

УДК 629.7.018.4

Исследование физико-механических характеристик дисперсно-упрочненной металлокерамики Ti-4.25Al-2V с добавлением SiC, изготовленной методом прямого лазерного выращивания

И.С. Магидов¹, К.В. Михайловский², С.А. Шальнова³,
О.Г. Климова-Корсмик³

¹ АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

³ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Study of the physico-thermomechanical properties of the Ti-4.25Al-2V dispersion-hardened metal ceramics with SiC addition manufactured by the direct laser growing

I.S. Magidov¹, K.V. Mikhailovsky², S.A. Shalnova³, O.G. Klimova-Korsmik³

¹ Raduga State Machine-Building Design Bureau named after A.Ya. Bereznayak

² Bauman Moscow State Technical University

³ St. Petersburg State Marine Technical University

С развитием аддитивных технологий в области металлов возрастает интерес к исследованиям, направленным на повышение функциональных характеристик деталей летательных аппаратов. К основным направлениям относится добавление керамических частиц (оксидной, карбидной и нитридной керамики) в порошки металлов и отработка технологических режимов. Проведены исследования по прогнозированию физико-механических характеристик дисперсно-упрочненного композиционного материала, изготовленного методом прямого лазерного выращивания. Объектом исследования выбран титановый сплав Ti-4.25Al-2V с 1%-ной добавкой керамических частиц SiC. Рассмотрен многомасштабный подход к моделированию на микро- и макроуровнях. На микроуровне построен представительный элемент объема дисперсно-упрочненного композиционного материала с учетом формы частиц SiC для прогнозирования жесткостных и прочностных характеристик, в том числе в зависимости от температуры. На макроуровне с помощью численного моделирования изучены особенности пластического деформирования и разрушения образцов из рассматриваемого материала, изготовленных методом прямого лазерного выращивания. Моделирование выполнено на базе коммерческих программных комплексов ANSYS и MSC.Digimat. Показано, что добавление частиц SiC приводит к повышению физико-механических характеристик сплава, в том числе при температуре до 450 °C. Результаты моделирования оказались хорошо согласованными с данными экспериментальных исследований: погрешность прогнозирования модуля упругости при растяжении составила 5 %, предела прочности — 8 %. Предложенный подход к прогнозированию физико-механических характеристик дисперсно-упрочненного композиционного материала из титанового сплава Ti-4.25Al-2V с 1%-ной добавкой керамических частиц SiC может представлять интерес для изучения других металломатричных композиционных материалов, изготовленных методом прямого лазерного выращивания.

EDN: LDBHWI, <https://elibrary/ldbhwI>

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, аддитивные технологии, металло-керамика, дисперсное упрочнение, математическое моделирование характеристик

Development of the additive technologies application in metals envisages an increasing interest in research aimed at improving functional characteristics of the aircraft parts. One of the main approaches is addition of the ceramic particles (oxide, carbide and nitride ceramics) to the metal powders and development of the technological modes. The paper presents results of the conducted research to forecast physical and mechanical characteristics of the dispersion-hardened composite material manufactured using the direct laser growing technology. The research object is the Ti-4.25Al-2V titanium alloy with the addition of 1% SiC ceramic particles. The paper considers a multiscale approach to simulation at the micro- and macro-levels. At the micro-level, a representative element of the dispersion-hardened composite material volume is constructed taking into account the SiC particles shape to forecast the rigidity and strength characteristics, including their dependence on the temperature. At the macro-level, numerical simulation is applied to study the features of plastic deformation and fracture of the samples made of the Ti-4.25Al-2V titanium alloy with addition of the 1% SiC ceramic particles produced using the direct laser growing technology. Simulation is performed using the ANSYS and MSC.Digimat commercial software packages. The paper shows that addition of the SiC particles leads to an increase in the alloy physical and mechanical properties, including those at the temperatures of up to 450°C. Simulation results are in good agreement with the experimental data. The error in forecasting the tensile elastic modulus is 5%, and the tensile strength is 8%. The proposed approach in forecasting physical and mechanical characteristics of the dispersion-hardened composite material made of the Ti-4.25Al-2V titanium alloy with addition of the 1% SiC ceramic particles could also be of interest in studying the other metal-matrix composite materials manufactured using the direct laser growing technology.

EDN: LDBHWI, <https://elibrary/ldbhwi>

Keywords: direct laser growing, additive technologies, metal ceramics, dispersion hardening, characteristics mathematical simulation

В современных конструкциях авиационной и ракетно-космической техники широко применяются силовые шпангоуты из таких титановых сплавов, как BT4, BT6 и BT20, обладающих хорошими показателями удельной прочности и жесткости [1]. С развитием аддитивных технологий — селективного лазерного плавления, электронно-лучевого плавления, прямого лазерного выращивания (ПЛВ), а также методов оптимизации стало возможным изменять геометрические параметры традиционных силовых элементов летательных аппаратов для повышения весовой эффективности [2].

В аддитивных технологиях используют преимущественно мелкодисперсные порошки (фракцией 50...100 мкм) титановых сплавов Ti_6Al_4V , $TiAl_6Nb_7$ и др. [3]. Детали, изготовленные с помощью аддитивных технологий и топологической оптимизации, имеют выигрыш по массе, но вследствие более низких физико-механических характеристик, чем у деталей, выполненных по литьевым и гранульным технологиям, требуют дополнительных утолщений геометрических параметров элементов [4, 5].

На основе изложенного представляется актуальным обосновать повышение весового совершенства, физико-механических характеристик и снижение материалоемкости силовых элементов летательного аппарата путем применения ПЛВ и дисперсно-упрочненного титанового сплава мелкодисперсным порошком карбида кремния (SiC).

В работе [6] рассмотрены добавки 20...40 % масс. порошка SiC в матрицу $Ti64$. При изготовлении образцов методом селективного лазерного плавления появляются вертикальные трещины, проникающие в покрытие вплоть до подложки, которые формируются из-за высокого термического градиента при быстром охлаждении, а также образуются фазы TiC , Ti_5Si_3C , $TiSi_2$ и SiC.

Цель исследования — разработка алгоритма для прогнозирования физико-механических характеристик дисперсно-упрочненного композиционного материала (ДУКМ) на основе титанового сплава Ti-4.25Al-2V с добавлением 1 % керамических частиц SiC в зависимости от температуры.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определение типа и формы керамических частиц, позволяющей изготавливать образцы материала без образования трещин;
- построение представительного элемента объема с реальной формой частиц на основе микроструктурных исследований;
- настройка коммерческих программных комплексов ANSYS и MSC.Digimat для прогнозирования характеристик;
- разработка алгоритма и прогнозирование физико-механических характеристик с учетом распределения в объеме материала и формы частиц;
- определение характера деформирования и разрушения образцов ДУКМ с помощью численных исследований;
- верификация результатов математического моделирования с данными испытаний на растяжение образцов ДУКМ.

Дисперсное упрочнение материалов. В ДУКМ наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз-оксидов, нитридов, боридов, карбидов (Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC и др.). К достоинствам тугоплавких соединений относятся высокий модуль упругости, низкая плотность, пассивность к взаимодействию с материалами матриц (таких как оксиды алюминия и кремния), большая распространенность в природе и невысокая стоимость образующих элементов [7]. Достоинство ДУКМ — изотропность характеристик. К ДУКМ на алюминиевой основе, нашедшим промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры. На никелевой основе известны компо-

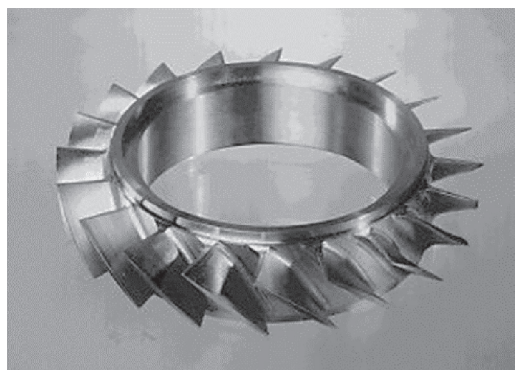
зиции, упрочненные частицами оксидов тория, иттрия, гафния и др.

ДУКМ представляет собой металломатричный композиционный материал, где в качестве матрицы использован титановый сплав, а наполнителем служат дисперсные частицы керамики [8]. Матрица определяет основные теплофизические характеристики, диапазон температуры эксплуатации и стойкость к рабочим средам. Наполнитель позволяет повысить прочностные и жесткостные характеристики.

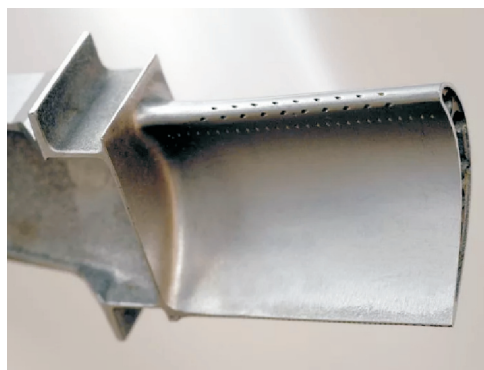
ДУКМ в основном получают ПЛВ, селективным лазерным плавлением, а также другими методами, например, непосредственным введением наполнителей в жидкий металл или сплавом перед разливкой [9]. Основными примерами конструкций, где применены подобные технологии и материалы, являются различные диски компрессоров типа bling (рис. 1, а) и рабочие лопатки турбин авиационных двигателей (рис. 1, б).

Описание методов расчета. Необходимость автоматизации проектирования обусловлена требованием сокращения времени разработки новых конструкций путем повышения производительности конструкторских работ, так как сложность проектируемых изделий удваивается в течение каждого десятилетия [10].

Для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности для выращенных образцов, полученных методом ПЛВ, использовано программное обеспечение ANSYS [11]. Для математического моделирования испытаний на растяжение образцов выбрана программная среда ANSYS Explicit Dynamics, а для прогнозирования физико-механических



а



б

Рис. 1. Внешний вид изделий из ДУКМ:

- а — диска из металлокерамического композиционного материала компрессора типа bling (Rolls-Royce);
б — рабочей лопатки турбины General Electric из титанового сплава, упрочненного частицами TiC

[illegible]

конный лазер с максимальной выходной мощностью 3 кВт, шестиосевой робот-манипулятор, двухосевой наклонно-поворотный позиционер и герметичная кабина вместимостью 9 м³, заполняемая защитным газом (аргоном) с остаточным уровнем кислорода ниже 100 ppm.

В качестве рабочего инструмента выступала лазерная сварочная головка с четырехструйным соплом для фокусировки газопорошковой струи. Для подачи порошка в ванну расплава использовали порошковый питатель (ИЛИСТ СПбГМТУ): в первую колбу порошкового питателя засыпали порошок TL5, во вторую — SiC. Технологические параметры процесса ПЛВ приведены в табл. 2.

Выращенные образцы были термически обработаны в муфельной печи SNOL 30/1200 (AB Umega-Group, Литва) в режиме для снятия внутренних напряжений: нагрев с печью до 860 °С, выдержка при температуре 860 °С в течение 30 мин, далее охлаждение с открытой дверцей печи.

Чтобы определить механические характеристики образцов, их испытывали на одноосное растяжение при температуре $T = 23, 250, 350$ и 450 °С на воздухе (по два образца для каждой температуры). Для испытаний при комнатной температуре образцы вырезали согласно ГОСТ 1497–84, для исследований при повышенной температуре — по ГОСТ 9651–84.

При температуре $T = 23$ °С использовали универсальную испытательную машину ZwickRoell Z100 (ZwickRoell, Германия), при $T = 250$,

350 и 450 °С — ZwickRoell Z050 с применением круговой трехзонной высокотемпературной печи (Mytec, Германия). Деформацию измеряли вдоль траверсы стандартным 25-миллиметровым контактным экстензометром. Нагрев до заданной температуры осуществляли со скоростью 30 °С/мин. Поверхность излома исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа и детектора вторичных электронов.

Математическое моделирование физико-механических характеристик ДУКМ в программном комплексе MSC.Digimat. Программный комплекс MSC.Digimat обеспечивает возможность моделирования широкого спектра многофазных материалов и позволяет использовать комплексный подход к проектированию композитных конструкций — от разработки материалов и виртуальных испытаний образцов до моделирования технологии изготовления и получения конечных характеристик конструкции [13].

С учетом микроструктурных исследований образцов ДУКМ, изготовленных методом ПЛВ, определены диапазон размера частиц и их форма, а также объемная доля и характер распределения в объеме материала. По полученным результатам построен представительный элемент объема ДУКМ с габаритными размерами 1×1×1 мм, соответствующий действительной микроструктуре.

Далее выполнены расчеты прочностных и жесткостных характеристик путем приложения единичных нагрузок и определения полей эффективных деформаций и напряжений. При математическом моделировании не учитывали следующие особенности ДУКМ:

- наличие частиц карбида кремния эквивалентным размером менее 15 мкм и более 20 мкм;
- наличие возможных микротрещин на границах раздела фаз и в матричном материале;
- изменение физико-механических и теплофизических характеристик частиц и матричного материала в зависимости от температуры.

Результаты моделирования приведены на рис. 3 и в табл. 3.

Численное моделирование испытаний на растяжение образцов ДУКМ. Математическое моделирование выращенных образцов на разрыв проведено в модуле Explicit Dynamics ме-

Таблица 2

Технологические параметры процесса ПЛВ

Параметр	Значение
Содержание керамических частиц SiC, % об.	1
Мощность лазерного излучения, Вт	1800
Скорость перемещения, мм/с	25
Диаметр лазерного луча, мм	2,5
Смещение, мм:	
по ширине	1,67
по высоте	0,60
Расход, г/мин:	
порошка TL5	7,6
порошка SiC	0,1
несущего газа	5,0
защитного газа	15,0

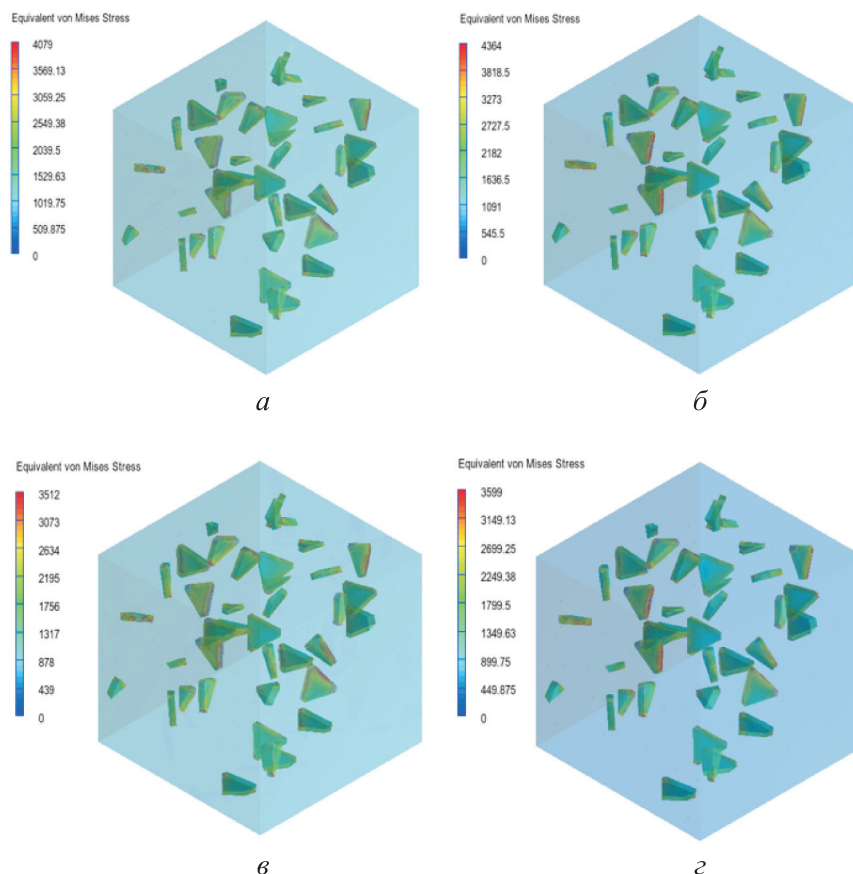


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений, МПа, в частицах карбида кремния представительного объема ДУКМ при температуре $T = 20$ (а), 250 (б), 350 (в) и 450 °C (г)

Таблица 3

Расчетные значения физико-механических характеристик ДУКМ

Температура, °C	Модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Перемещение, мм	Коэффициент Пуассона
20	124 259	1029	2,2	0,29
250	104 199	868	2,6	0,32
350	101 633	806	2,9	0,36
450	96 705	698	3,1	0,37

тодом конечных элементов с помощью программы ANSYS Autodyn.

Для моделирования статических испытаний выбран образец с габаритными размерами 20 мм по длине и диаметром 4 мм согласно ASTM E21-20. Размер конечного элемента составлял 0,5 мм.

В качестве граничных условий выступала жесткая заделка образца по поверхности в зоне захвата с одной стороны и перемещение с другой на 10 мм с шагом 0,1 мм/с.

Результаты верификации: распределение эквивалентного напряжения, МПа, в образце при 20 °C, полученное путем моделирования в моду-

ле Explicit Dynamics, и внешний вид образца после статических испытаний приведены на рис. 4.

Механические испытания натуральных образцов. Для валидации результатов математического моделирования методом ПЛВ изготовлены образцы ДУКМ, и проведены их механические испытания на растяжение при температуре $T = 23, 250, 350$ и 450 °C. Диаграммы напряженно-деформированного состояния ДУКМ при температуре $T = 23, 250, 350$ и 450 °C, построенные по результатам численного моделирования и натуральных испытаний, приведены на рис. 5.

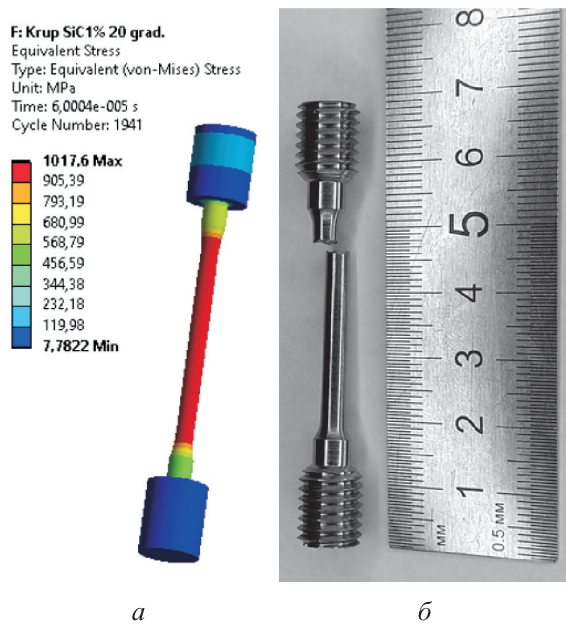


Рис. 4. Результаты верификации:
а — распределение эквивалентного напряжения, МПа, в образце при 20 °С; *б* — внешний вид образца после статических испытаний

Видно, что численное моделирование ДУКМ в пакетах программ MSC.Digimat и ANSYS имеет погрешность 5...10 %, что свидетельствует о достаточной корректности алгоритма для прогнозирования физико-механических характеристик, особенностей деформирования и разрушения материала. Различия в диаграммах связаны с тем, что в моделях не учтены внутренние поры и дефекты материалов, влияющие на диаграмму растяжения и приводящие к растрескиванию. Кроме того, испытания при повышенных температурах проведены без экстензометра, что дало погрешность измерения деформаций.

Микрофотографии поверхностей изломов образцов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, при различных значениях температуры испытания приведены на рис. 6.

С ростом температуры испытания наблюдается различный характер формирования изломов в процессе разрушения. При комнатной

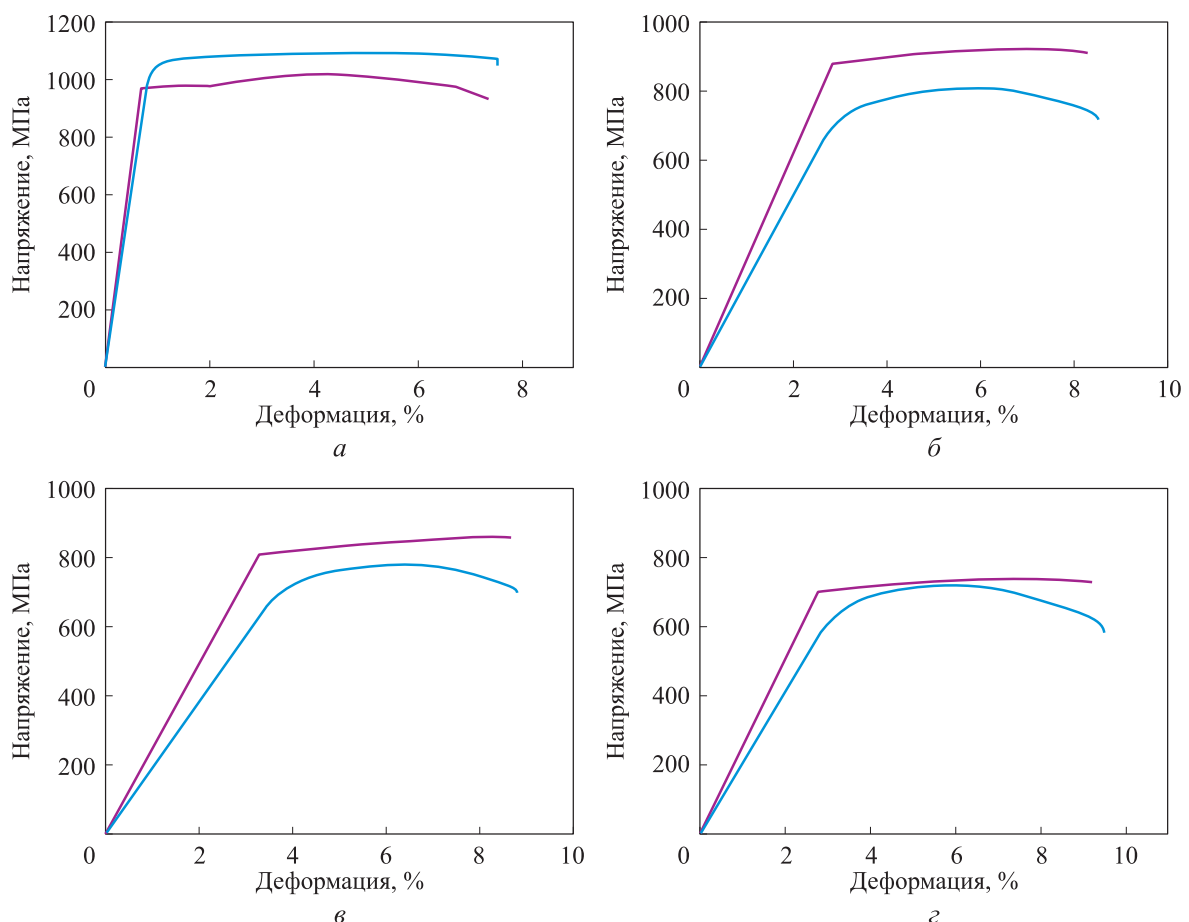


Рис. 5. Диаграммы напряженно-деформированного состояния образцов ДУКМ при температуре $T = 23$ (*а*), 250 (*б*), 350 (*в*) и 450 °С (*г*), построенные по результатам численного моделирования (—) и натурных испытаний (—)

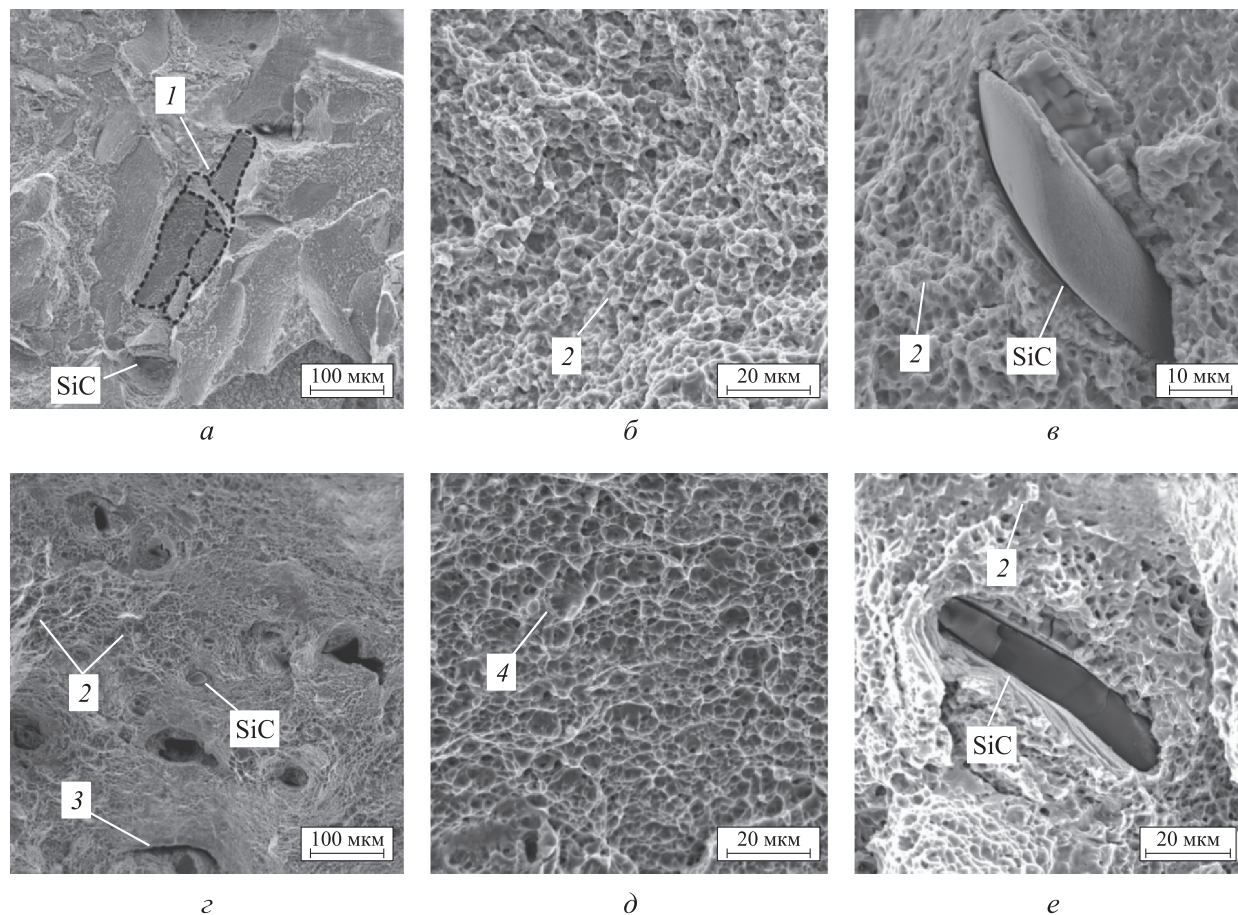


Рис. 6. Микрофотографии поверхности излома образцов ДУКМ при температуре испытания $T = 23$ (а, б), 250 (в), 350 (г) и 450 °С (д, е):

1 — границы зерен; 2 — ямки; 3 — вторичная трещина; 4 — вытянутые ямки

температуре излом образца волокнистый с характерным субзернистым разрушением. При повышении температуры испытания формируется смешанная картина разрушения: помимо волокнистой наружной зоны присутствует внутренняя округлая зона с радиальными рубцами, что обусловлено пластическим поведением материала при разрушении (рис. 6, а и г) [14].

Поверхность всех изломов состоит из множества неглубоких ямок, что является характерным элементом вязкого разрушения титановых сплавов. Детальный анализ разрушения показал, что на некоторых участках присутствуют крупные и гладкие ямки, свидетельствующие о процессе волочения металла. При температуре испытания $T = 23$ °С излом характеризуется довольно мелкими и неглубокими ямками, что свидетельствует о низкой пластической деформации по сравнению с образцами, испытанными при повышенных температурах (рис. 6, б и д).

На поверхности всех изломов керамические частицы SiC распределены хаотично. По внешнему виду этих частиц можно определить, что трещина пересекла их полностью в процессе растяжения образца. Связь между керамическими частицами SiC и матрицей оказалась прочной. Изображения поверхности разрушения с большим увеличением показали углубления, окружающие частицы SiC, что указывает на механизм вязкого разрушения матрицы (рис. 6, в и е).

Различное поведение материала при растяжении соответствует разнице в значениях прочности и пластичности. В процессе ПЛВ керамические частицы SiC взаимодействуют с титановой матрицей с образованием новых фаз, что значительно увеличивает предел прочности. С повышением температуры испытания образцы ДУКМ становятся более пластичными благодаря пластичной титановой матрице, но за счет добавления керамических частиц имеется незначительная потеря прочности [15].

Выводы

1. Рассмотрена возможность математического моделирования характеристик ДУКМ с помощью программных комплексов ANSYS и MSC.Digimat. Спрогнозированы физико-механические характеристики ДУКМ на основе титанового сплава Ti-4.25Al-2V с 1%-ной добавкой керамических частиц SiC, изготовленных методом ПЛВ. Погрешность не превысила 10 %, что в дальнейшем позволяет с помощью аналогичных программ определять характеристики одних и тех же композиционных материалов на основе различных металлических сплавов и керамических включений.

2. Показано, что добавление керамического порошка в титановый сплав приводит к повы-

шению физико-механических характеристик материала. С ростом температуры испытания образцы, выполненные методом ПЛВ, становятся более пластичными вследствие пластичности титановой матрицы, но добавление керамических частиц позволяет добиться меньшей потери прочностных характеристик, чем для образцов из титанового сплава без керамических частиц.

3. Предложенный алгоритм прогнозирования физико-механических характеристик ДУКМ на основе титанового сплава Ti-4.25Al-2V с 1%-ной добавкой керамических частиц SiC можно использовать как промежуточный этап при проектировании новых деталей и конструкций с высокой весовой эффективностью.

Литература

- [1] Carroll B., Palmer T., Beese A. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing, *Acta Mater.*, 2015, vol. 87, pp. 309–320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>
- [2] Pinkerton A. Lasers in additive manufacturing. *Opt. Laser Technol.*, 2016, vol. 78-A, pp. 25–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.025>
- [3] Kumar M., Chohan J.S. The role of additive manufacturing for biomedical applications: a critical review. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 828–850, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.022>
- [4] Wrobel R., Scholes B., Hussein A. et al. A metal additively manufactured (MAM) heat exchanger for electric motor thermal control on a high-altitude solar aircraft—experimental characterization. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2020, vol. 19, art. 100629, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100629>
- [5] Promakhov V.V., Zhukov A.S., Vorozhtsov A.B. et al. Structure and mechanical properties of 3D-printed ceramic specimens. *Russ. Phys. J.*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 876–881, doi: <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01790-0>
- [6] Krakhmalev P., Yadroitsev I. Microstructure and properties of intermetallic composite coatings fabricated by selective laser melting of Ti-SiC powder mixtures. *Intermetallics*, 2014, vol. 46, pp. 147–155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.11.012>
- [7] Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, *Металлургия*, 1986. 310 с.
- [8] Hosford W.F. *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press, 2005. 425 p.
- [9] Bistрова Y.A., Shirokina E.A., Mendagaliev R. et al. Research of mechanical properties of cold resistant steel 09CrNi2MoCu after direct laser deposition. *Key Eng. Mater.*, 2019, vol. 822, pp. 418–424, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.418>
- [10] Stasa F.L. *Applied finite element analysis for engineers*. Holt, Rinehart & Winston, 1985. 657 p.
- [11] Moaveni S. *Finite element analysis*. Pearson, 2014. 936 p.
- [12] ASTM E21-20. *Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials*. Vol. 03.01, doi: <https://doi.org/10.1520/E0021-20>
- [13] Hirsch P., Marianne J., Leipold D. et al. Numerical simulation and experimental validation of hybrid injection molded short and continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 21, art. 3846, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13213846>
- [14] Ivanov S., Gushchina M., Artinov A. et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited Ti-6Al-4V. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, art. 6432, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14216432>

- [15] Shalnova S.A., Volosevich D.V., Sannikov M.I. et al. Direct energy deposition of SiC reinforced Ti–6Al–4V metal matrix composites: structure and mechanical properties. *Ceram. Int.*, 2022, vol. 48, no. 23-A, pp. 35076–35084, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.097>

References

- [1] Carroll B., Palmer T., Beese A. Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing, *Acta Mater.*, 2015, vol. 87, pp. 309–320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>
- [2] Pinkerton A. Lasers in additive manufacturing. *Opt. Laser Technol.*, 2016, vol. 78-A, pp. 25–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.025>
- [3] Kumar M., Chohan J.S. The role of additive manufacturing for biomedical applications: a critical review. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 828–850, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.022>
- [4] Wrobel R., Scholes B., Hussein A. et al. A metal additively manufactured (MAM) heat exchanger for electric motor thermal control on a high-altitude solar aircraft—experimental characterization. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2020, vol. 19, art. 100629, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100629>
- [5] Promakhov V.V., Zhukov A.S., Vorozhtsov A.B. et al. Structure and mechanical properties of 3D-printed ceramic specimens. *Russ. Phys. J.*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 876–881, doi: <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01790-0>
- [6] Krakhmalev P., Yadroitsev I. Microstructure and properties of intermetallic composite coatings fabricated by selective laser melting of Ti–SiC powder mixtures. *Intermetallics*, 2014, vol. 46, pp. 147–155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.11.012>
- [7] Goldshteyn M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh spлавov* [Metallophysics of high-strength alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 310 p. (In Russ.).
- [8] Hosford W.F. *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press, 2005. 425 p.
- [9] Bistrova Y.A., Shirokina E.A., Mendagaliev R. et al. Research of mechanical properties of cold resistant steel 09CrNi2MoCu after direct laser deposition. *Key Eng. Mater.*, 2019, vol. 822, pp. 418–424, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.418>
- [10] Stasa F.L. *Applied finite element analysis for engineers*. Holt, Rinehart & Winston, 1985. 657 p.
- [11] Moaveni S. *Finite element analysis*. Pearson, 2014. 936 p.
- [12] ASTM E21-20. *Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials*. Vol. 03.01, doi: <https://doi.org/10.1520/E0021-20>
- [13] Hirsch P., Marianne J., Leipold D. et al. Numerical simulation and experimental validation of hybrid injection molded short and continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 21, art. 3846, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13213846>
- [14] Ivanov S., Gushchina M., Artinov A. et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited Ti–6Al–4V. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, art. 6432, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14216432>
- [15] Shalnova S.A., Volosevich D.V., Sannikov M.I. et al. Direct energy deposition of SiC reinforced Ti–6Al–4V metal matrix composites: structure and mechanical properties. *Ceram. Int.*, 2022, vol. 48, no. 23-A, pp. 35076–35084, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.097>

Статья поступила в редакцию 07.02.2025

Информация об авторах

МАГИДОВ Илья Сергеевич — начальник технологического бюро производственно-технологического комплекса аддитивных технологий. АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка» (141983, Дубна, Российская Федерация, Жуковского ул., д. 2а, e-mail: j-bright@mail.ru).

МИХАЙЛОВСКИЙ Константин Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: konst_mi@mail.ru).

ШАЛЬНОВА Светлана Александровна — аспирант, инженер отдела исследований материалов. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Санкт-Петербург, Российская федерация, Лоцманская ул., д. 3, e-mail: s.shalnova@corp.smtu.ru).

КЛИМОВА-КОРСМИК Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук, начальник отдела исследований материалов. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Санкт-Петербург, Российская федерация, Лоцманская ул., д. 3, e-mail: o.klimova@ltc.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Магидов И.С., Михайловский К.В., Шальнова С.А., Климова-Корсмик О.Г. Исследование физико-механических характеристик дисперсно-упрочненной металлокерамики Ti-4.25Al-2V с добавлением SiC, изготовленной методом прямого лазерного выращивания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 120–130.

Please cite this article in English as:

Magidov I.S., Mikhailovsky K.V., Shalnova S.A., Klimova-Korsmik O.G. Study of the physico-thermomechanical properties of the Ti-4.25Al-2V dispersion-hardened metal ceramics with SiC addition manufactured by the direct laser growing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 120–130.

Information about the authors

MAGIDOV Ilya Sergeevich — Head of the Technological Bureau of the Additive Technologies Production and Technological Complex. Raduga State Machine-Building Design Bureau named after A.Ya. Bereznayak (141983, Dubna, Russian Federation, Zhukovskogo St., Bldg. 2a, e-mail: j-bright@mail.ru).

MIKHAILOVSKY Konstantin Valeryevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket and Space Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: konst_mi@mail.ru).

SHALNOVA Svetlana Alexandrovna — Postgraduate, Engineer of the Materials Research Department. St. Petersburg State Marine Technical University (190121, St. Petersburg, Russian Federation, Lotsmanskaya St., Bldg. 3, e-mail: s.shalnova@corp.smtu.ru).

KLIMOVA-KORSMIK Olga Gennadievna — Candidate of Science (Eng.), Head of the Materials Research Department. St. Petersburg State Marine Technical University (190121, St. Petersburg, Russian Federation, Lotsmanskaya St., Bldg. 3, e-mail: o.klimova@ltc.ru).