

УДК 539.4.015.1

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА AI—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-структурных 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-структурных 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 $0.35 \div 0.7 \text{ г}/\text{cm}^3$.

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-структурных 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 $\Psi = 40 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{мм}^3$ для сплавов Al—Si [12] до $\Psi = 300 \div 340 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{мм}^3$ для сплавов Al—Cu—Mg [13].

Как показано в [17], в процессе построения объемно-структурных 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-структурных 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 трех 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-структурных 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-структурных 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 A1360), 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-структурные) 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	$\dot{\epsilon}$, 10 ² с ⁻¹	$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	$\overline{\sigma_v}$, 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 комплексы 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 гироидов. Скорости деформации образцов, входящих в каждый комплект, варьировали от $\dot{\epsilon} = 8.0 \cdot 10^2$ 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, а, б, а типичные динамические диаграммы σ – ϵ и ϵ – $\dot{\epsilon}$ даны на рис. 2, а, 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_v всех образцов, входящих в каждый комплект, и построены зависимости этих характеристик от скорости деформации $\dot{\epsilon}$. Пример такой зависимости для образцов с ГЦК сетчатой структурой и плотностью $\rho = 1.31$ г/см³ представлен на рис. 3, а, 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_v изменяются незначительно. Скоростные зависимости свойств образцов, входящих в остальные комплексы, аналогичны, т. е. в интервалах скоростей деформации $\dot{\epsilon} = (13 \div 38) \cdot 10^2$ с⁻¹ (для образцов с ГЦК сетчатой структурой) и $\dot{\epsilon} = (16 \div 33) \cdot 10^2$ с⁻¹ (для образцов с ОЦК сетчатой структурой) можно рассчитать средние значения $\overline{\sigma_{0.2}}$ и $\overline{\sigma_v}$ 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	$\dot{\epsilon}$, 10 ² с ⁻¹	$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	$\overline{\sigma_v}$, 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

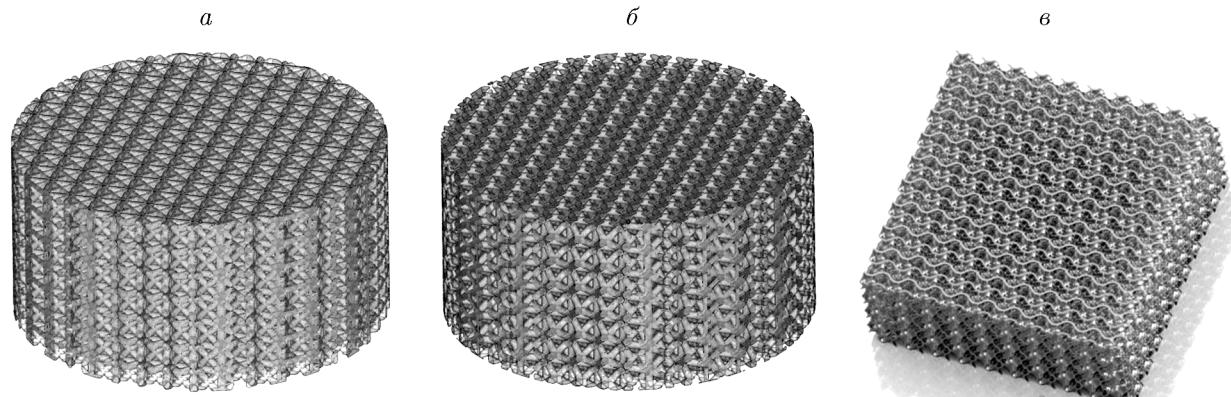


Рис. 1. Внешний вид объемно-структурированных образцов с сетчатыми структурами ГЦК (а), ОЦК (б), гироид (в)

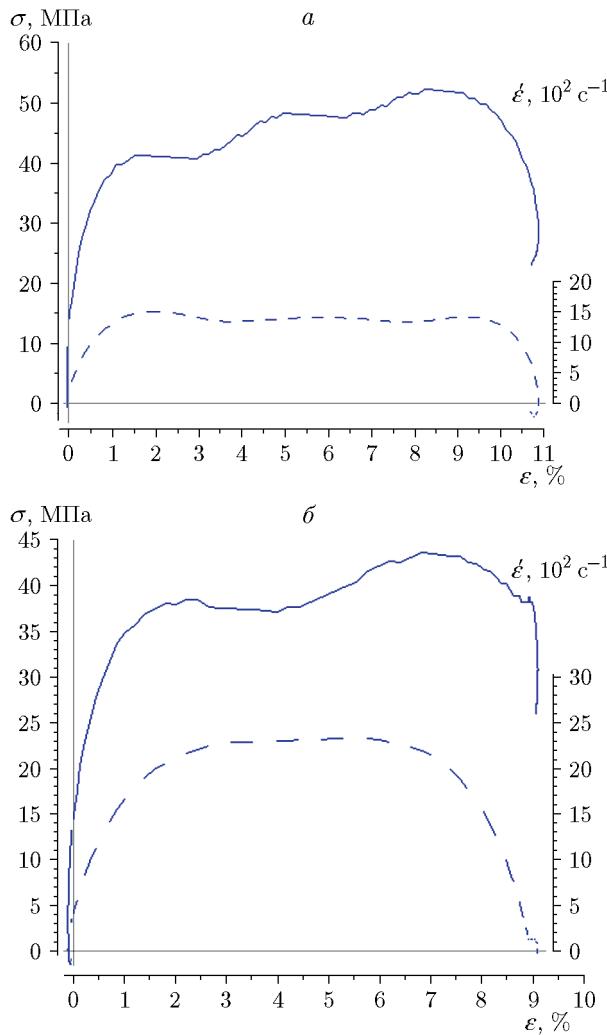


Рис. 2. Типичные диаграммы напряжение — деформация (сплошная линия) и напряжение — скорость деформации (штриховая линия) образцов с ГЦК (а) и ОЦК (б) сетчатыми структурами

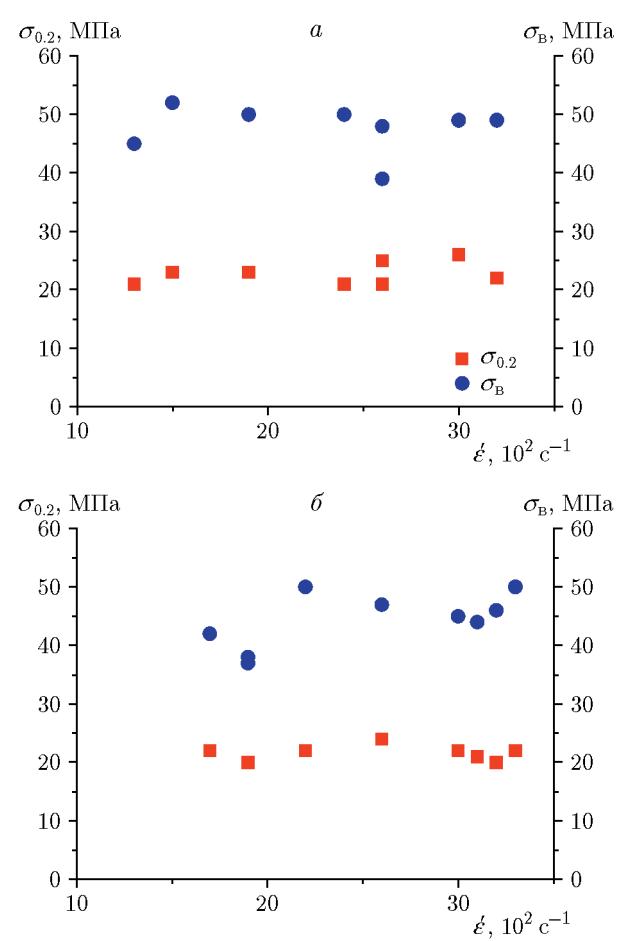


Рис. 3. Зависимости механических характеристик образцов с разной кубической сетчатой структурой от скорости деформации:
а — ГЦК, комплект 1, $\rho = 1.31 \text{ г}/\text{см}^3$; б — ОЦК, комплект 5, $\rho = 1.16 \text{ г}/\text{см}^3$

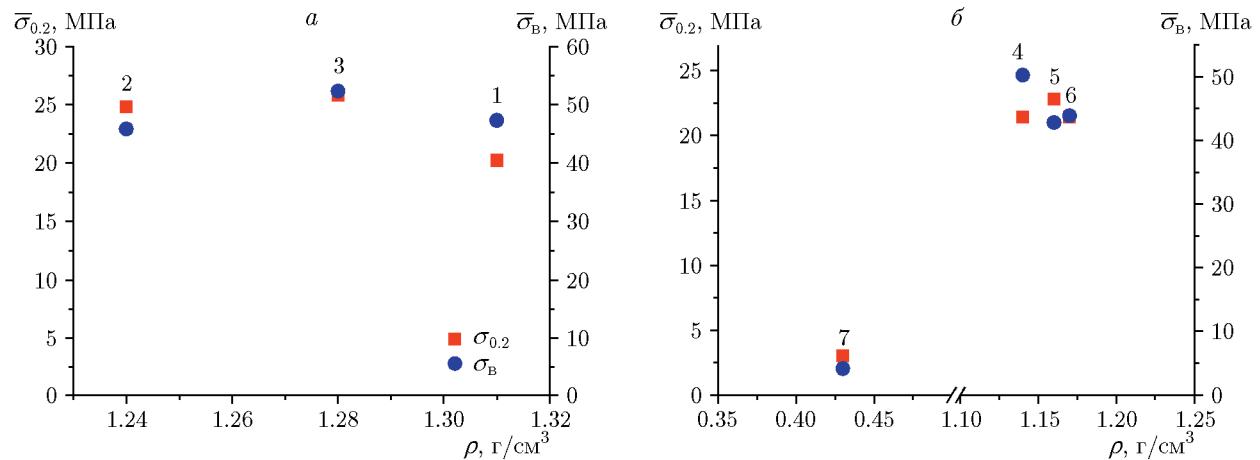


Рис. 4. Зависимости средних механических характеристик образцов с кубической сетчатой структурой от их плотности:

a — ГПК, *б* — ОЗК; цифрами указаны номера комплектов

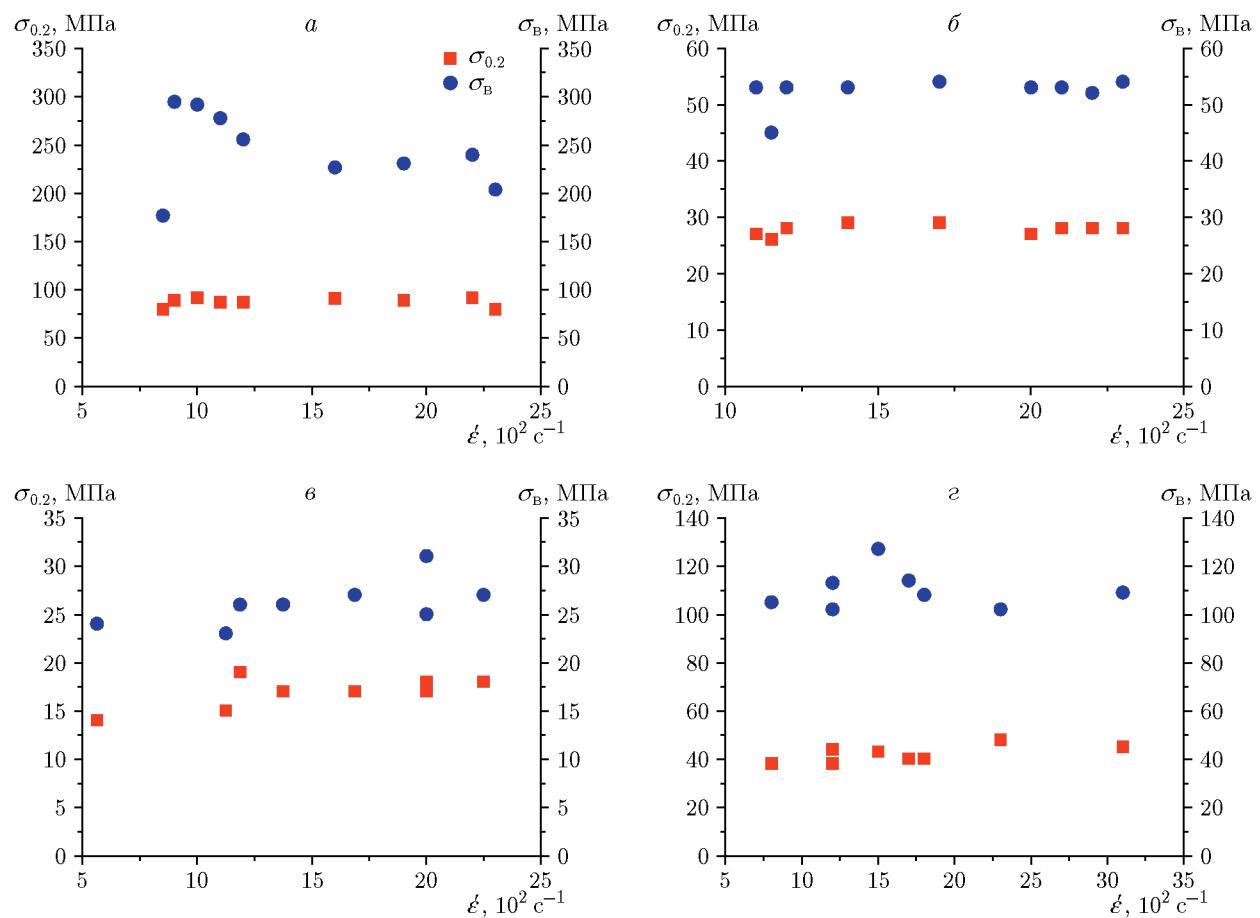


Рис. 5. Зависимости механических характеристик гироидов от скорости деформации:

a — комплект 9, *б* — комплект 10, *в* — комплект 11, *г* — комплект 8

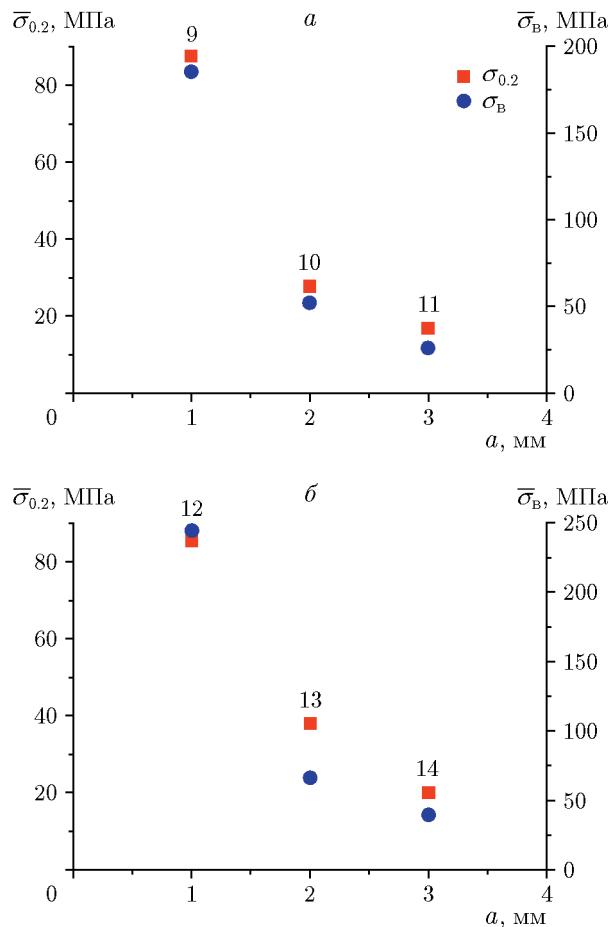


Рис. 6. Зависимости средних значений механических характеристик гироидов от периода ячейки:
а — комплекты 9–11, б — комплекты 12–14; цифрами указаны номера комплектов

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

Образцы с ОЦК сетчатой структурой и плотностью $\rho = 1.14 \div 1.17 \text{ г}/\text{см}^3$ (комплекты 4–6) имеют близкие значения механических характеристик. С уменьшением плотности до $0.43 \text{ г}/\text{см}^3$ (комплект 7) $\bar{\sigma}_{0.2}$ и $\bar{\sigma}_b$ 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 $\bar{\rho} = 1.27 \text{ г}/\text{см}^3$ (комплекты 1–3) пределы составляют $\bar{\sigma}_{0.2} = 23.6 \text{ МПа}$ и $\bar{\sigma}_b = 48.5 \text{ МПа}$, а для образцов с ОЦК-структурой и средней плотностью $\bar{\rho} = 1.15 \text{ г}/\text{см}^3$ (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, в). Образцы, входящие в комплексы 8–11, получены по режиму I синтеза, а входящие в комплексы 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, а–в, комплекты 9–11), и образцов, имеющих при периоде ячейки 1 мм меньшую в два раза толщину ребра (рис. 5, г, 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 $\bar{\sigma}_{0.2}$ и $\bar{\sigma}_b$ образцов, рассчитанные для комплектов 9–11, приведены в табл. 2, а на рис. 6, а 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 $\bar{\sigma}_{0.2}$ с 85.3 до 16.9 МПа, а $\bar{\sigma}_b$ 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, а), для всех других образцов такой тенденции нет (рис. 7, б, в).

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

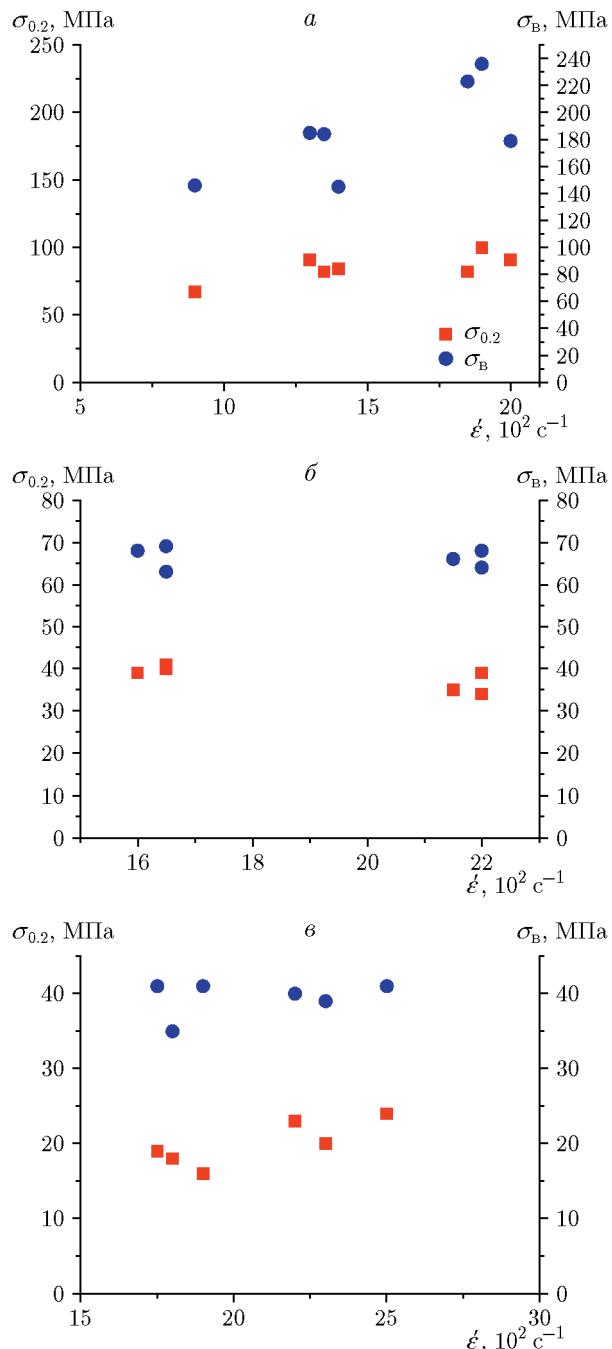


Рис. 7. Зависимости механических характеристик гириодов от скорости деформации:
 а — комплект 12, б — комплект 13, в — комплект 14

веденены в табл. 2, а на рис. 6, б показано, как они меняются в зависимости от периода ячейки гириодов. 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 \div 6 раз.

Таблица 3 Средние значения механических свойств СЛС-образцов			
Тип сетчатой структуры	Номер комплекта	$\bar{\sigma}_{0.2}$, МПа	$\bar{\sigma}_B$, МПа
ГЦК	1–3	23.6	48.5
ОЦК	5, 6	21.8	45.6
Гириод	10	27.8	52.2
Гириод	13	38.0	66.3

Представляет интерес сравнить свойства одинаковых по геометрическим размерам (а и б) гириодов, 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 гириодов на 30 \div 50 %. Как указано выше, возможной причиной отличия свойств гириодов 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-структурных образцов доказано, что для синтеза качественных изделий из сплава АК6 оптимальны значения $\Psi = 237 \div 331 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{мм}^3$ ($P = 200 \text{ Вт}$, $V = 400 \text{ мм}/\text{с}$, $t = 0.05 \text{ мм}$, $S = 0.03 \text{ мм}$). В случае режима I СЛС $\Psi = 35 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{мм}^3$, а в случае режима II $\Psi = 53.3 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{мм}^3$, 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 гириодов из сплава АК6.

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

кубических сетчатых структур на структуру типа гириод, из всего массива образцов были выбраны те, которые имели близкие значения плотности $\rho = 1.15 \div 1.30 \text{ г}/\text{см}^3$ 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 гириодов как перспективного дизайна с целью повышения механических свойств СЛС-изделий. Например, прирост предела прочности гириодов составляет $6 \div 14 \%$ относительно предела прочности образцов с кубической сетчатой структурой, полученных при том же режиме синтеза.

ВЫВОДЫ

- Получены и проанализированы результаты эксперимента по исследованию динамических свойств объемно-структурных образцов из сплава АКб с разным типом сетчатых структур: ГЦК, ОЦК и ТППМЭ (гириод). 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.

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

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

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

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

механических характеристик.

- Сравнение прочностных характеристик образцов с разной сетчатой структурой наглядно показывает преимущество гириодов как перспективного дизайна для повышения свойств объемно-структурных 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

- 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.
- 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.
- Антипов В. В., Ключкова 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-S-195-211. — EDN: WFQSQM.
- 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.
- 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., Распосиенко 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., Meneghelli 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.