



УДК 624.014.7

**И. А. ГУЛИН**, аспирант, ст. преп. кафедры технологии строительства;  
**В. В. МЫЛЬНИКОВ**, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры технологии строительства;  
**О. Б. КОНДРАШКИН**, зав. кафедрой технологии строительства;  
**Д. И. МИНДРИН**, аспирант, асс. кафедры технологии строительства;  
**Н. А. РЯБОВ**, студент

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСНО- УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-17-74; эл. почта: tsp-nngasu@mail.ru

*Ключевые слова:* алюминиевые дисперсно-упрочненные материалы, сопротивление усталости, композит, деформационный рельеф, долговечность, циклическая прочность.

---

*Изучены структурно-деформационные особенности поведения экспериментального дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия, полученного методом внутреннего окисления, при циклическом деформировании с использованием оптической прямой, цифровой и растровой электронной микроскопии. Отмечен небольшой разброс экспериментальных данных показателей сопротивления усталости образцов. Представлены усталостные характеристики и выявлен механизм зарождения и распространения усталостных трещин, фрактография поверхности усталостного разрушения. Установлено, что полученный экспериментальный материал имеет перспективы для применения в изготовлении современных облегченных изделий в строительстве.*

---

### **Введение**

Конструкции из алюминиевых сплавов обладают общими для металлических конструкций достоинствами: индустриальностью изготовления, транспортабельностью, сборностью, возможностью осуществления монтажа крупными блоками, разборностью, долговечностью и надежностью в эксплуатации. Алюминиевые конструкции наиболее легки, даже по сравнению со стальными, поскольку отношение расчетного сопротивления к плотности при одинаковой прочности сопоставляемых материалов у алюминия примерно в 3 раза выше, чем у стали [1].

Благодаря значительной антикоррозионной стойкости алюминия, которая к тому же может быть повышена оксидированием, эмалированием и другими способами, снижаются эксплуатационные расходы и возрастает долговечность конструкций, что особенно важно при наличии агрессивной среды. Отличительной особенностью алюминиевых конструкций по сравнению со стальными является также возможность обеспечения особых эксплуатационных требований благодаря таким свойствам материала, как высокая отражательная способность полированной поверхности, антимагнитность, нетоксичность, а также неспособность к образованию искр при ударах.



Немаловажное значение для строительных конструкций имеет их внешний вид, который при применении алюминия может быть улучшен благодаря фактуре самого материала, а также возможности использования архитектурных деталей, разнообразных форм и рисунка, изготавливаемых в заводских условиях. Из большого числа сплавов различных композиций, производимых отечественной промышленностью, к использованию в строительстве нормы рекомендуют шесть марок деформируемого алюминия и один литейный. В числе деформируемых сплавов три марки термически неупрочняемого алюминия (АД1М, АМц, АМгМ) и три марки термически упрочняемого (АД31, 1915, 1935). Литейный сплав (АМ8) относится к числу термически неупрочняемых. Некоторые из сплавов применяются в различных состояниях поставки. Например, сплав марки АД31 – в четырех различных состояниях (Т, Т1, Т4, Т5). Ограниченное число марок сплавов продиктовано производственными соображениями [2].

В нормах приведены рекомендации по использованию марок алюминия и полуфабрикатов из них в зависимости от назначения конструкций, которые разбиты на четыре группы применения: группа I – ограждающие и другие конструкции типа оконных и дверных заполнений, подвесных потолков, перегородок, витражей и т.п.; группа II – конструкции, выполняющие одновременно несущие и ограждающие функции: блоки покрытий, кровельные и стеновые панели и т.п.; группа III – несущие сварные конструкции: фермы, колонны, прогоны, пространственные решетчатые покрытия, сборно-разборные конструкции каркасов зданий, покрытия больших пролетов и др.; группа IV – клепаные конструкции, а также элементы конструкций, не имеющие сварных соединений. Основное расчетное сопротивление алюминия  $R$ , принятое единым при расчетах на растяжение, сжатие и изгиб, установлено делением нормативного сопротивления  $R_n$  на коэффициент надежности по материалу  $\gamma_T$ . При этом за нормативное сопротивление принимают либо условный предел текучести, либо временное сопротивление разрыву, значения которых установлены ГОСТ 57352-2016. Диаграмма  $q - e$  алюминия не имеет выраженной площадки текучести, поэтому за предел текучести принято напряжение, соответствующее остаточному удлинению, равному 0,2%. Численные значения коэффициентов надежности по материалу при нахождении расчетного сопротивления по пределу текучести приняты  $\gamma_T = 1,1$ , при вычислении расчетного сопротивления по временному сопротивлению разрыву  $\gamma_T = 1,45$ . За расчетное сопротивление принимается меньшее из двух значений, определенных по  $\sigma_0$  и  $\sigma_b$ . Для конструкций, эксплуатируемых при расчетной температуре наружного воздуха 51 – 100<sup>0</sup> С, расчетные сопротивления понижаются умножением основного расчетного сопротивления на коэффициент  $\gamma_t$ . Значение этого коэффициента для алюминия марок АМг2, АД31, 1915, 1935 и АЛ8 вне зависимости от состояния поставки  $\gamma_t = 0,9$  и для алюминия марок АД1 и АМц –  $\gamma_t = 0,85$ . Расчетные сопротивления алюминия на срез  $R_s$ , смятие торцевой поверхности  $R_v$  и смятие местное при полном касании  $R_{iv}$  установлены умножением основного расчетного сопротивления  $R$  на соответствующие коэффициенты перехода:  $\gamma_s = 0,6$ ;  $\gamma_p = 1$  и  $\gamma_{ip} = 0,75$ . На прочность конструкции рассчитывают по упругой стадии работы материала. Исключение составляют некоторые виды листовых конструкций, эксплуатация которых допускается в стадии развития пластических деформаций. В этих случаях расчетное сопротивление алюминия марки АМг2М на растяжение принимается увеличенным против основного на 20 %, а для марок АД1М и



АМЦМ – на 40 %. Значения коэффициентов условий работы  $\gamma_c$  для элементов алюминиевых конструкций приняты немного сниженными по сравнению с коэффициентами для стальных конструкций. Например, для сжатых элементов решетки плоских ферм  $\gamma_c = 0,75$  при  $\lambda > 50$  и  $\gamma_c = 0,9$  при  $\lambda \geq 50$ , вместо  $\gamma_c = 0,8$  при  $\lambda \geq 60$  для стальных элементов; в пространственных конструкциях для раскосов из одиночных уголков при креплении их к поясам одной заклепкой или болтом  $\gamma_c = 0,6$  вместо  $\gamma_c = 0,75$ . В связи с пониженным значением модуля упругости предельные значения гибкостей для сжатых и для растянутых элементов алюминиевых конструкций установлены на 20–30 % ниже, чем для стальных. По тем же соображениям предельное расстояние между соединениями (прокладками, шайбами и т.п.) составных сжатых элементов, рассчитываемых как сплошностенчатые, уменьшено до 30% (против 40%).

Алюмоматричные композиты являются искусственно созданными человеком материалами, которые обладают комплексом уникальных физико-механических свойств, неприсущих природным материалам. Существует несколько способов получения такого рода материалов: спрей-технология (*spray deposition and consolidation*); метод замешивания (*stir casting*) с последующим суспензионным литьем и ее разновидность *stir casting* – совмещение частиц армирующей фазы с матрицей, находящейся в твердо-жидком состоянии (*compo-casting*); методы пропитки (*infiltration process*), при этом пропитка может быть гравитационной или принудительной [1-6]. В представленной работе получали материал по методу внутреннего окисления, который принципиально отличается от перечисленных выше и показан нами в работе [7]. Большинство исследований механических свойств алюмоматричных материалов, опубликованных в современной литературе, описывают поведение материала под действием статических и ударных нагрузок, а также триботехнические свойства [8-9]. Однако использование изделий из алюминиевых композитов в строительной индустрии показывает актуальную необходимость проведения циклических испытаний.

Цель работы – исследовать сопротивление усталости и особенности деформирования и разрушения дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия при циклических испытаниях.

#### **Материал и методика испытаний**

Дисперсно-упрочненный алюмоматричный композиционный материал (ДУАКМ) состава Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15%) полученный методом жидкофазного окисления алюминия путем продувки расплава кислородом относится к группе дисперсно-упрочненных композитов. В качестве исходного сырья для его получения был взят алюминий марки А6. Химический состав марки А6 по ГОСТ 11069–2001: (Al) 99,6 %; (Fe) 0.25%; (Si) 0.2%; (Ti) 0.03%; (Cu) 0.01%; (Zn) 0.06%. Был разработан и сконструирован оригинальный стенд для реализации разрабатываемого метода внутреннего окисления, состоящий из высокотемпературной индукционной печи (рис. 1. поз. I), системы хранения и подачи кислорода. Экспериментальный стенд также включал в себя высокоточный газовый щит, на выходе из которого был смонтирован игольчатый вентиль для точной регулировки подачи газа, соединенный с манометром для контроля давления, после иголки переходящий в обычный шаровый вентиль и ротаметр. Алюминиевые чушки загружали в печь (рис. 1. поз. I, тигель 4) и расплавляли. Далее в расплав алюминия вводили карбидокремниевую трубку (рис. 1. поз. I, трубка 3), имеющая систему регулировки по вертикали (1) и по углу

(2), которая герметично соединялась со стальной трубкой, которая в свою очередь крепилась к ротаметру. По этой системе подавали кислород в расплав алюминия. Для нежелательного окисления алюминия формировали среду защитного инертного газа путем подачи по трубке (5), показанной на рис. 1.

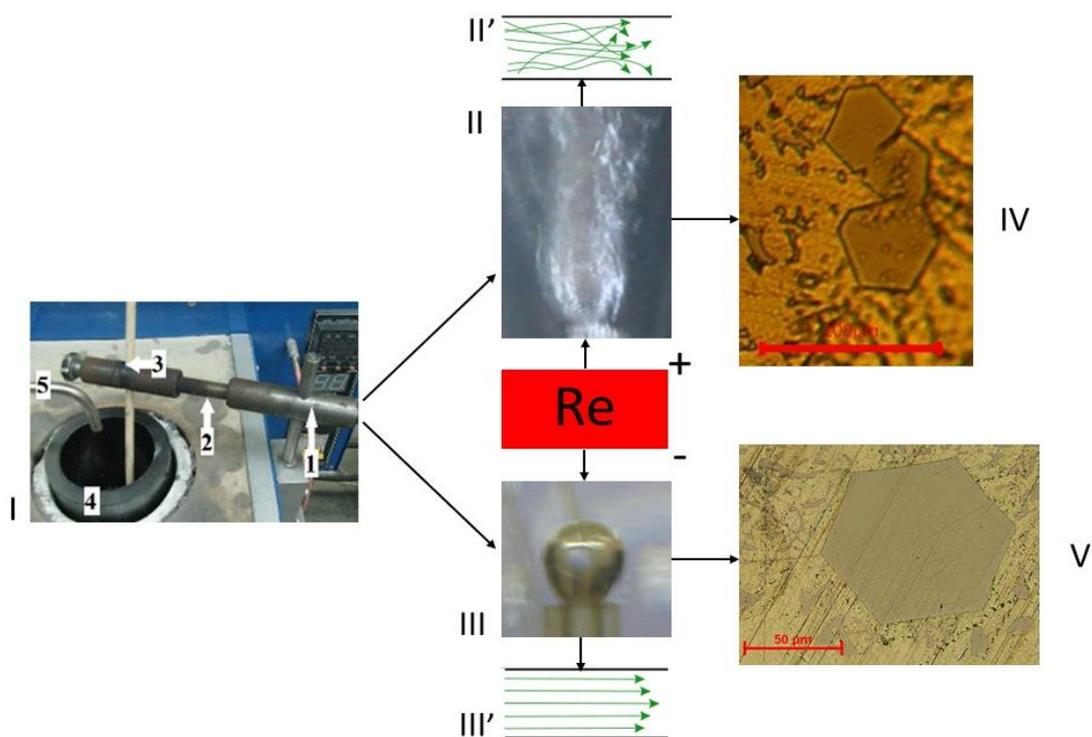
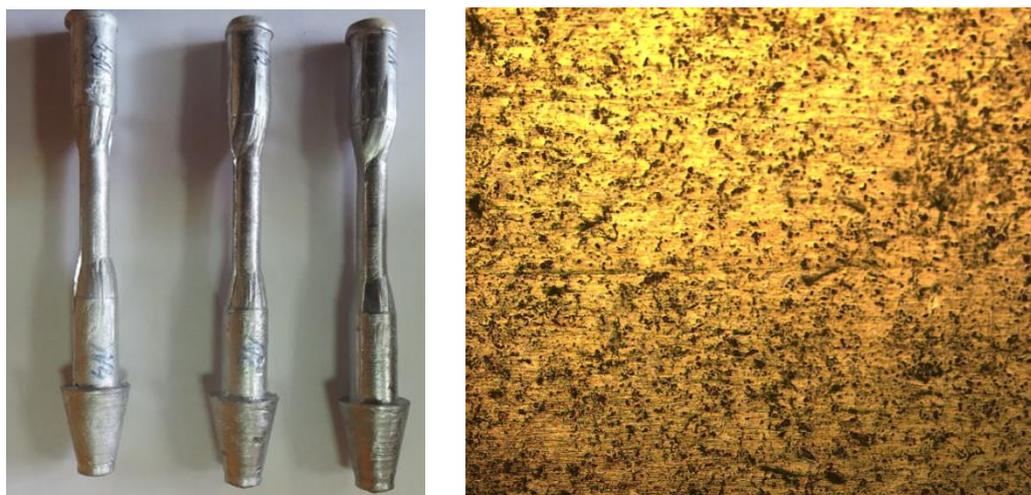


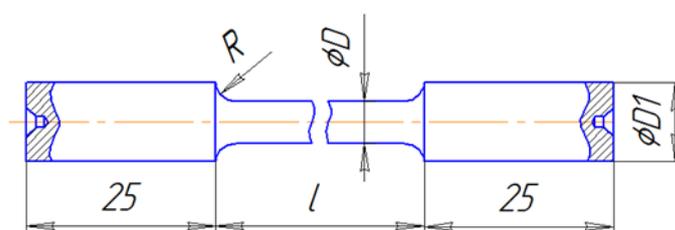
Рис. 1. Схема получения упрочняющей фазы: I – рабочая часть печи с демонтированной теплоизоляцией; II – струя подаваемого газа-окислителя с характерным турбулентным режимом движения II; III – единичный пузырек газа-окислителя с характерным ламинарным режимом движения III; IV – микроструктура, получаемая при реализации процесса II; V – микроструктура, получаемая при реализации процесса III

В результате высокотемпературной химической реакции  $4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3$  синтезировали керамическую фазу непосредственно в самом расплаве в одну стадию осуществляемого процесса. Для устранения литейных дефектов и дегазации проводили продувку аргоном получаемого материала непосредственно перед разливкой в стальные кокиля небольшого размера (рис. 2,а). Микроструктура полученного сплава показана на рис. 2,б. Далее отливки подвергались механической обработке на токарном станке и по размерам, показанным на эскизе (рис. 2,в) изготавливались образцы для испытаний на усталость, которые механически полировались.



а

б



в

Рис. 2. Изображения: а – литые цилиндрические образцы, полученные методом литья в стальную форму; б – микроструктура этого сплава (x 100); в – эскиз цилиндрического образца для усталостных испытаний:  $\varnothing D = 7,5$  мм;  $\varnothing D1 = 12$  мм;  $R = 10$  мм;  $l = 90$  мм

Испытания образцов на усталость по схеме консольного изгиба вращающегося цилиндрического образца (рис. 3,а) проводили на установке (рис. 3,б) при комнатной температуре 20°C.

Комплексную оценку сопротивления усталости материала производили, используя систему параметров, предложенных в работе [10]. На рис. 3,в схематически изображена кривая усталости, которая в логарифмических координатах принимает вид прямой, точки на рисунке показывают значения напряжений в МПа и долговечностей в количествах циклов нагрузки, при которых произошло разрушение образцов. Пунктиром обозначена область разброса экспериментальных данных. Степень сходимости полученных экспериментальных данных с построенной кривой усталости определяли с помощью коэффициента корреляции (формула 10).

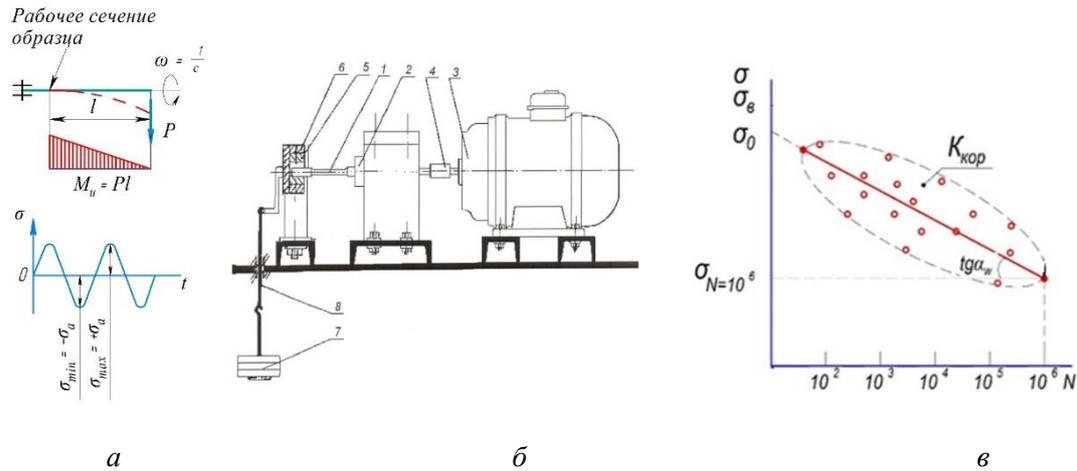


Рис. 3. Схематическое изображение: *a* – вид нагружения образцов при усталостных испытаниях; *б* – установка для испытаний на усталость по схеме консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца: 1 – образец; 2 – цанговый захват; 3 – электродвигатель; 4 – резиновая муфта; 5 – подшипник; 6 – опора нагружающего устройства; 7 – грузы; 8 – тросик; *в* – система показателей оценки поведения материалов при испытаниях на усталость

В качестве критерия сопротивления усталости использовали  $\text{tg } \alpha_w$  – угол наклона кривой усталости [11], кроме этого его использовали в виде коэффициента регрессии, входящего в формулу для вычисления коэффициента корреляции.

$$\text{tg} \alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – циклическое напряжение;  $N$  – количество циклов.

Левая ветвь может быть представлена следующим образом:

$$\lg \sigma = (\lg \sigma)_0 + \kappa_\beta \cdot \lg N, \quad (2)$$

где  $\kappa_\beta$  – коэффициент регрессии (тангенс угла наклона прямой  $\text{tg} \alpha_w$ ).

Кривая усталости  $\lg \sigma - \lg N$  должна иметь вид:

$$\lg \sigma = (\lg \sigma)_0 + \text{tg} \alpha_w \cdot \lg N, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – напряжение при достижении соответствующего  $N$ ;  $\sigma_0$  – напряжение при  $N = 1$ , отсекаемое линией кривой усталости;  $N$  – количество циклов нагружения до разрушения (долговечность).

Для обработки полученных результатов использовали методы математической статистики [12-15].

Наклон кривой усталости или коэффициент регрессии, вычисляется по формуле:

$$\text{tg} \alpha_w = \kappa_\beta = \frac{n \sum \lg \sigma \cdot \lg N - \sum \lg N \cdot \sum \lg \sigma}{n \sum (\lg N)^2 - (\sum \lg N)^2}, \quad (4)$$



Величина  $(\lg\sigma)_0$  вычисляется по формулам:

$$(\lg\sigma)_0 = \overline{\lg\sigma} - \kappa_\beta \overline{\lg N}, \quad (5)$$

где  $\overline{\lg\sigma}$  – среднее значение по логарифму напряжения,  $\overline{\lg N}$  – среднее значение по логарифму количества циклов, которые считали следующим образом:

$$\overline{\lg\sigma} = \frac{\sum \lg\sigma}{n}; \quad \overline{\lg N} = \frac{\sum \lg N}{n}, \quad (6)$$

Подставляя (6) в выражение (5) получим:

$$(\lg\sigma)_0 = \frac{\sum \lg\sigma - \kappa_\beta \sum \lg N}{n}, \quad (7)$$

Дисперсии по  $\lg N$  и  $\lg\sigma$  определяли по выражениям:

$$S_{\lg N} = \frac{1}{n-1} \left[ \sum \lg N^2 - \frac{(\sum \lg N)^2}{n} \right], \quad (8)$$

где  $S_{\lg N}$  – дисперсия по количеству циклов,  $n$  – число экспериментальных данных,  $N$  – количество циклов.

$$S_{\lg\sigma} = \frac{1}{n-1} \left[ \sum \lg\sigma^2 - \frac{(\sum \lg\sigma)^2}{n} \right], \quad (9)$$

где  $S_{\lg\sigma}$  – дисперсия по напряжению,  $n$  – число экспериментальных данных,  $\sigma$  – напряжение (МПа).

Для определения коэффициента корреляции использовали уравнение:

$$K_{\text{кор}} = \frac{\kappa_\beta S_{\lg N}}{S_{\lg\sigma}}, \quad (10)$$

$\kappa_\beta$  – коэффициент регрессии, который показывает наклон кривой усталости  $\kappa_\beta = \text{tg}\alpha_w$ .

$K_{\text{кор}}$  – коэффициент корреляции, указывает степень сходимости построенной кривой усталости с результатами эксперимента, определяемый по формуле:

$$K_{\text{кор}} = \kappa_\beta \sqrt{\frac{n \sum (\lg N)^2 - (\sum \lg N)^2}{n \sum (\lg\sigma)^2 - (\sum \lg\sigma)^2}}, \quad (11)$$

Для исследования микроструктуры и характерных областей усталостного излома использовали оптический прямой микроскоп *CRAFTEST CL-720e*, цифровой материаловедческий микроскоп *Keyence VHX-1000* и растровый электронный микроскоп с термоэмиссией *Hitachi S-3400N* с рентгеноспектральным энергодисперсионным анализатором и растровый



электронный микроскоп *JEOL JSM-IT300LV* с энерго- и волнодисперсионным элементным анализаторами.

### Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных испытаний цилиндрических образцов построена кривая усталости, которая в логарифмических координатах имеет вид прямой линейной аппроксимации (рис. 4). Полученные экспериментальные значения, достаточно плотно располагаются к линии аппроксимации, наблюдается незначительный разброс данных во всем испытанном диапазоне долговечности, что можно охарактеризовать как достаточно высокую стабильность поведения исследуемого материала под действием знакопеременных нагрузок при осуществляемом виде нагружения, что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции  $K_{кор} = -0,975$  и свидетельствует о высокой стабильности структурно-чувствительных свойств данного дисперсно-упрочненного композиционного материала. Сравнительно пологий наклон кривой усталости и соответствующее ему небольшое значение  $tg \alpha_w = 0,1545$  характеризует высокое сопротивление усталости материала: долговечность увеличивается при незначительном снижении напряжения. Экстраполяция полученных результатов на сравнительной базе  $N = 106$  циклов показывает предел ограниченной выносливости 140 МПа. Принятый в работе [11] коэффициент ограниченной выносливости  $\chi$ , который позволяет производить сравнительную оценку относительно максимальных прочностных характеристик (предела прочности  $\sigma_B$ ) для испытанного материала  $\chi = 0,35$ , что находится в средних значениях даже в сравнении с машиностроительными сплавами. Чем он ближе к единице, тем выше усталостные характеристики исследуемого материала – повреждаемость меньше и выше работоспособность этого материала при приближении к предельным нагрузкам ( $\sigma_B$ ).

Продвижение магистральной усталостной трещины имеет как линейный, так и ярко выраженный волновой характер (рис. 5,а). При этом участок с трещиной волнового характера сопровождается значительной зоной локальной пластической деформации, которая существенно больше аналогичной зоны на участке линейного характера распространения трещины (рис. 5,б). Такое различие связано с неравномерностью распределения упрочняющих частиц в объеме материала. Кроме этого, данная неравномерность приводит к гофрированию поверхности материала при циклической деформации в сопряженной с трещиной области (рис. 5,в, г).

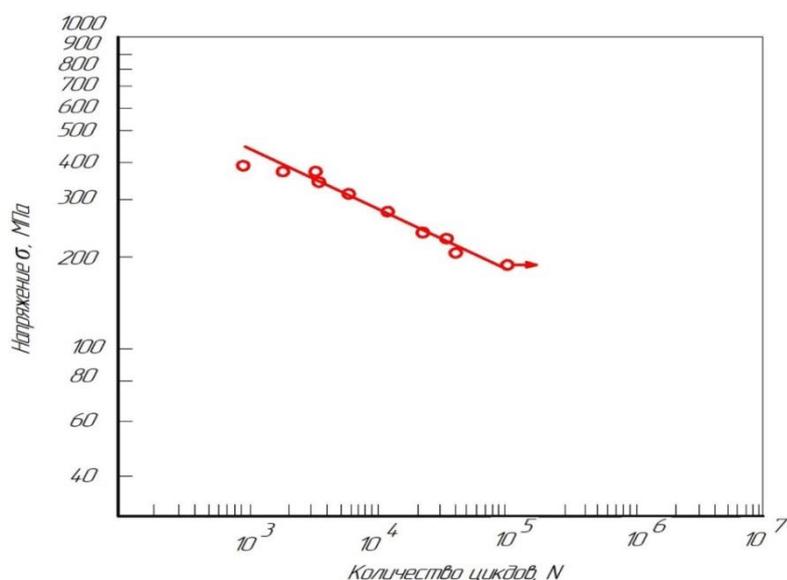
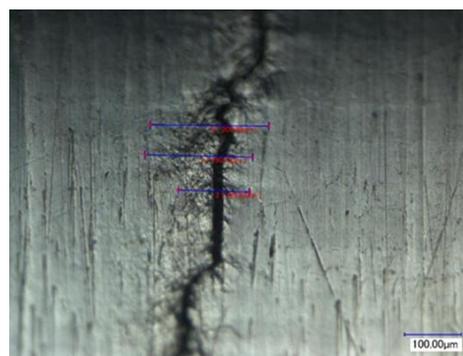


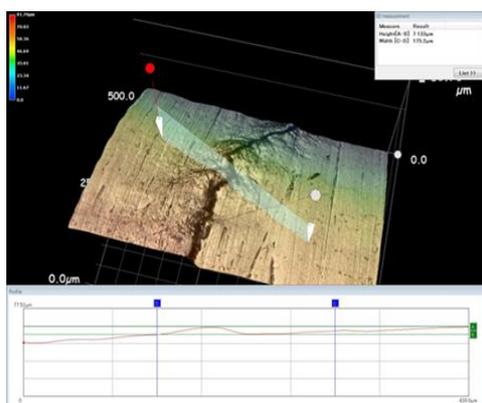
Рис. 4. Кривая усталости образцов ДУАКМ Ø7,5 мм частота приложения нагрузки:  $\omega = 46,7$  Гц; уравнения кривых усталости:  $\lg \sigma = 3,0696 - 0,1545 \lg N$ ;  $K_{кор} = -0,975$



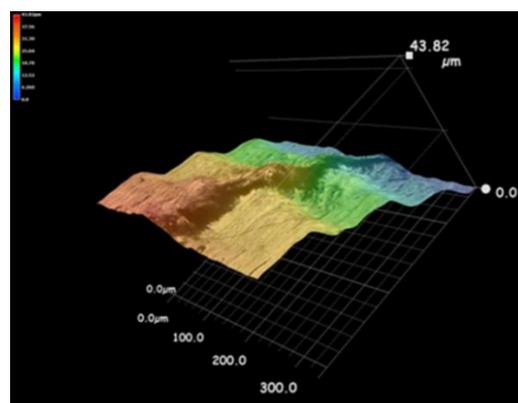
а



б



в



г

Рис. 5. Микроструктуры цилиндрического образца в процессе испытаний на усталость: а – деформационный рельеф; б – величины зон локализации деформации у трещины; в – 3D-структура с профилограммой по выделенному сечению; г – геометрическая aberrация волнового характера накопления повреждений

### Результаты фрактографических исследований и их обсуждение

Проведено исследование поверхностей разрушения образцов данного сплава после циклической деформации. Для идентификации макрозон поверхности разрушения была применена разработанная Мыльниковым В. В. «методика изучения поверхностей разрушения, превышающих максимальное поле зрения микроскопа», основанная на методе целевого фокуса в виде технологии для сшивания изображений в реальном времени с применением оптического прямого микроскопа *CRAFTEST CL-720e*. Для этого полученные данные с *Z*-направления при начальном поле зрения обрабатывали с использованием алгоритма сличения с образцом с целью определения следующей секции широкоформатного изображения, таким образом осуществляли «*Z*-позиционирование» и в конечном итоге получали сшитое изображение поверхности образца, представленное на рис. 6,а. На общем виде поверхности разрушения данного сшитого изображения выявлено 3 ярко выраженных зоны, характерных для следующих стадий разрушения:

I – стадия начального нестабильного роста трещины;

II – стадия стабильного распространения усталостной трещины;

III – долом.

Очаг трещины выделен пунктиром и показан на рис. 6,б. Зарождение трещины произошло на поверхности образца, а дальнейшее ее распространение показано стрелками. Это изображение получено сканированием поверхности на оптическом микроскопе, а для полноты восприятия то же самое место на образце (рис 6,в) показано с применением электронного микроскопа.

В зоне I на стадии начального нестабильного роста трещины наблюдается смешанный характер разрушения (рис 6,з) по двум модам – отрыва (рис 6,д) и сдвига с выраженной бороздчатостью (рис. 6,е). При этом в обоих случаях наблюдаются внутренние растрескивания, которые происходят по границам раздела фаз с проявлениями интеркристаллитного характера разрушения. Макрорельеф этой зоны имеет достаточно высокие гребни и вырывы на поверхности разрушения и характеризуется высокой шероховатостью с наличием резких перепадов высот с образованием радиальных рубцов.

На рис. 6,ж-з показаны микроструктуры поверхности разрушения образца второй зоны – стадии стабильного распространения усталостной трещины, где отчетливо наблюдаются усталостные бороздки (рис. 6,ж). Рельеф поверхности зоны II достаточно равномерный (рис. 6,з) с морфологически однородной поверхностью, однако небольшие редкие вторичные растрескивания на фрактограмме разрушения наблюдаются.

Зона III долома имеет преимущественно вязкий ямочный характер разрушения (рис. 6,к). Более детальное изучение поверхности разрушения в электронном микроскопе в светлопольном (рис. 5,л) и темнопольном (рис. 6,м) отображении позволило обнаружить характерные черты квазивязкого разрушения, но при этом излом носит достаточно плоский характер.

В целом рельеф монотонно становится однороднее от поверхности вглубь образца, т.е. от зоны I – к зоне II – и к зоне III.

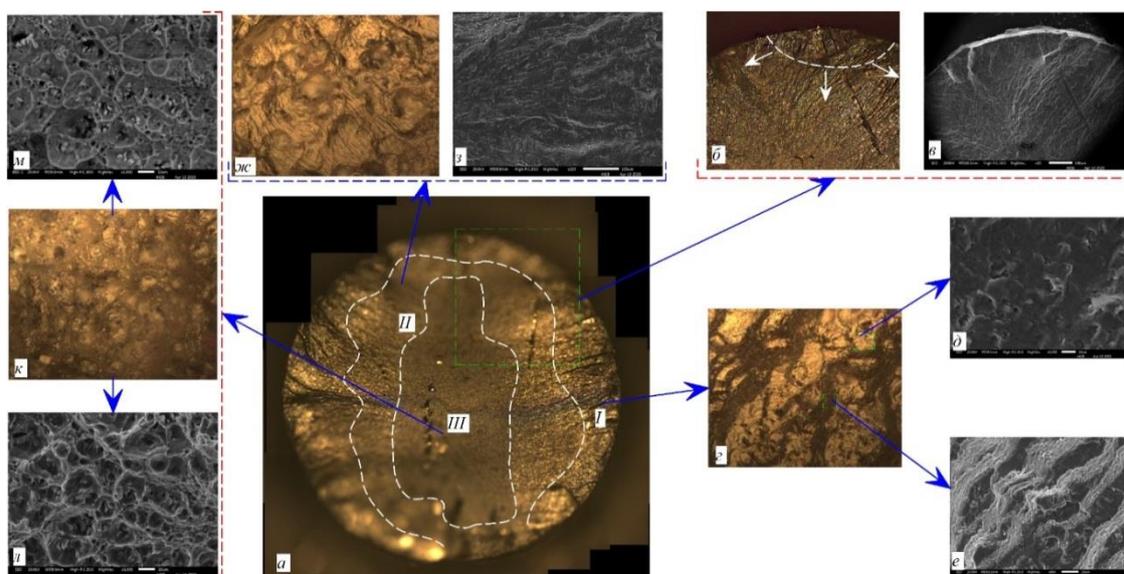


Рис. 6. Фрактография усталостного разрушения образца при  $\sigma = 240$  МПа;  $N = 21228$ ;  $\omega = 46,7$  Гц

#### Выводы:

Дисперсно-упрочненный композиционный материал на основе алюминия с 15% твердой фазы  $Al_2O_3$ , полученный по методу внутреннего окисления и испытанный на усталость по «мягкой» схеме нагружения консольного изгиба с вращением цилиндрических образцов, имеет высокие характеристики показателей сопротивления усталости  $tg\alpha_w = 0,1545$  и предела ограниченной выносливости  $\sigma_b = 106 = 140$  МПа. Результаты испытаний на усталость показали небольшой разброс относительно аппроксимирующей линии кривой усталости  $K_{кор} = -0,975$ , что свидетельствует о высокой стабильности структурно-чувствительных свойств данного материала.

Исследован характер разрушения образцов, в результате чего установлено, что во всех случаях проведенного испытания зарождение усталостной трещины происходит на поверхности образца. Макроизлом поверхности разрушения имеет три зоны: стадия начального нестабильного роста трещины – стадия стабильного распространения усталостной трещины – стадия долома, при этом рельеф монотонно становится однороднее более плоским от поверхности вглубь образца.

Таким образом, полученный экспериментальный дисперсно-упрочненный композиционный материал на основе алюминия показал существенно более высокие прочностные и деформационные характеристики, чем широко применяемые в строительстве алюминиевые материалы и имеет перспективы для применения в изготовлении современных изделий в строительстве.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луц, А. Р. Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего / А. Р. Луц, И. А. Галочкина ; Самарский государственный технический университет – Самара : СамГТУ, 2013. – 82 с. – Текст : непосредственный.
2. NADCA product specification standards for die casting : aluminum, aluminum-MMC, copper, magnesium, zinc and ZA alloys. – Revised for 2009 7 th edition. – Wheeling, Illinois. – 254 p.
3. Rawal, S. P. Rawal Metal-matrix composites for spaceapplications , *Jom*,/ S. P. Rawal and B. Al. – 2001. – Vol. 53, No. 4. – P. 14–17.
4. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Pure Al-Sic Metal Matrix Composite by Stir Casting Method / Redankamma Yenumula, Srinivasulu Dorasila, CV Ramana Murthy Naidu S, Rambabu Kalpukuri // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. – 2018. – Vol. 59. – No. 3. – P. 148–154.
5. Barathet, V. Fractographic characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulates reinforced Al2014 alloy composites subjected to tensile loading. *Frattura ed integrità strutturale* / V. Barathet, V. Auradi. – 2021. – Vol. 57. – P. 14–23.
6. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевых сплавов, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана / А. Р. Луц, Ю. В. Шерина, А. П. Амосов, А. Д. Качура. – Текст : непосредственный // *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. – 2023. – No. 4. – С. 70–86.
7. Obtaining Aluminum Oxide Based Cermet by Internal Oxidation / V. V. Myl'nikov, A. I. Pronin, M. V. Myl'nikova [et al.] // *Glass and Ceramics*. – 2023. – Vol. 79, No. 11–12. – P. 466-472. – DOI 10.1007/s10717-023-00534-4.
8. Чернышова, Т. А. Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства / Т. А. Чернышова, Л. И. Кобелева, Л. К. Болотова. – Текст : непосредственный // *Металлы*. – 2001. – № 6. – С. 85–98.
9. Иванов, Д. А. Изучение механизма разрушения алюмоматричного дисперсно-упрочненного композиционного материала Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со слоистой структурой при статическом и ударном нагружениях / Д. А. Иванов, С. Д. Шляпин, Г. Е. Вальяно. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2020. – № 4. – С. 66–75.
10. Мыльников, В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов / В. В. Мыльников. – Текст : непосредственный // *Наука и техника*. – 2019. – Том 18, № 5. – С. 427–435.
11. Мыльников, В. В. Исследование изменений показателей сопротивления усталости стали 30ХГСН2А в процессе циклического деформационного упрочнения / В. В. Мыльников, Д. И. Шетулов, А. И. Пронин. – Текст : непосредственный // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2020. – № 10 (784). – С. 52–60.
12. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н. Степнов, А. В. Шаврин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Машиностроение. – 2005. – 400 с. – ISBN 5-217-03272-3. – Текст : непосредственный.
13. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева ; Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук. – Москва : Наука. – 2015. – 484 с. : ил. – ISBN 978-5-02-039174-1. – Текст : непосредственный.
14. Suresh, S. *Fatigue of metals* / S. Suresh. – Cambridge University Press, 2006. –701 p.
15. Campbell, F. C. *Fatigue and Fracture : understanding the basics* / F. C. Campbell. – Almere : ASM international, 2012. – 525 p.



**GULIN Ivan Anatolevich, postgraduate student, senior teacher of the chair of construction technology; MYLNIKOV Vladimir Viktorovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of construction technology; KONDRASHKIN Oleg Borisovich, holder of the chair of construction technology; MINDRIN Daniil Ivanovich, postgraduate student, assistant of the chair of construction technology; RYABOV Nikolay Aleksandrovich, student**

## **POSSIBLE APPLICATION IN BUILDING STRUCTURES AND DEFORMATION FEATURES OF DISPERSION-HARDENED ALUMINIUM-BASED COMPOSITE MATERIALS**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-17-74; e-mail: tsp-nngasu@mail.ru

*Key words:* aluminum dispersion-hardened materials, resistance to fatigue, composite, deformation relief, durability, cyclic strength.

---

*The structural and deformation features of the behavior of an experimental dispersed-hardened aluminium-based composite material obtained by internal oxidation during cyclic deformation using optical direct, digital and scanning electron microscopy have been studied. A small variation in the experimental data on the fatigue resistance of the samples was noted. Fatigue characteristics are presented and the mechanism of the origin and propagation of fatigue cracks, fractography of the fatigue fracture surface are revealed. It has been established that the obtained experimental material has prospects for use in the manufacture of modern lightweight products in construction.*

---

### REFERENCES

1. Luts A. R., Galochkina I. A. Aluminiumyve kompozitsionnye splavy – splavy budushchego [Aluminum composite alloys - alloys of the future]. Samara, SamGTU, 2013, 82 p.
2. NADCA product specification standards for die casting: aluminum, aluminum-MMC, copper, magnesium, zinc and ZA alloys. Revised for 2009 7th edition. Wheeling, Illinois, 254 p.
3. Rawal S. P. Metal-matrix composites for space applications. Jom, 2001, Vol. 53, No. 4, P. 14–17.
4. Yenumula R., Dorasila S., CV Ramana Murthy Naidu S., Kalpukuri R. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Pure AlSiC Metal Matrix Composite by Stir Casting Method. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 2018, Vol. 59, No. 3, P. 148–154.
5. Barathet V., Auradi V. Fractographic characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulates reinforced Al2014 alloy composites subjected to tensile loading. Frattura ed integrità strutturale, 2021, Vol. 57, P. 14–23.
6. Luts A. R., Sherina Yu. V., Amosov A. P., Kachura A. D. Zhidkofaznoe poluchenie metodom SVS i termicheskaya obrabotka kompozitov na osnove aliuminievo-magnievyykh splavov, uprochnennykh vysokodispersnoy fazoy karbida titana [Liquid-phase production by SHS method and heat treatment of composites based on aluminum-magnesium alloys reinforced with a highly dispersed titanium carbide phase]. Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy], 2023, № 4, P. 70–86.
7. Mylnikov V. V., Pronin A. I., Mylnikova M. V., et al. Obtaining Aluminum Oxide Based Cermet by Internal Oxidation. Glass and Ceramics, 2023, Vol. 79, No. 11–12,



P. 466-472. DOI 10.1007/s10717-023-00534-4.

8. Chernyshova T. A., Kobeleva L. I., Bolotova L. K. Diskretno armirovannyye kompozitsionnyye materialy s matritsami iz aluminievyykh splavov i ikh tribologicheskie svoystva [Discretely reinforced composite materials with matrices of aluminum alloys and their tribological properties]. *Metally [Metals]*, 2001, № 6, P. 85–98.

9. Ivanov D. A., Shlyapin S. D., Valyano G. E. Izuchenie mekhanizma razrusheniya aliumomatrichnogo dispersno-uprochnennogo kompozitsionnogo materiala Al-Al4C3-Al2O3 so sloistoy strukturoy pri staticheskom i udarnom nagruzheniyakh [Study of the fracture mechanism of aluminum matrix dispersion-strengthened composite material Al-Al4C3-Al2O3 with a layered structure under static and impact loading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya [Powder Metallurgy and Functional Coatings]*, 2020, № 4, P. 66–75.

10. Mylnikov V. V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost konstruksionnykh materialov [Influence of loading frequency on the fatigue of structural materials]. *Nauka i tekhnika [Science and Technology]*, 2019, Vol. 18, № 5, P. 427–435.

11. Mylnikov V. V., Shetulov D. I., Pronin A. I. Issledovanie izmeneniy pokazateley soprotivleniya ustalosti stali 30KhGSN2A v protsesse tsiklicheskogo deformatsionnogo uprochneniya [Investigation of changes in fatigue resistance indicators of 30KhGSN2A steel in the process of cyclic strain hardening]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*, 2020, № 10 (784), P. 52–60.

12. Stepnov M. N., Shavrin A. V. Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy [Statistical methods of processing the results of mechanical tests]. 2-e izd., ispr. i dop. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 400 p., ISBN 5-217-03272-3.

13. Terentev V. F., Korableva S. A. Ustalost metallov [Fatigue of metals]. Institut metallurgii i materialovedeniya im. A. A. Baykova Rossiyskoy akademii nauk. Moscow, Nauka, 2015, 484 p.: il., ISBN 978-5-02-039174-1.

14. Suresh S. *Fatigue of metals*. Cambridge University Press, 2006, 701 p.

15. Campbell F. C. *Fatigue and Fracture: understanding the basics*. Almere, ASM international, 2012, 525 p.

© **И. А. Гулин, В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Миндрин, Н. А. Рябов, 2025**

Получено: 30.10.2024 г.