжения, текстура, дефекты). Основное влияние на усталость оказывают шероховатость поверхности образцов, межслоевая пористость и текстура, которые появляются при послойной наплавке. Различные методы высокотемпературной обработки повышают предел усталостной выносливости образцов, но технологические дефекты полностью устранить не удастся. В результате сохраняется анизотропия усталостной прочности, определяемая в экспериментах на образцах с разной ориентацией [7, 18, 20].

Целью работы является экспериментальное исследование характеристик сопротивления малоцикловой и многоцикловой усталости аддитивного титанового сплава ВТ6, полученного методом трехмерной проволоочно-дуговой наплавки (при использовании технологического процесса холодного переноса металла), при циклических испытаниях на растяжение плоских образцов, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавленных слоев.

2. Объект исследования. Для изготовления трехмерных крупногабаритных деталей в последнее время широко используется проволоочно-дуговое аддитивное производство [22–28]. Получаемые таким способом изделия близки по форме и размерам к исходной трехмерной модели, за счет чего достигается значительная экономия используемого сырья. Одной из разновидностей проволоочно-дуговой наплавки является технологический процесс холодного переноса металла (CMT — Cold Metal Transfer), при котором используется

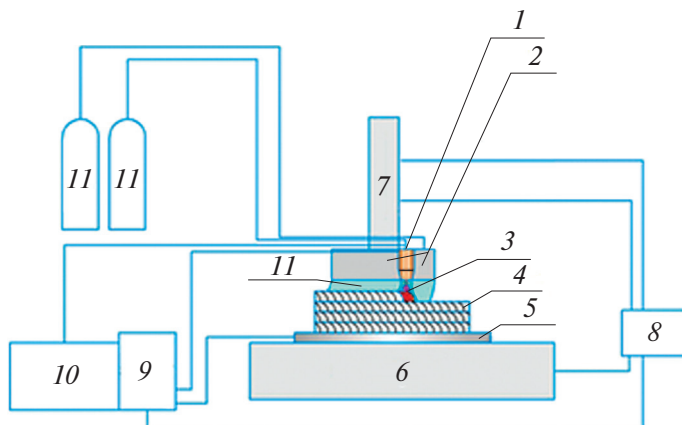


Рис. 1. Схема использования технологического оборудования для аддитивного производства методом проволоочно-дуговой наплавки: 1 – сварочная горелка (welding torch); 2 – защитное устройства (protective device); 3 – область наплавки (deposition zone); 4 – свариваемый металл (weld metal); 5 – подложка (substrate); 6 – манипулятор X, Y (manipulator X, Y); 7 – манипулятор Z (manipulator Z); 8 – пункт управления (control station); 9 – источник питания (power supply); 10 – устройство подачи проволоки (wire feeder); 11 – аргоны (argon).

импульсные ток и подача проволоочного присадочного материала. По сравнению с традиционным процессом дуговой сварки в защитных газах, где дуга горит непрерывно, при СМТ-процессе наблюдается значительно меньший ввод тепла в основной металл. В результате получаемые изделия имеют минимальные остаточные напряжения и деформации.

Наплавка тонкостенных крупногабаритных изделий производилась на базе Лаборатории методов создания и проектирования систем “материал-технология-конструкция” ПНИПУ. При изготовлении заготовки для образцов из сплава ВТ6 использовался комплекс научно-технологического оборудования АТ-300 производства Группы Компаний “Гибридное аддитивное производство” (рис. 1), включающий 3-х осевой фрезерный станок с ЧПУ и источник питания Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ. Принципиальная схема организации аддитивного производства представлена на рис. 1.

Защита металла от окружающего воздуха осуществлялась локальной подачей защитного газа в зону наплавки. Стенки изделия наплавлялись чередующимися слоями с поперечной осцилляцией 45° и -45° . Технологические параметры режима наплавки были выбраны следующим образом: обратная полярность, ток дуги $I_d = 160\text{--}170$ А; напряжение на дуге $U_d = 12,4\text{--}13$ В; скорость подачи проволоки $V_{пп} = 4,8\text{--}6,2$ м/мин; скорость сварки $V_{св} = 100\text{--}135$ см/мин; расход защитного газа аргона $Q_{Ar} = 50$ л/мин. Для повышения тепловложения и устойчивости дуги в мундштук сварочной горелки подавался гелий, обеспечивающий повышение энтальпии дуги. Для улучшения структуры и повышения уровня механических свойств наплавляемого металла был выбран известный из литературных источников режим ТО для сплава ВТ6 – изотермический отжиг: нагрев до 850°C , выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 550°C ,

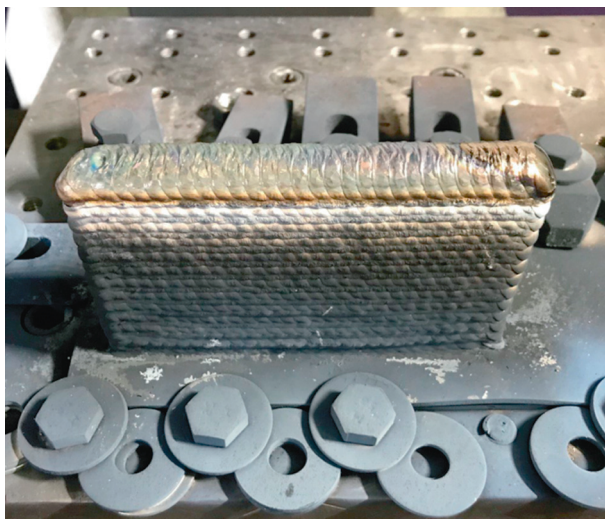


Рис. 2. Фотография напавленной заготовки из титанового сплава BT6.

выдержка 0.5 ч. На рис. 2 показан результат тестовой наплавки небольшого фрагмента в виде тонкой стенки из титанового сплава BT6.

Исследование химического состава напавленного изделия и проволоки проводили в соответствии с отраслевым стандартом (ОСТ1 90013-78 – Сплавы титановые. Марки). Для этого на каждом исследуемом образце делали по 3–4 замера химического состава с последующим расчетом средних значений полученных величин. В табл. 1 представлены средние значения результатов измерений, полученные с использованием оптико-эмиссионного анализатора PMI Master Pro (метод wet chemistry). Установлено, что содержание химических элементов в напавленном образце находится в рамках допуска согласно отраслевому стандарту.

Таблица 1. Результаты анализа химического состава аддитивного титанового сплава BT6

Наименование образца	Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	O	N	H	C
Напавленный образец	90.5	5.30	3.81	0.0381	<0.015	0.118	0.13	0.0095	0.0018	0.0109
Проволока	Ос-нова	5.92	3.75	0.0391	<0.015	0.115	0.16	0.0058	0.0047	0.0129
Требования ОСТ1-90013-81	Ос-нова	5.3–6.8	3.5–5.3	≤0.30	≤0.10	≤0.30	≤0.20	≤0.05	≤0.015	≤0.10

3. Металлографический анализ. Исследование напавленного титанового сплава BT6 (СМТ-BT6) в нетравленном состоянии в продольном и поперечном направлениях показало, что в теле заготовок дефектов в виде пор, трещин,



Рис. 3. Панорама поверхности образца после травления.

раковин не обнаружено. Загрязненность титанового сплава ВТ6 неметаллическими включениями низкая, балл загрязненности составляет не более 1. Анализ микроструктуры наплавленного титанового сплава ВТ6 производился на микрошлифах, изготовленных на шлифовально-полировальном станке Top Tech серии Plato-NA модель FS-B. Изображения микроструктуры получены с помощью светового инвертированного микроскопа OlympusGX 51 при увеличении до 1000 крат и программного обеспечения Olympus Stream Motion 1.8.

При наплавке СМТ-ВТ6 формируется структура, состоящая из первичных преимущественно столбчатой формы β -зерен, получившихся за счет транс-кристаллитного роста в результате собирательной рекристаллизации (рис. 3). Длина столбчатых зерен может достигать 5000 мкм.

Внутри β -зерен присутствует субструктура, представленная α -фазой (α -оторочка) и игольчатой мартенситной α' -фазой разной дисперсности с длиной до 60 мкм. В целом субструктура β -зерен представлена так называемым “корзиночным плетением” (рис. 4). Встречаются как тонкие, так и более утолщенные границы β -зерен. Толщина α -оторочки в рамках одного и того же образца имеет разную величину в диапазоне 2–15 мкм, не зависящую от режима наплавки и дальнейшей обработки. В субструктуре α' -пластин были обнаружены двойники отжига, что характерно для рекристаллизованного состояния после проведения отжига СМТ-ВТ6. Также наблюдаются фрагментированные участки мартенситной α' -фазы, что говорит о частичном распаде исходной структуры и делении α' -фазы.

Последующая после наплавки термическая обработка приводит к выравниванию структуры по всему сечению образцов, однако структурная анизотропия все равно сохраняется. В работе [10] авторами приведены масштабные исследования основных механических характеристик при статическом растяжении разных наплавленных конструкционных сплавов (в том числе для СМТ-ВТ6). В работе было показано, что наплавленный по технологии холодного переноса металла СМТ-ВТ6 по механическим характеристикам не уступает поковке. Однако приведенный во введении анализ литературных

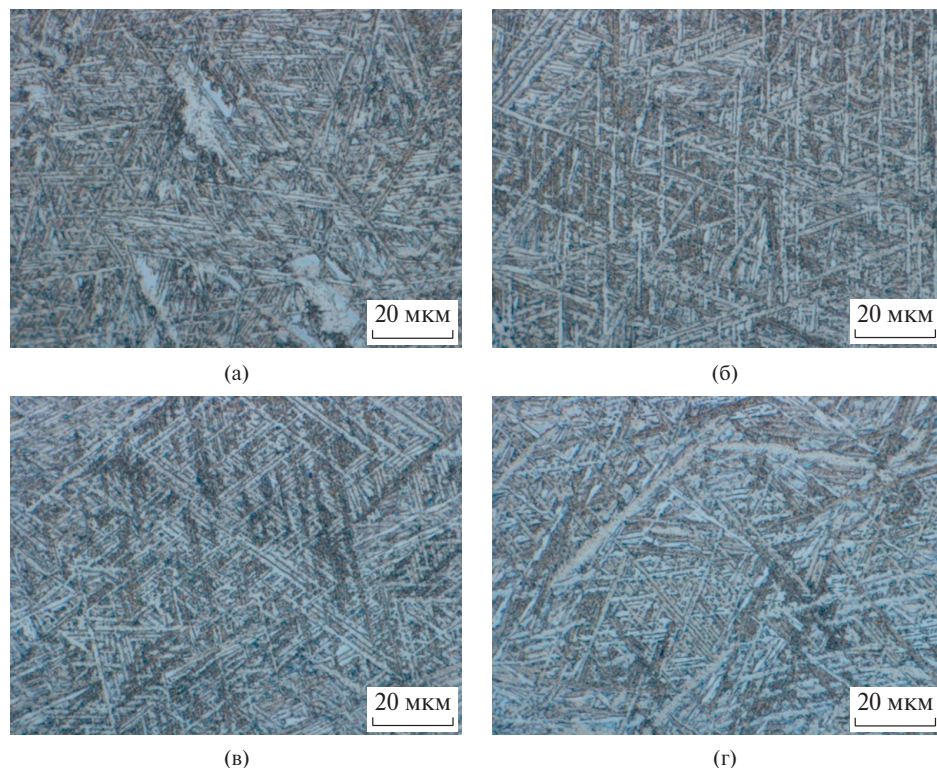


Рис. 4. Фотографии микроструктуры центральной (а, в) и периферийной (б, г) частей образцов в поперечном (а, б) и продольном (в, г) направлениях.

источников показал, что для более полной оценки качества наплавленных конструкционных материалов является не достаточной только оценка основных механических характеристик при статическом нагружении, которые демонстрируют изотропию упругих, пластических и прочностных характеристик. Требуется проведение дополнительных циклических испытаний на образцах, вырезанных в разных направлениях из наплавленных заготовок.

4. Методика испытаний. Циклические испытания были проведены на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Экспериментальные исследования вырезанных из наплавленной пластины образцов СМТ-ВТ6 на мало- и многоцикловую усталость при растяжении выполнялись на испытательных системах Instron 8801 и Instron E10000 с максимальными осевыми усилиями 100 и 10 кН соответственно.

Образцы для испытаний на усталость при растяжении были вырезаны из наплавленной заготовки методом электроэрозии. С целью экономии наплавленного материала была выбрана плоская форма образцов с прямоугольным поперечным сечением. После электроэрозии образцы шлифовались и полировались для обеспечения шероховатости поверхности $Ra \leq 0,16$ мкм. Толщина вырезанных образцов после полировки составила около 2.0 мм. Общая

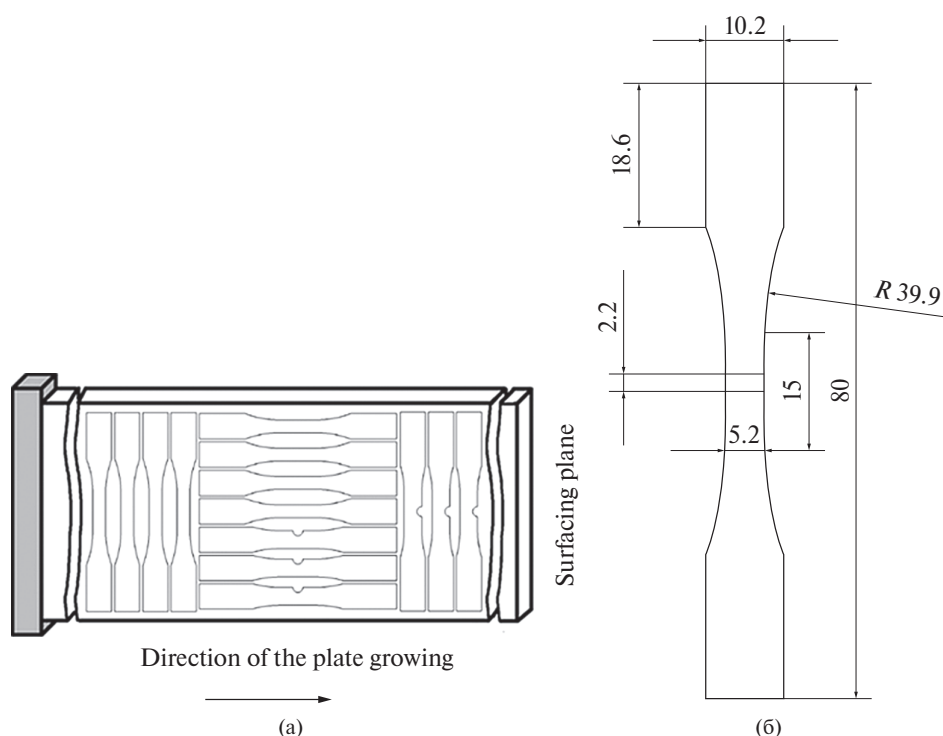


Рис. 5. Схема вырезки из напавленной пластины (а) и размеры (б) образцов для циклических испытаний. Рис. 5. Схема вырезки из напавленной пластины (а) и размеры (б) образцов для циклических испытаний.

длина образцов равнялась 80 мм. Схема вырезки образцов показана на рис. 5а. На рис. 5а образцы ориентированы под двумя углами 0° (горизонтальные образцы) и 90° (вертикальные образцы) по отношению к плоскости напавки. Эскиз с размерами образцов для испытаний представлен на рис. 5б.

Перед испытанием на малоцикловую усталость на образец устанавливался навесной датчик осевых деформаций Instron 2620-603 с диапазоном измерения деформации $\pm 10\%$ и базой 10 мм. При испытаниях на многоцикловую усталость датчик осевых деформаций не использовался. Уровни нормальных напряжений для испытаний на малоцикловую усталость выбирались таким образом, чтобы число циклов до разрушения в испытании примерно получалось в диапазоне от 10^3 до 10^5 циклов, что соответствует диапазону малоциклового усталости. Частота испытаний на мало- и многоцикловую усталость равнялась 1 и 20 Гц соответственно.

Образцы испытывали при комнатной температуре. Был выбран режим нагружения с контролем осевых напряжений по синусоидальной форме цикла с коэффициентом асимметрии $R\sigma = 0$. При проведении испытаний определяли число циклов до разрушения N . Критерием остановки испытания являлось разделение образца на две части.

5. Результаты испытаний. Проведены серии циклических испытаний с контролем параметров цикла по нормальным напряжениям для образцов из СМТ-ВТ6, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавленных слоев. В табл. 2 приведены новые экспериментальные данные, показывающие влияние направления вырезки образцов на характеристики сопротивления мало- и многоциклового усталости наплавленного титанового сплава ВТ6 при растяжении. Для аппроксимации результатов испытаний использовалась степенная зависимость $N = C \cdot (\sigma_a)^D$. Значения материальных констант материала C и D для образцов, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях, приведены в табл. 3. Для дополнительной статистической обработки были рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) результатов экспериментальных исследований от линии регрессии [29]:

$$S(\lg N) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N_i})^2}, \quad (5.1)$$

где n — количество результатов испытаний для образцов, ориентированных в заданном направлении; $\lg N_i$ — десятичные логарифмы долговечностей, полученных в эксперименте; $\overline{\lg N_i}$ — десятичные логарифмы долговечностей для заданного уровня напряжений, определенные по линии регрессии вида $\lg N = \lg [C \cdot (\sigma_a)^D]$. Результаты статистической обработки приведены в табл. 3.

На рис. 6 в логарифмических координатах представлены результаты экспериментальных исследований в графической форме в виде зависимости максимального напряжения в цикле σ_{\max} (МПа) от числа циклов до разрушения N . Из рис. 6 видно, что направление вырезки образцов значительно сказывается на циклической долговечности аддитивного титанового сплава ВТ6.

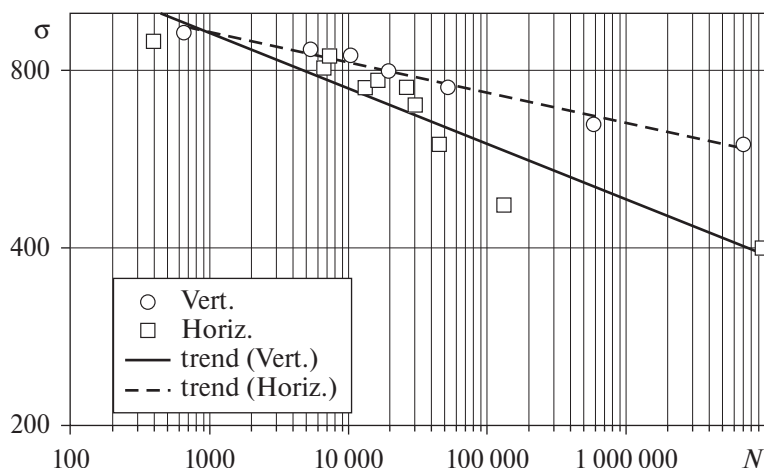
Таблица 2. Результаты испытаний на усталость СМТ-ВТ6

Вертикальные образцы			Горизонтальные образцы		
σ_a , МПа	N	E^* , ГПа	σ_a , МПа	N	E^* , ГПа
375	26021	121	375	52015	—
375	13 259	116	325	580 075	—
350	29838	121	400	19 599	123
300	44679	—	425	10 370	117
238	131 943	—	300	7 071 572	—
200	9 427 111	—	435	5348	114
385	16 323	118	465	650	109
405	6608	110			
425	7326	110			
450	391	109			

E^* — модуль Юнга, величина которого определена в 1-м цикле испытания (прочерк в соответствующих ячейках означает, что испытание было проведено без датчика деформаций).

Таблица 3. Статистическая обработка результатов испытаний при “мягком” нагружении для СМТ-ВТ6

Вертикальные образцы			Горизонтальные образцы		
С	D	СКО по формуле (5.1)	С	D	СКО по формуле (5.1)
1776.9	−0.094	0.46	1324.1	−0.051	0.21

**Рис. 6.** Кривые усталости аддитивного титанового сплава ВТ6 для образцов, вырезанных из заготовки в вертикальном (□) и горизонтальном (○) направлениях.

Наименьшие характеристики сопротивления усталости имеют вертикальные образцы. Количественно при многоциклового усталости долговечность отличается на 1–2 порядка у образцов, вырезанных в горизонтальном и вертикальном направлениях. Данный факт свидетельствует о наличии значительной анизотропии циклических свойств аддитивного материала СМТ-ВТ6. При малоциклового усталости отличие в циклической долговечности у образцов, ориентированных в вертикальном и горизонтальном направлениях, уменьшается с увеличением амплитуды напряжений. Анализ приведенных в табл. 2 значений модуля Юнга показывает, что корреляция между упругими и циклическими характеристиками материала отсутствует. Можно считать, что СМТ-ВТ6 обладает изотропией упругих свойств.

Среднеквадратическое отклонение, характеризующее разброс результатов экспериментальных исследований, получилось в два раза большим по величине для вертикально ориентированных образцов. Данный факт может свидетельствовать о влиянии процесса послойной наплавки заготовки на микроструктуру аддитивного материала в вертикальном направлении, что требует проведения дополнительных микроструктурных исследований или химического анализа на наличие “вредных” примесей.

Для анализа механического поведения титанового сплава СМТ-ВТ6 для двух образцов проведено сопоставление петель механического гистерезиса

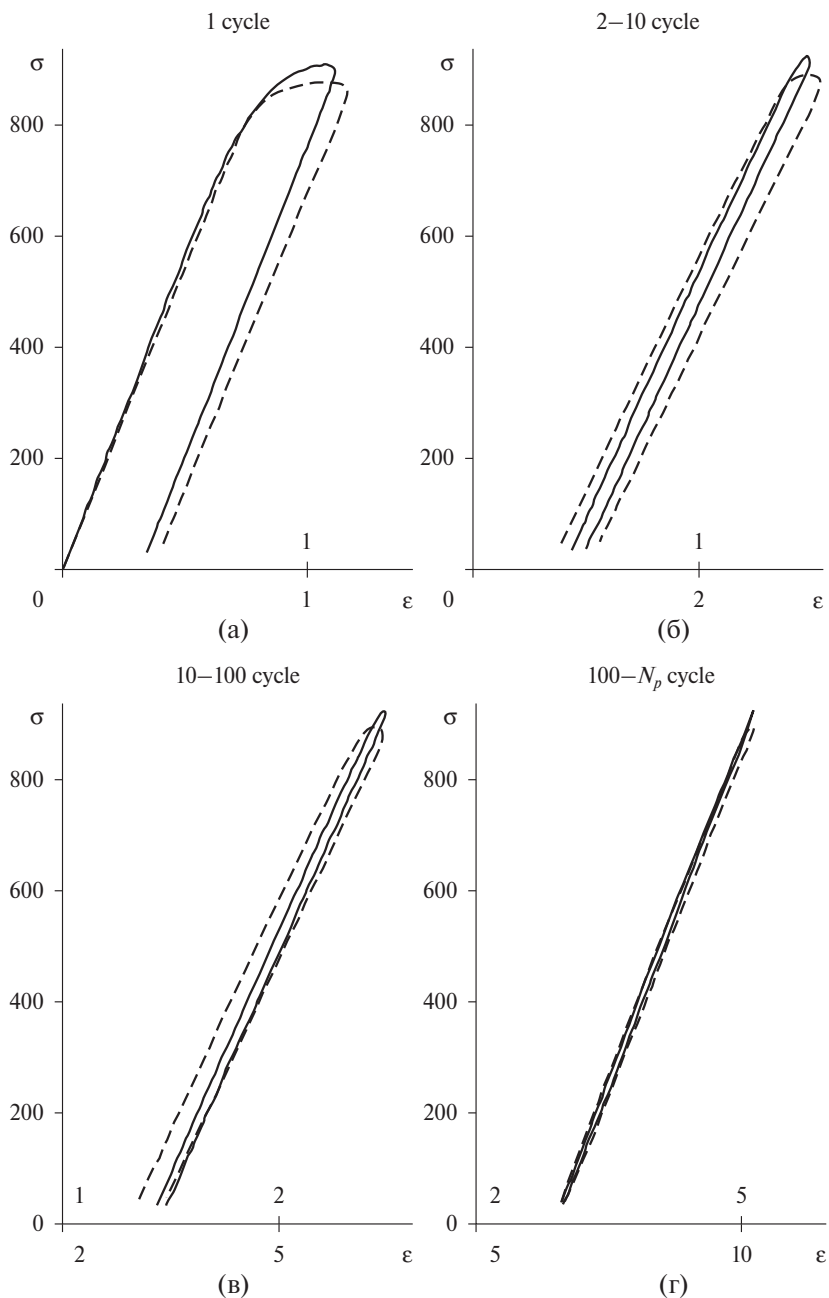


Рис. 7. Зависимости нормальных напряжений σ от осевых деформаций ϵ , построенные для средних циклов из 4-х выбранных диапазонов долговечности для образцов, вырезанных из заготовки в вертикальном (штриховая линия, нижняя шкала у оси деформаций) и горизонтальном (сплошная линия, верхняя шкала у оси деформаций) направлениях.

для 1-х циклов и нескольких средних циклов из 3-х диапазонов долговечности (от 2 до 10, от 10 до 100 и от 100 до N циклов). Построение зависимостей нормальных напряжений σ от осевых деформаций ε производилось для вертикального и горизонтального образцов, испытанных при амплитудах напряжения 450 и 460 МПа соответственно (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что ширина петли механического гистерезиса уменьшается с увеличением числа циклов в испытании, что свидетельствует о циклически упрочняемом характере механического поведения наплавленного титанового сплава СМТ-ВТ6 как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. После примерно 100 циклов испытания при заданных нагрузках петля механического гистерезиса вырождается (см. рис. 7г), а величина остаточных пластических деформаций в каждом цикле стремится к нулю. При значениях амплитуд напряжений от 350 до 400 МПа незначительная петля механического гистерезиса наблюдается только в первых 10 циклах испытания, после которых наплавленный материал циклически деформируется упруго. А при амплитудах напряжений меньше 350 МПа петля механического гистерезиса не наблюдается даже в 1-м цикле.

Проведенные ранее авторами исследования циклической долговечности сплава СМТ-ВТ6 при наличии концентрации напряжений [30] демонстрируют схожие результаты. В частности, было показано, что циклическая долговечность при наличии концентрации напряжений выше у образцов, вырезанных в горизонтальном направлении. Но у этих образцов была отмечена наибольшая чувствительность к концентрации напряжений, чем у образцов, имеющих вертикальную ориентацию.

Заключение. Получены новые данные о зависимости циклической долговечности титанового сплава СМТ-ВТ6, полученного аддитивным производством проволоочно-дуговой наплавкой с использованием технологического процесса холодного переноса металла. Показано, что направление вырезки образцов из наплавленной заготовки значительно влияет на циклическую долговечность. Циклическая долговечность при многоциклового усталости вертикально ориентированных образцов получилось на 1–2 порядка ниже, чем у образцов, вырезанных в горизонтальном направлении. В диапазоне малоциклового усталости разница в циклической долговечности составляет менее одного порядка. Приведенные факты свидетельствуют о наличии эффекта анизотропии характеристик сопротивления мало- и многоциклового усталости для титанового сплава СМТ-ВТ6. Анализ петель гистерезиса при малоциклового нагружении показывает, что исследуемый титановый сплав является циклически упрочняемым конструкционным материалом.

Для анализа качества аддитивных материалов является недостаточным проведение только статических испытаний с определением основных механических характеристик материала. Необходимо дополнительно оценивать зависимость циклических характеристик сопротивления усталости аддитивных материалов на образцах, вырезанных из наплавленных заготовок в разных направлениях. С целью снижения анизотропии характеристик сопротивления усталости в последующих работах будет опробовано применение комбинированной термомодеформационной обработки, когда каждый наплавленный слой

подвергается пластической деформации посредством проковки или прокатки специальным инструментом.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00900).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao B., Wang H., Qiao N., Wang C., Hu M. Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V alloy scaffold that is fabricated by electron beam melting and selective laser melting for implantation in vivo // Mater. Sci. Eng. C. 2017. V. 70. P. 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.045>
2. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E. et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review // Mater. Des. 2021. V. 209. 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
3. Gorelik M. Additive manufacturing in the context of structural integrity // Int. J. Fatigue. 2017. V. 94. Part 2. P. 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.005>
4. Manzhurov A.V., Parshi, D.A. Influence of the erection regime on the stress state of a viscoelastic arched structure erected by an additive technology under the force of gravity // Mech. Solids. 2015. V. 50. P. 657–675. <https://doi.org/10.3103/S0025654415060072>
5. Manzhurov A.V., Parshin D.A. Application of prestressed structural elements in the erection of heavy viscoelastic arched structures with the use of an additive technology // Mech. Solids. 2016. V. 51. P. 692–700. <https://doi.org/10.3103/S0025654416060091>
6. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // Авиаци. материалы и технологии. 2020. № 1. С. 38–44. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44>
7. Butt, M.M., Laieghi, H., Kivssn, V. et al. Fatigue performance in additively manufactured metal alloys // Prog. Addit. Manuf. 2024. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00738-2>
8. Черемнов А.М., Гурьянов Д.А., Чумаевский А.В., Кобзев А.Е., Рубцов В.Е. Закономерности образования дефектов и неоднородностей структуры при фрикционной перемешивающей обработке изделий из титанового сплава, полученных методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии // Вестник СибГИУ. 2024. № 1. С. 58–68. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-58-6](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-58-6)
9. Акулова С.Н., Мышкина А.В., Варушкин С.В., Неулыбин С.Д., Кривоносова Е.А., Щицын Ю.Д., Овсяннская Т.В. О влиянии схем плазменной наплавки на формирование структуры и свойств титанового сплава // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 3. С. 75–83. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.3.09>
10. Баяндин Ю.В., Дудин Д.С., Ильиных А.В., Пермиков Г.Л., Чудинов В.В., Келлер И.Э., Трушников Д.Н. Характеристики прочности и пластичности ряда металлических сплавов и нержавеющей сталей, созданных проволоочно-дуговой наплавкой, в широком диапазоне скоростей деформаций // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. № 1. С. 33–45. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.04>

11. Панин П.В., Лукина Е.А., Наприенко С.А., Алексеев Е.Б. Влияние термической обработки на структуру и свойства TiAl-сплава системы Ti-Al-V-Nb-Cr-Gd, синтезированного методом селективного электронно-лучевого сплавления // Физ. мезомех. 2023. Т. 26. № 6. С. 61–74.
https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_6_61
12. Liu H., Yu H., Guo C., Chen X., Zhong S., Zhou L., Osman A., Lu J. Review on fatigue of additive manufactured metallic alloys: microstructure, performance, enhancement, and assessment methods // Adv. Mater. 2023. V. 36. № 17. 2306570.
<https://doi.org/10.1002/adma.202306570>
13. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // Изв. РАН. МТТ. 2014. № 3. С. 66–78.
14. Zhang, P., He, A.N., Liu, F., Zhang, K., Jiang, J., Zhang, D.Z. Evaluation of low cycle fatigue performance of selective laser melted titanium alloy Ti–6Al–4V // Metals. 2019. V. 9. № 10. 1041.
<https://doi.org/10.3390/met9101041>
15. Bressan, S., Ogawa, F., Itoh, T., Berto, F. Low cycle fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V under non-proportional and proportional loading // Frattura ed Integrità Strutturale. 2019. V. 13. № 48. P. 18–25.
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.48.03>
16. Fatemi A., Molaei R., Sharifimehr S., Shamsaei N., Phan N. Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect // Int. J. Fatigue. 2017. V. 99. P. 187–201.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.002>
17. Cao F., Zhang T., Ryder M.A. et al. A review of the fatigue properties of additively manufactured Ti-6Al-4V // JOM. 2018. V. 70. P. 349–357.
<https://doi.org/10.1007/s11837-017-2728-5>
18. Hassanifard S., Adibeig M.R., Hashemi S.M. Determining strain-based fatigue parameters of additively manufactured Ti–6Al–4V: effects of process parameters and loading conditions // Int J Adv Manuf Technol. 2022. V. 121. P. 8051–8063.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09907-5>
19. Rehmer B., Bayram F., Ávila Calderón L.A. et al. Elastic modulus data for additively and conventionally manufactured variants of Ti-6Al-4V, IN718 and AISI 316 L // Sci. Data. 2023. V. 10. 474.
<https://doi.org/10.1038/s41597-023-02387-6>
20. Qian M., Xu W., Brandt M. et al. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties // MRS Bulletin. 2016. V. 41. P. 775–784.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2016.215>
21. Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Чумаевский А.В., Астафурова Е.Г. Научные подходы к микро-, мезо- и макроструктурному дизайну объемных металлических и полимерных материалов с использованием метода электронно-лучевого аддитивного производства // Физ. мезомех. 2022. Т. 25. № 4. С. 5–18.
https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_5
22. Gou J., Wang Z., Hu S., Shen J., Liu Z., Yang C. et al. Effect of cold metal transfer mode on the microstructure and machinability of Ti–6Al–4V alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing in ultra-precision machining // J. Mater. Res. Technol. 2022. V. 21. P. 1581–1594.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.011>

23. Mohd Mansor M.S., Raja S., Yusof F., Muhamad M.R., Manurung Y.H., Adenan M.S. *et al.* Integrated approach to wire arc additive manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies // *J. Mater. Res. Technol.* 2024. V. 30. P. 2478–2499.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>
24. Xizhang Chen, Su, C., Wang, Y. *et al.* Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System // *J. Surf. Investig.* 2018. V. 12. P. 1278–1284.
<https://doi.org/10.1134/S102745101901004X>
25. Shchitsyn Y.D., Krivososova E.A., Trushnikov D.N., Olshanskaya T.V., Kartashov M.F., Kartashov M.F., Neulybin S.D. Use of CMT-Surfacing for Additive Formation of Titanium Alloy Workpieces // *Metallurg.* 2020. V. 64. № 1–2. P. 67–74.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00967-0>
26. Shchitsyn Y., Kartashev M., Krivososova E., Olshanskaya T., Trushnikov D. Formation of structure and properties of two-phase Ti6Al–4V alloy during cold metal transfer additive deposition with interpass forging // *Materials.* 2021. V. 14. № 16. 4415.
<https://doi.org/10.3390/ma14164415>
27. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Olshanskaya T.V., Mindibaev M.R., Shchitsyn Y.D., Saucedo-Zendejo F.R. Improving VT6 titanium-alloy components produced by multilayer surfacing // *Russ. Eng. Res.* 2021. V. 41. P. 848–850.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X21090264>
28. Utyaganova V.R., Vorontsov A.V., Eliseev A.A., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N., Savchenko N.L. *et al.* Structure and phase composition of Ti–6Al–4V alloy obtained by electron-beam additive manufacturing // *Russ. Phys.* 2019. V. 62. № 8. P. 1461–1468.
<https://doi.org/10.1007/s11182-019-01864-z>
29. Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 // *Труды ВИАМ.* 2022. № 1. С. 97–110.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110>
30. Ильиных А.В., Паньков А.М., Лыкова А.В., Пермяков Г.Л. Экспериментальное исследование циклической долговечности аддитивного титанового сплава ВТ6 в условиях концентрации напряжений // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2023. № 75. С. 120–132.
<https://doi.org/10.15593/2224-9982/2023.75.10>

FATIGUE LIFE OF TITANIUM ALLOY TI–6AL–4V OBTAINED BY ADDITIVE COLD METAL TRANSFER TECHNOLOGY

A. V. Ilinikh^{a,*}, A. M. Pankov^a, A. V. Lykova^a, G. L. Permyakov^a, M. Yu. Simonov^a, D. N. Trushnikov^a

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

^a*E-mail: ilinih@yandex.ru*

Abstract – The work presents the experimental study results of the titanium alloy Ti–6Al–4V fatigue life obtained during additive manufacturing by wire-arc surfacing using the cold metal transfer welding. This additive manufacturing technology is used for fusing large-sized products in the Laboratory of methods for creating and designing systems “material-technology-construction” PNRPU. The quality of the resulting blank is confirmed by the results of chemical analysis, microstructural research and static tensile tests. Samples were cut from the deposited plate in the longitudinal and transverse direction with respect to the formation plane of the layers. Experimental studies of fatigue life were conducted in the Center of Experimental Mechanics PNRPU using Instron testing equipment. According to the test results, the dependences of cyclic durability on the level of applied stresses are obtained. It is noted that the direction of cutting samples from the deposited fragment significantly affect to the resistance characteristics of the low- and high-cycle fatigue of the additive titanium alloy VT6. It is concluded that there is a significant anisotropy of cyclic properties, which must be taken into account when designing and manufacturing products from additive materials.

Keywords: additive manufacturing, wire-arc surfacing, cold metal transfer, titanium alloy, low cycle fatigue, fatigue life

REFERENCES

1. Zhao B., Wang H., Qiao N., Wang C., Hu M. Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V alloy scaffold that is fabricated by electron beam melting and selective laser melting for implantation in vivo // *Mater. Sci. Eng. C.* — 2017. — V. 70. — P. 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.045>
2. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E. et al. Metal additive manufacturing in aerospace // *Mater. Des.* — 2021. — V. 209. 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
3. Gorelik M. Additive manufacturing in the context of structural integrity // *Int. J Fatigue.* 2017. V. 94. Part 2. P. 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.005>
4. Manzhairov A.V., Parshin D.A. Influence of the erection regime on the stress state of a viscoelastic arched structure erected by an additive technology under the force of gravity // *Mech. Solids.* 2015. V. 50. P. 657–675. <https://doi.org/10.3103/S0025654415060072>
5. Manzhairov A.V., Parshin D.A. Application of prestressed structural elements in the erection of heavy viscoelastic arched structures with the use of an additive technology // *Mech. Solids.* 2016. V. 51. P. 692–700. <https://doi.org/10.3103/S0025654416060091>
6. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Investigation of the formation of the structure of the material of titanium alloy VT6, obtained by the methods of additive technologies // *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2020. № 1. C. 38–44. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44>
7. Butt M.M., Laieghi H., Kvyssn V. et al. Fatigue performance in additively manufactured metal alloys // *Prog. Addit. Manuf.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00738-2>

8. *Cheremnov A.M., Gurianov D.A., Chumaevskii A.V., Kobzev A.E., Rubtsov V.E.* Regularities of defects and structural inhomogeneities formation during friction stir processing of titanium alloy products obtained by wire-feed electron beam additive manufacturing // Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2024. V. 1. № 47. P. 58–68.
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-58-68](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-58-68)
9. *Akulova S.N., Myshkina A.V., Varushkin S.V., Neulybin S.D., Krivonosova E.A., Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V.* About influence of plasma surface schemes on the formation of the structure and properties of titanium alloy // Bulletin PNRPU. Mech. Eng. Mater. Sci. 2021. V. 23. № 3. P. 75–83.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.3.09>
10. *Bayandin Yu.V., Dudin D.S., Ilyinykh A.V., Permyakov G.L., Chudinov V.V., Keller I.E., Trushnikov D.N.* Strength and ductility characteristics of metal alloys and stainless steels created by wire-arc surfacing in a wide range of strain rates // PNRPU Mechanics Bulletin. 2023. № 1. P. 33–45.
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.04>
11. *Panin P.V., Lukina E.A., Naprienk S.A., Alekseev E.B.* Effect of heat treatment on the structure and properties of titanium aluminide alloy Ti-Al-V-Nb-Cr-Gd produced by selective // Physical Mesomechanics. 2023. V. 26. № 6. P. 61–74.
https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_6_61
12. *Liu H., Yu H., Guo C., Chen X., Zhong S., Zhou L. et al.* Review on fatigue of additive manufactured metallic alloys: microstructure, performance, enhancement, and assessment methods // Adv. Mater. 2023. V. 36. 2306570.
<https://doi.org/10.1002/adma.202306570>
13. *Volkov I.A., Korotikh Y.G.* Modeling of fatigue life of materials and structures under low-cycle loading // Mech. Solids. 2014. V. 49. № 3. P. 290–301.
<https://doi.org/10.3103/S0025654414030054>
14. *Zhang P., He A.N., Liu F., Zhang K., Jiang J., Zhang D.Z.* Evaluation of Low Cycle Fatigue Performance of Selective Laser Melted Titanium Alloy Ti–6Al–4V // Metals. 2019. V. 9. 1041.
<https://doi.org/10.3390/met9101041>
15. *Bressan S., Ogawa F., Itoh T., Berto F.* Low cycle fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V under non-proportional and proportional loading // Frattura ed Integrità Strutturale. 2019. V. 48. P. 18–25.
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.48.03>
16. *Fatemi A., Molaei R., Sharifimehr S., Shamsaei N., Phan N.* Torsional fatigue behavior of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect // Int. J. Fatigue. 2017. V. 99. P. 187–201.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.002>
17. *Cao F., Zhang T., Ryder M.A. et al.* A Review of the Fatigue Properties of Additively Manufactured Ti-6Al-4V // JOM. 2018. V. 70. P. 349–357.
<https://doi.org/10.1007/s11837-017-2728-5>
18. *Hassanifard S., Adibeig M.R., Hashemi S.M.* Determining strain-based fatigue parameters of additively manufactured Ti–6Al–4V: effects of process parameters and loading conditions // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2022. V. 121. P. 8051–8063.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09907-5>
19. *Rehmer B., Bayram F., Ávila Calderón L.A. et al.* Elastic modulus data for additively and conventionally manufactured variants of Ti-6Al-4V, IN718 and AISI 316 L // Sci. Data. 2023. V. 10. 474.
<https://doi.org/10.1038/s41597-023-02387-6>

20. *Qian M., Xu W., Brandt M. et al.* Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties // *MRS Bulletin*. 2016. V. 41. P. 775–784.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2016.215>
21. *Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G.* Scientific approaches to micro-, mesoand macrostructural design of bulk metallic and polymetallic materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing // *Physical Mesomechanics*. 2022. V. 25. № 4. P. 5–18.
https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_5
22. *Gou J., Wang Z., Hu S., Shen J., Liu Z., Yang C. et al.* Effect of cold metal transfer mode on the microstructure and machinability of Ti-6Al-4V alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing in ultra-precision machining // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 21. P. 1581–1594.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.011>
23. *Mohd Mansor M.S., Raja S., Yusof F., Muhamad M.R., Manurung Y.H., Adenan M.S. et al.* Integrated approach to wire arc additive manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies // *J. Mater. Res. Technol.* 2024. V. 30. P. 2478–2499.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>
24. *Xizhang Chen, Su C., Wang Y. et al.* Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System // *J. Surf. Investig.* 2018. V. 1. P. 1278–1284.
<https://doi.org/10.1134/S102745101901004X>
25. *Shchitsyn Y.D., Krivonosova E.A., Trushnikov D.N., Olshanskaya T.V., Kartashov M.F., Kartashov M.F., Neulybin S.D.* Use of CMT-Surfacing for Additive Formation of Titanium Alloy Workpieces // *Metallurg.* 2020. V. 64. № 1–2. P. 67–74.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00967-0>
26. *Shchitsyn Y., Kartashev M., Krivonosova E., Olshanskaya T., Trushnikov D.* Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging // *Materials*. 2021. V. 14. № 16. 4415.
<https://doi.org/10.3390/ma14164415>
27. *Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Olshanskaya T.V., Mindibaev M.R., Shchitsyn Y.D., Saucedo-Zendejo F.R.* Improving VT6 Titanium-Alloy Components Produced by Multilayer Surfacing // *Russ. Eng. Res.* 2021. V. 41. № 9. 848850.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X21090264>
28. *Utyaganova V.R., Vorontsov A.V., Eliseev A.A., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N., Savchenko N.L. et al.* Structure and Phase Composition of Ti-6Al-4V Alloy Obtained by Electron-Beam Additive Manufacturing // *Russ. Phys.* 2019. V. 62. № 8. P. 1461–1468.
<https://doi.org/10.1007/s11182-019-01864-z>
29. *Hodinev I.A., Gorbovets M.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V.* Low-cycle fatigue at elevated temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting // *Trudy VIAM*. 2022. V. 1. № 107.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-1-97-110>
30. *Ilinykh A.V., Pankov A.M., Lykova A.V., Permyakov G.L.* Experimental study of additive titanium alloy TI-6AL-4V cyclic durability under conditions of stress concentration. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2023. V. 75. P. 120–132.
<https://doi.org/10.15593/2224-9982/2023.75.10>