

УДК 539.4.015.1

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Al—Cu—Mg—Si, ПОЛУЧЕННОГО ТЕХНОЛОГИЕЙ 3D-ПЕЧАТИ

А. И. Клёнов¹, А. Н. Петрова², И. Г. Бродова², В. В. Астафьев²,
Е. Б. Смирнов¹, А. Ю. Гармашев¹

¹РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, klenov174@gmail.com

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург

Рассмотрены динамические свойства объемно-структурированных образцов с разной топологией сетчатых структур из алюминиевого сплава АК6, синтезированных селективным лазерным сплавлением. Испытания проведены при квазистатических скоростях деформации $10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$ методом Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Построены диаграммы деформирования, и определены значения условного предела текучести и предела прочности. Проведено сравнение результатов измерения свойств образцов с разной топологией сетчатых структур — кубические типа ГЦК и ОЦК и трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид. Исследовано влияние геометрических характеристик гироидов (размер ячейки, толщина стенки) на прочностные свойства образцов. Показано, что при одной и той же плотности материала гироиды обладают повышенными характеристиками. Сетчатые металлические материалы, полученные аддитивной технологией, могут быть использованы в технике для уменьшения массы конструкций и ослабления разрушающих высокоэнергетических механических воздействий.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, сетчатые структуры, структура сплава, прочность, высокоскоростная деформация.

DOI 10.15372/FGV2024.9466
EDN AVNXWL

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возросли технические потребности промышленности в получении объемно-структурированных материалов из керамики и различных металлов с пористой структурой, которые характеризуются, наряду с высокими механическими свойствами [1–4], пониженной плотностью. Наиболее подходящей технологией получения таких материалов является селективное лазерное сплавление (СЛС), а перспективным материалом — алюминий и его сплавы [5–9].

За счет низкой массы и высоких удельных механических характеристик сетчатые структуры, полученные 3D-печатью, представляют собой перспективную замену монолитным деталям. Такие сетчатые материалы могут быть востребованы в автомобильной, авиационной, космической промышленности и машиностро-

ении для защиты от внешних воздействий различных элементов и конструкций, подвергаемых в процессе эксплуатации высокоскоростным деформациям и ударно-волновому нагружению. На данный момент в качестве демпфирующих экранов при воздействии ударных волн используются защитные слои из пенопластов и металлических пеноматериалов (например, пеноалюминий) [1]. Металлическая пена характеризуется высокой эффективностью поглощения энергии при ударной нагрузке и лучшими по сравнению с пенопластами механическими свойствами. В процессе производства металлической пены образуется нежелательный градиент плотности за счет неравномерного распределения пор по размерам. Контроль однородности пор улучшает прочностные свойства материала. Пена с градиентом плотности имеет более низкий уровень напряжения при сжатии, чем пена с однородной структурой. Плотность пеноалюминия зависит от способа производства и размера пор: так, при размере пор $1 \div 5 \text{ мм}$ она составляет $0.35 \div 0.7 \text{ г/см}^3$.

Селективное лазерное плавление позволяет создавать сетчатые структуры с соразмерными порами и плотностями, при этом размер пор контролируется и существенно более равномерен в объеме материала. Таким образом, сетчатые структуры при использовании их в качестве деталей, ослабляющих ударно-волновое воздействие, имеют преимущества за счёт более высоких механических свойств по сравнению со вспененными металлическими материалами.

Как показано ранее [10, 11], для изготовления объемно-структурированных деталей с сетчатой структурой целесообразно использовать алюминиевый сплав марки АК6. Он относится к сплавам системы Al—Mg—Si—Cu , из которых изготавливают сложные штамповки, поэтому применение аддитивной технологии с использованием 3D-печати является перспективным и позволяет не только сократить расходы на производство таких деталей, но и повысить в два раза предел текучести относительно предела текучести отожженного сплава, полученного традиционной технологией [11].

Анализируя результаты работ по 3D-печати алюминиевых сплавов, можно заключить, что структура и свойства СЛС-материалов в значительной степени зависят от режимов их синтеза, в частности от плотности энергии лазера [12, 13]. Неправильно подобранные режимы приводят к формированию литейных дефектов (пор, усадочных пустот, горячих трещин, нерасплавленных частиц порошка), которые, в свою очередь, снижают качество изделий и ухудшают их свойства [14–16]. С учетом того, что теплопроводности и отражательные способности алюминиевых сплавов различны в зависимости от химического состава, рекомендуемые значения плотности энергии при их СЛС варьируют в широких пределах: от $\Psi = 40 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$ для сплавов Al—Si [12] до $\Psi = 300 \div 340 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$ для сплавов Al—Cu—Mg [13].

Как показано в [17], в процессе построения объемно-структурированных СЛС-образцов с кубической структурой возникают (чаще всего в углах ребер квадратного сечения) зоны с резким перепадом температуры, в которых значительны внутренние напряжения, приводящие к появлению «горячих» трещин, снижающих свойства изделия в целом. Появление таких дефектов наглядно показано на

объемно-структурированных изделиях из сплава АК6 [11]. Установлено, что одним из способов повышения технологичности и механических свойств изделий является замена сетчатой кубической структуры на структуру типа гироид, относящуюся к трижды периодическим поверхностям минимальной энергии (ТППМЭ) [18–21]. Отличие гироида от других топологий ТППМЭ состоит в том, что он не имеет прямых линий и элементов симметрии. Построение гироида осуществляется путем копирования его базового элемента в трёх независимых направлениях. Изучение физико-механических свойств керамики с такой топологией показало, что при значительно более низкой плотности, чем у сплошных образцов, гироиды имеют более высокие прочностные характеристики. Однако для металлических объемно-структурированных материалов с топологией гироид такие сведения практически отсутствуют, хотя их использование вместо керамики в изделиях космической и оборонной техники считается целесообразным [20].

Целью данной работы является изучение и сравнение динамических свойств объемно-структурированных образцов с разной топологией — кубической или типа гироид, а также выявление наилучшего конструктивного дизайна сетчатых структур для повышения прочностных характеристик сплава Al—Cu—Mg—Si .

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования служили образцы из сплава Al—Cu—Mg—Si (марка АК6 или аналог А1360), синтезированные на 3D-принтере по металлу RealizerSLM100. Химический состав СЛС-сплава: Al — основа, Mg — 0.61, Cu — 2.25, Si — 0.98, Fe — 0.7 %.

Были синтезированы и исследованы сетчатые (объемно-структурированные) образцы с разной топологией. Синтез осуществляли при двух режимах работы принтера. Режим I: мощность лазера $P = 100 \text{ Вт}$, скорость сканирования $V = 380 \text{ м/с}$, межтрековое расстояние $S = 0.15 \text{ мм}$, толщина слоя порошка $t = 0.05 \text{ мм}$, диаметр пучка лазера $\varnothing 75 \text{ мкм}$. Режим II: $P = 160 \text{ Вт}$, $V = 400 \text{ м/с}$, $S = 0.15 \text{ мм}$, $t = 0.05 \text{ мм}$, диаметр пучка $\varnothing 60 \text{ мкм}$. Все образцы с ГЦК- и ОЦК-структурами получены в режиме I синтеза. Синтез гироидов осуществляли при разных режимах с целью изучения

Таблица 1
Средние значения механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой

Номер комплекта	Тип сетчатой структуры	ρ , г/см ³	$\dot{\varepsilon}$, 10 ² с ⁻¹	$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	$\overline{\sigma_b}$, МПа
1	ГЦК	1.31	13 ÷ 32	20.2	47.3
2	ГЦК	1.24	13 ÷ 27	24.8	45.8
3	ГЦК	1.28	15 ÷ 38	25.8	52.3
4	ОЦК	1.14	19 ÷ 33	21.4	50.2
5	ОЦК	1.16	16 ÷ 28	22.8	42.8
6	ОЦК	1.17	17 ÷ 57	21.4	43.8
7	ОЦК	0.43	16 ÷ 24	3.0	4.1

влияния параметров 3D-печати на плотность СЛС-образцов.

Для исследования деформационного поведения сплава АК6 в условиях квазистатической деформации были изготовлены комплекты из 8–10 цилиндрических образцов с соотношением высоты к диаметру 2 : 1 (14 × 7, 16 × 8 и 18 × 9 мм). Методом Гопкинсона — Кольского были нагружены семь комплектов образцов с разными кубическими сетчатыми топологиями: три комплекта (1–3) с ГЦК-структурой, четыре комплекта (4–7) с ОЦК-структурой, семь комплектов (8–14) с сетчатой структурой гироид. Скорости деформации образцов, входящих в каждый комплект, варьировали от $\dot{\varepsilon} = 8.0 \cdot 10^2$ с⁻¹ до $5.7 \cdot 10^3$ с⁻¹, меняя скорость движения ударника. Входящие в один комплект образцы имели одинаковую плотность.

Значения плотности образцов с разной сетчатой структурой кубического типа указаны в табл. 1. Гироиды отличались не только плотностью, но и геометрическими характеристиками — периодом ячейки a и толщиной стенки h (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры исследованных структур, относящихся к разным кубическим топологиям, показаны на рис. 1, *a, б*, а типичные динамические диаграммы σ – ε и ε – $\dot{\varepsilon}$ даны на рис. 2, *a, б*. Видно, что зависимости похожи и соответствуют типичным динамическим диаграммам с участками упругой и пластической деформации.

В процессе обработки данных диаграмм были определены значения условного предела текучести $\sigma_{0.2}$ и предела прочности σ_b всех образцов, входящих в каждый комплект, и построены зависимости этих характеристик от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$. Пример такой зависимости для образцов с ГЦК сетчатой структурой и плотностью $\rho = 1.31$ г/см³ представлен на рис. 3, *a*, а для образцов с ОЦК сетчатой структурой и $\rho = 1.16$ г/см³ — на рис. 3, *б*.

Как следует из рис. 3, в пределах одного комплекта значения $\sigma_{0.2}$ и σ_b изменяются незначительно. Скоростные зависимости свойств образцов, входящих в остальные комплекты, аналогичны, т. е. в интервалах скоростей деформации $\dot{\varepsilon} = (13 \div 38) \cdot 10^2$ с⁻¹ (для образцов с ГЦК сетчатой структурой) и $\dot{\varepsilon} = (16 \div 33) \cdot 10^2$ с⁻¹ (для образцов с ОЦК сетчатой структурой) можно рассчитать средние значения $\overline{\sigma_{0.2}}$ и $\overline{\sigma_b}$ образцов, отличающихся плотностью (см. табл. 1).

Таблица 2
Средние значения механических свойств гироидов

Режим СЛС	Номер комплекта	a , мм	h , мм	ρ , г/см ³	$\dot{\varepsilon}$, 10 ² с ⁻¹	$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	$\overline{\sigma_b}$, МПа
I	8	1	0.1	1.8	8.0 ÷ 31	42.0	110.0
	9	1	0.2	2.2	9.0 ÷ 23	85.3	185.4
	10	2	0.2	1.2	11.5 ÷ 23	27.8	52.2
	11	3	0.2	0.7	5.5 ÷ 19	16.9	26.1
II	12	1	0.2	2.4	9.0 ÷ 20	87.4	244.4
	13	2	0.2	1.3	16.0 ÷ 22	38.0	66.3
	14	3	0.2	0.9	17.5 ÷ 25	20.0	39.5

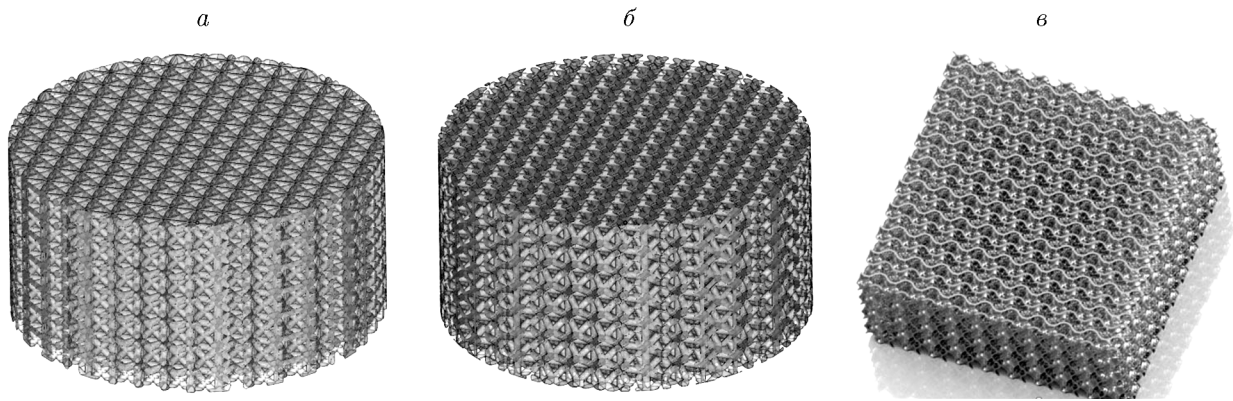


Рис. 1. Внешний вид объемно-структурированных образцов с сетчатыми структурами ГЦК (*a*), ОЦК (*б*), гироид (*в*)

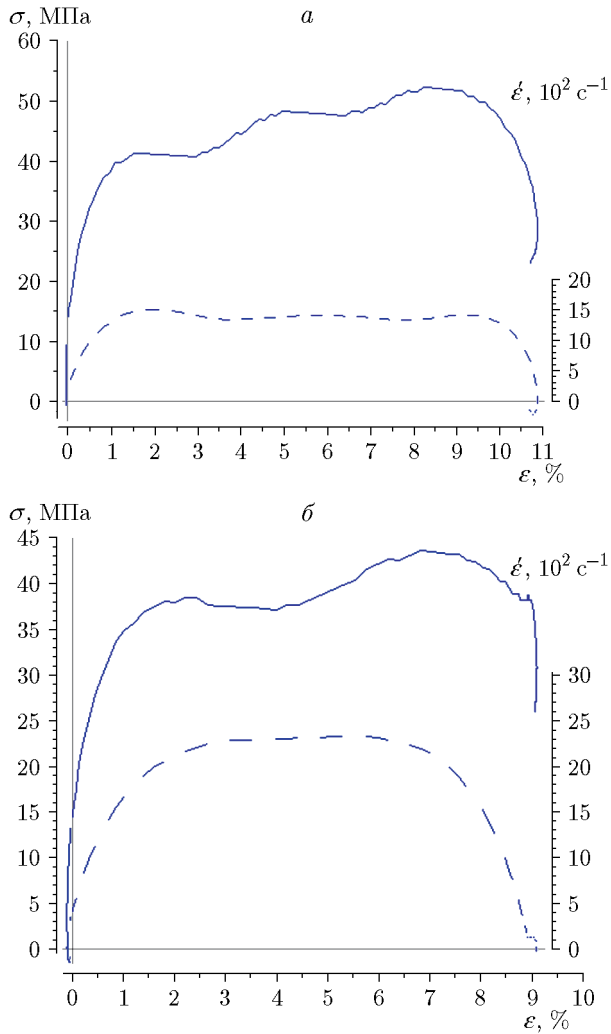


Рис. 2. Типичные диаграммы напряжение — деформация (сплошная линия) и напряжение — скорость деформации (штриховая линия) образцов с ГЦК (*a*) и ОЦК (*б*) сетчатыми структурами

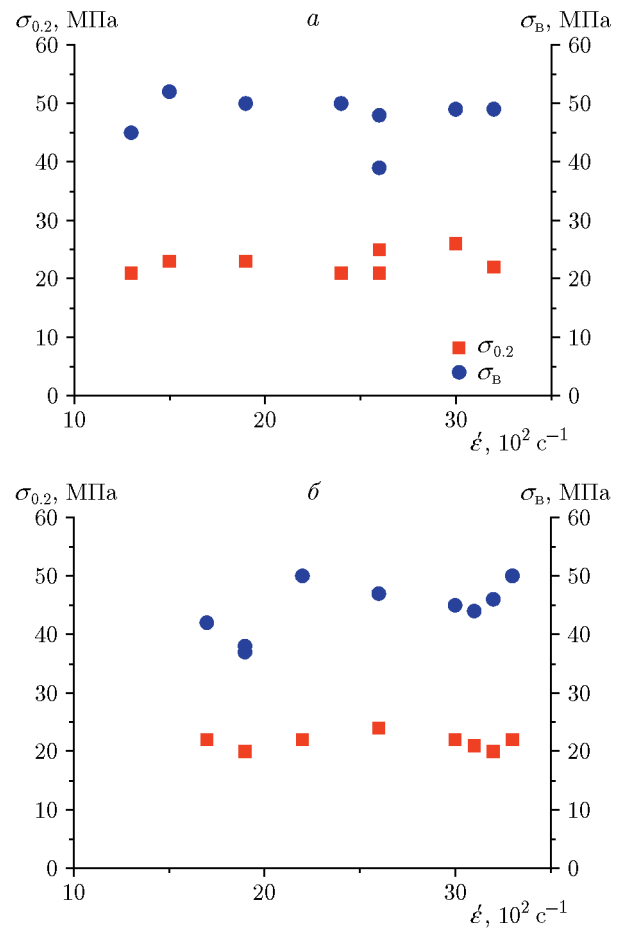


Рис. 3. Зависимости механических характеристик образцов с разной кубической сетчатой структурой от скорости деформации:
a — ГЦК, комплект 1, $\rho = 1.31 \text{ г/см}^3$; *б* — ОЦК, комплект 5, $\rho = 1.16 \text{ г/см}^3$

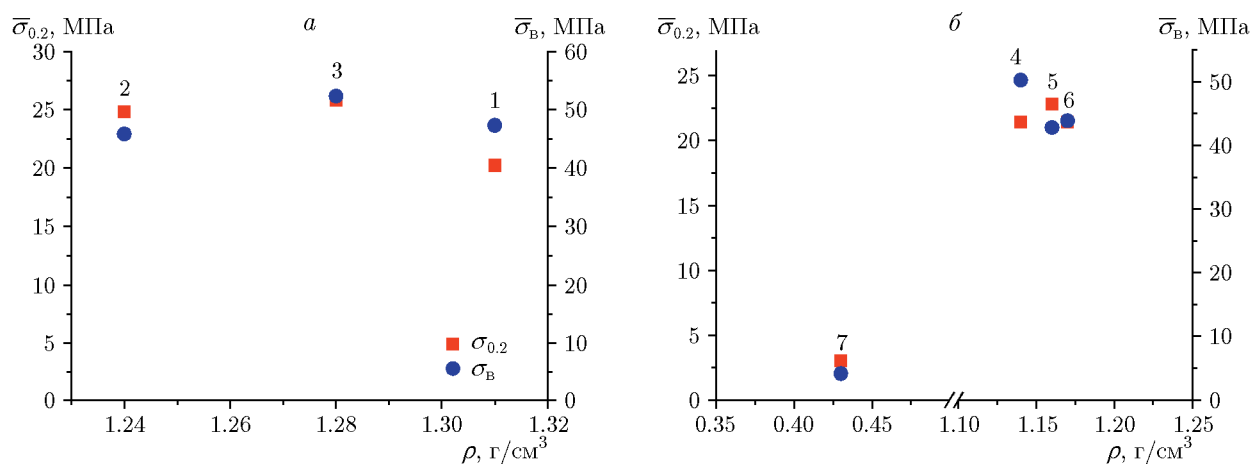


Рис. 4. Зависимости средних механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой от их плотности:

a — ГЦК, b — ОЦК; цифрами указаны номера комплектов

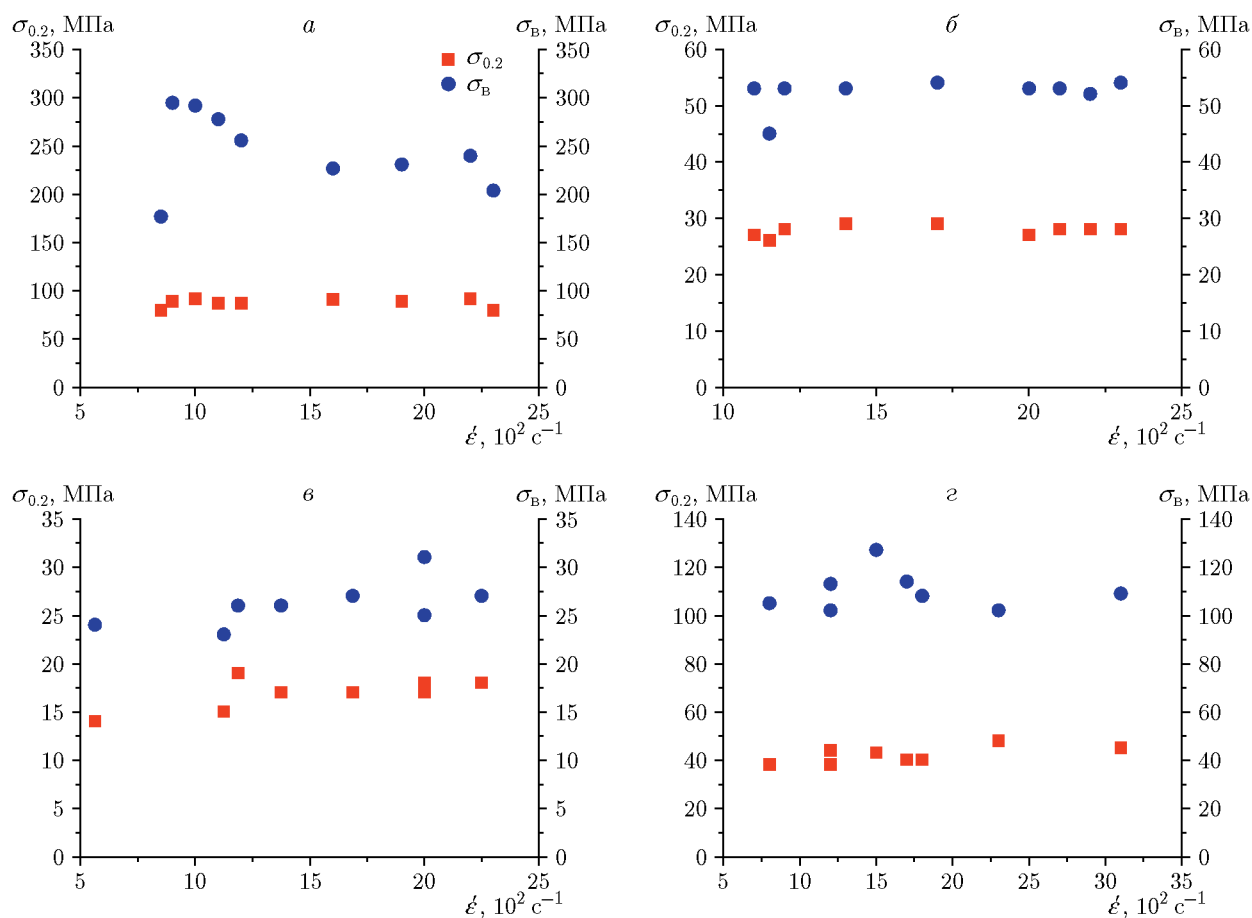


Рис. 5. Зависимости механических характеристик гироидов от скорости деформации:

a — комплект 9, b — комплект 10, v — комплект 11, z — комплект 8

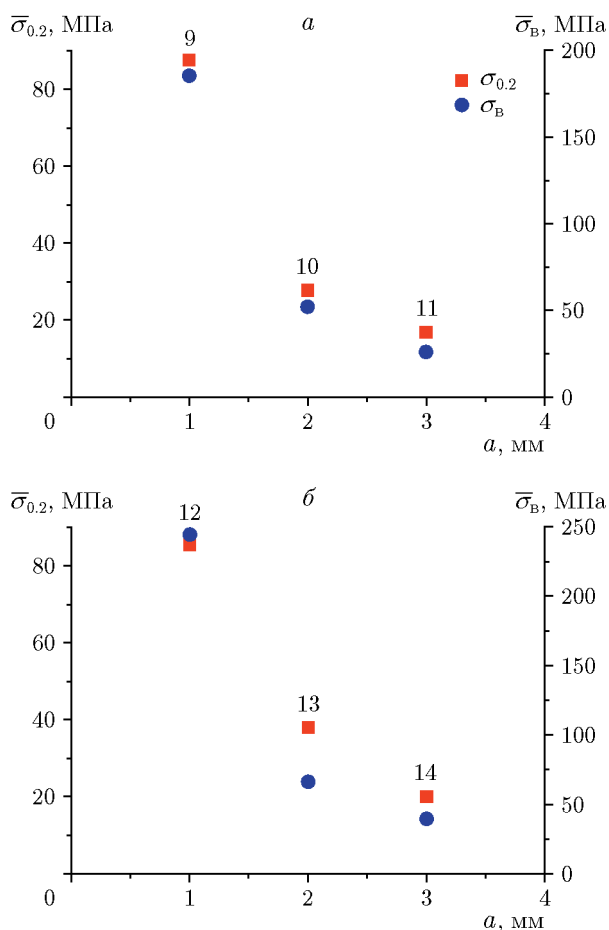


Рис. 6. Зависимости средних значений механических характеристик гироидов от периода ячейки:

a — комплекты 9–11, b — комплекты 12–14; цифрами указаны номера комплектов

На рис. 4 показано изменение средних значений $\overline{\sigma}_{0.2}$ и $\overline{\sigma}_B$ в зависимости от плотности материала с ГЦК (рис. 4, a) и ОЦК сетчатыми структурами (рис. 4, b). Из табл. 1 видно, что наибольшими значениями механических характеристик обладают образцы с ГЦК сетчатой структурой и плотностью $\rho = 1.28 \text{ г/см}^3$ (комплект 3).

Образцы с ОЦК сетчатой структурой и плотностью $\rho = 1.14 \div 1.17 \text{ г/см}^3$ (комплекты 4–6) имеют близкие значения механических характеристик. С уменьшением плотности до 0.43 г/см^3 (комплект 7) $\overline{\sigma}_{0.2}$ и $\overline{\sigma}_B$ резко уменьшаются до 3.0 и 4.1 МПа соответственно (см. табл. 1).

Если сравнить средние механические свойства образцов с разными сетчатыми структурами кубического типа, то получается, что у образцов с ГЦК-структурой и средней плот-

ностью $\bar{\rho} = 1.27 \text{ г/см}^3$ (комплекты 1–3) пределы составляют $\overline{\sigma}_{0.2} = 23.6 \text{ МПа}$ и $\overline{\sigma}_B = 48.5 \text{ МПа}$, а для образцов с ОЦК-структурой и средней плотностью $\bar{\rho} = 1.15 \text{ г/см}^3$ (комплекты 4–6) эти характеристики ниже и равны 21.9 и 45.6 МПа соответственно.

Ниже представлены результаты испытаний образцов с сетчатой структурой гироид (см. рис. 1, b). Образцы, входящие в комплекты 8–11, получены по режиму I синтеза, а входящие в комплекты 12–14 — по режиму II синтеза. При построении гироидов варьировали период ячейки a и толщину стенки h . В табл. 2 указано, как меняются механические характеристики образцов (комплекты 8–14) в зависимости от геометрических размеров гироидов.

На рис. 5 приведены скоростные зависимости пределов $\sigma_{0.2}$ и σ_B гироидов, отличающихся периодом ячейки (см. табл. 2) при одинаковой толщине стенки $h = 0.2 \text{ мм}$ (рис. 5, a – e , комплекты 9–11), и образцов, имеющих при периоде ячейки 1 мм меньшую в два раза толщину ребра (рис. 5, z , комплект 8). Исследованный интервал скоростей деформации при испытаниях гироидов составил $\dot{\epsilon} = (8 \div 31) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$. Согласно этим данным, все значения $\sigma_{0.2}$ и σ_B в указанном интервале скоростей деформации близки между собой, т. е. так же, как и для образцов с кубической топологией, отсутствует изменение динамических характеристик с увеличением $\dot{\epsilon}$.

Средние значения $\overline{\sigma}_{0.2}$ и $\overline{\sigma}_B$ образцов, рассчитанные для комплектов 9–11, приведены в табл. 2, а на рис. 6, a построен график изменения средних механических характеристик в зависимости от периода ячейки. Из этих данных следует, что увеличение периода ячейки с 1 до 3 мм приводит к резкому уменьшению прочностных характеристик $\overline{\sigma}_{0.2}$ с 85.3 до 16.9 МПа, а $\overline{\sigma}_B$ с 85.4 до 26.1 МПа, т. е. приблизительно в пять раз снижается предел текучести и в семь раз предел прочности.

На рис. 7 представлены зависимости $\sigma_{0.2}$ и σ_B для гироидов, полученных по режиму II СЛС, от скорости деформации. Можно заключить, что для образцов, входящих в комплект 12, прослеживается некоторая тенденция увеличения механических характеристик с ростом скорости деформации (рис. 7, a), для всех других образцов такой тенденции нет (рис. 7, b , e).

Средние значения прочностных свойств образцов, полученных по режиму II СЛС, при-

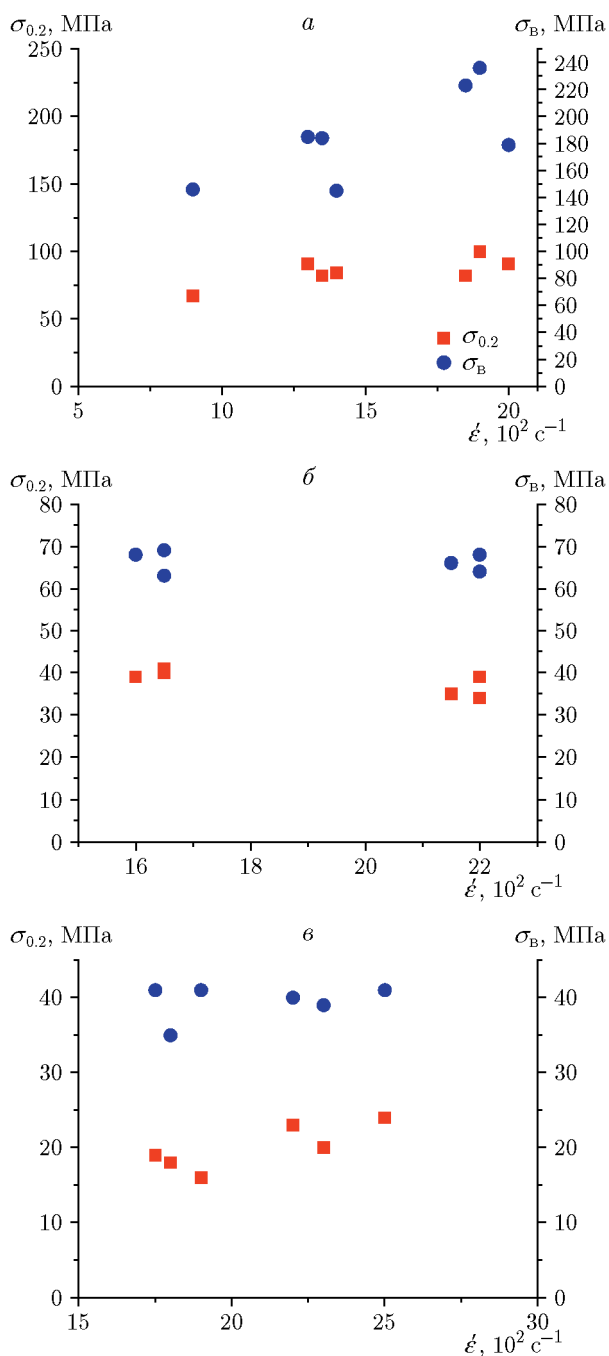


Рис. 7. Зависимости механических характеристик гироидов от скорости деформации:

a — комплект 12, *b* — комплект 13, *v* — комплект 14

ведены в табл. 2, а на рис.6,б показано, как они меняются в зависимости от периода ячейки гироидов. Исходя из этих данных наилучшие механические свойства имеют образцы комплекта 12 ($a = 1 \text{ мм}$, $h = 0.2 \text{ мм}$), а увеличение периода ячейки до 3 мм приводит к снижению свойств примерно в 4.5 ÷ 6 раз.

Таблица 3

Средние значения механических свойств СЛС-образцов

Тип сетчатой структуры	Номер комплекта	$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	$\overline{\sigma_b}$, МПа
ГЦК	1–3	23.6	48.5
ОЦК	5, 6	21.8	45.6
Гироид	10	27.8	52.2
Гироид	13	38.0	66.3

Представляет интерес сравнить свойства одинаковых по геометрическим размерам (a и h) гироидов, относящихся к комплектам 9 и 12; 10 и 13; 11 и 14 (см. табл. 2). Видно, что образцы, полученные по режиму II СЛС, более плотные и их механические свойства лучше. Следовательно, повышение мощности лазера со 100 до 160 Вт и небольшая корректировка скорости сканирования до 400 мм/с обеспечили рост механических характеристик гироидов на 30 ÷ 50 %. Как указано выше, возможной причиной отличия свойств гироидов является формирование разного количества литейных дефектов (непроплавленных частиц порошка, пор, трещин), ухудшающих качество этих СЛС-изделий.

На основании ранее проведенных исследований [10, 11] было установлено, что причиной снижения свойств СЛС-сплава АК6 являются литейные дефекты (непроплавленные частицы порошка, поры, трещины), количество которых зависит от условий синтеза, и в частности от плотности энергии лазера. На примере монолитных и объемно-структурированных образцов доказано, что для синтеза качественных изделий из сплава АК6 оптимальны значения $\Psi = 237 \div 331 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$ ($P = 200 \text{ Вт}$, $V = 400 \text{ мм/с}$, $t = 0.05 \text{ мм}$, $S = 0.03 \text{ мм}$). В случае режима I СЛС $\Psi = 35 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$, а в случае режима II $\Psi = 53.3 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$, т. е. оба режима не отвечают оптимальным условиям синтеза. Из этого можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение плотности энергии лазера до оптимальных значений должно дать положительный эффект и привести к дополнительному повышению механических характеристик гироидов из сплава АК6.

Чтобы определить, как влияет на свойства объемно-структурированных образцов замена

кубических сетчатых структур на структуру типа гироид, из всего массива образцов были выбраны те, которые имели близкие значения плотности $\rho = 1.15 \div 1.30 \text{ г/см}^3$ и одинаковые геометрические размеры $a = 2 \text{ мм}$, $h = 0.2 \text{ мм}$. Приведенные в табл. 3 осредненные механические характеристики образцов с разной сетчатой структурой и их сравнение наглядно показывают преимущество гироидов как перспективного дизайна с целью повышения механических свойств СЛС-изделий. Например, прирост предела прочности гироидов составляет $6 \div 14 \%$ относительно предела прочности образцов с кубической сетчатой структурой, полученных при том же режиме синтеза.

ВЫВОДЫ

1. Получены и проанализированы результаты эксперимента по исследованию динамических свойств объемно-структурированных образцов из сплава АК6 с разным типом сетчатых структур: ГЦК, ОЦК и ТППМЭ (гироид). На основании динамических диаграмм, полученных при нагружении образцов методом Гопкинсона — Кольского в интервале скоростей деформации $(5 \div 57) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, определены значения условного предела текучести и предела прочности.

2. Построены зависимости прочностных характеристик образцов с разной сетчатой структурой от скорости деформации, и показано, что в исследованном интервале скоростей механические свойства остаются постоянными.

3. Проведено сравнение механических свойств образцов с разной кубической сетчатой структурой. Установлено, что свойства образцов, имеющих ГЦК-структуру ($\rho = 1.27 \text{ г/см}^3$), выше свойств образцов с ОЦК-структурой ($\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$) примерно на 7 %. Снижение плотности до 0.4 г/см^3 резко, в $8 \div 10$ раз, ухудшает свойства материала.

4. Обработаны и проанализированы результаты эксперимента по исследованию динамических свойств гироидов, и построены зависимости прочностных свойств от геометрических характеристик гироидов. Определено, что наилучшие свойства имеют гироиды с размером ячейки 1 мм и толщиной стенки 0.2 мм.

5. Показано, что динамические свойства объемно-структурированных образцов зависят от параметров СЛС. Рост плотности энергии с 35 до $53.3 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}^3$ приводит к увеличению

механических характеристик.

6. Сравнение прочностных характеристик образцов с разной сетчатой структурой наглядно показывает преимущество гироидов как перспективного дизайна для повышения свойств объемно-структурированных изделий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 122021000033-2 «Разработка новых эффективных технологий получения и обработки материалов с высокими функциональными и конструкционными свойствами на основе изучения структурно-фазовых превращений в металлических сплавах» (шифр «Структура»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохорчук Е. А., Леонов А. А., Власова К. А., Трапезников А. В., Никитин В. И., Никитин К. В. Перспектива применения пеноалюминия для изделий авиакосмической техники (обзор) // Тр. ВИАМ. — 2021. — № 12. — С. 21–30. — DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-21-30. — EDN: POYFFK.
2. Каблов Е. Н., Антипов В. В., Гирш Р. И., Серебренникова Н. Ю., Коновалов А. Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // Вестн. машиностроения. — 2020. — № 12. — С. 46–52. — DOI: 10.36652/0042-4633-2020-12-46-52. — EDN: DBPVCH.
3. Антипов В. В., Клочкова Ю. Ю., Романенко В. А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. — 2017. — № 5. — С. 195–211. — DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-195-211. — EDN: WFQSQM.
4. Hassanli F., Paydar V. H. Improvement in energy absorption properties of aluminium foams by designing pore-density distribution // J. Mater. Res. Technol. — 2021. — V. 14. — P. 609–619. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.06.073.
5. Mahbod M., Asgari M. Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice

- structure: analytical and numerical models // *Int. J. Mech. Sci.* — 2019. — V. 155. — P. 248–266. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.02.041.
6. **Каблов Е. Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии.* — 2015. — № 1 (34). — С. 3–33. — DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. — EDN: TJEMOB.
 7. **Сорокин В.** Аддитивные технологии: новые условия, новые возможности // *Аддитивные технологии.* — 2022. — № 3. — С. 21–24.
 8. **DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Beese A. M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W.** Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties // *Prog. Mater. Sci.* — 2018. — V. 92. — P. 112–224. — DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
 9. **Попкова И. С., Золоторевский В. С., Солонин А. Н.** Производство изделий из алюминия и его сплавов методом селективного лазерного плавления // *Технология легких сплавов.* — 2015. — № 4. — С. 14–24. — EDN: VLQGNH.
 10. **Бродова И. Г., Кленов А. Н., Ширинкина И. Г., Смирнов Е. Б., Орлова Н. Ю.** Структура и механические свойства сплава Al—Cu—Mg—Si, полученного селективным лазерным сплавлением // *Физика металлов и металловедение.* — 2021. — Т. 122, № 12. — С. 1309–1316. — DOI: 10.31857/S0015323021120032. — EDN: VPXCYA.
 11. **Петрова А. Н., Клёнов А. И., Бродова И. Г., Распоиенко Д. Ю., Пильщиков А. А., Орлова Н. Ю.** Влияние технологических факторов на структуру и свойства Al—Cu—Mg—Si сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // *Физика металлов и металловедение.* — 2023. — Т. 124. — № 10. — С. 961–970. — DOI: 10.31857/S0015323023600922. — EDN: REYDMA.
 12. **Read N., Wang W., Essa K., Attallah M. M.** Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimization and mechanical properties development // *Mater. Des.* — 2015. — V. 65. — P. 417–424. — DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044.
 13. **Zhang H., Zhu H., Qi T., Hu Z., Zeng X.** Selective laser melting of high strength Al—Cu—Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties // *Mater. Sci. Eng. A.* — 2016. — V. 656. — P. 47–54. — DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.101.
 14. **Carter L. N., Martin C., Withers P. J., Attallah M. M.** The Influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behavior in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy // *J. Alloy Compd.* — 2014. — V. 615. — P. 338–347. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172.
 15. **Galy C., Le Guen E., Lacoste E., Arvieu C.** Main defects observed in aluminium alloy parts produced by SLM: From causes to consequences // *Additive Manuf.* — 2018. — V. 22. — P. 165–175. — DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.005.
 16. **Khairallah S. A., Anderson A. T., Rubenchik A., King W. E.** Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones // *Acta Mater.* — 2016. — V. 108. — P. 36–45. — DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.014.
 17. **Yasa E., Kruth J.** Application of laser remelting on selective laser melting parts // *Adv. Prod. Eng. Manag.* — 2011. — V. 6, N 4. — P. 256–270.
 18. **Лорд Э. Э., Маккей А. Л., Ранганатан С.** Новая геометрия для новых материалов. — М.: Физматлит, 2010.
 19. **Kovalev I.** Butterflies and helicopters // *Bull. Entomolog. Soc. Canada.* — 2005. — V. 37, № 3. — P. 140–142.
 20. **Дьяченко С. В., Лебедев Л. А., Сычев М. М., Нефедова Л. А.** Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба // *ЖТФ.* — 2018. — Т. 88, № 7. — С. 1014–1017. — DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555. — EDN: XTLQKL.
 21. **Savio G., Rosso S., Meneghello R., Concheri G.** Geometric modeling of cellular materials for additive manufacturing in biomedical field: a review // *Appl. Bionics Biomech.* — 2018. — V. 2018, N 3. — P. 1–14. — DOI: 10.1155/2018/1654782.

Поступила в редакцию 15.03.2024.

После доработки 25.04.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.