

## МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

---

---

УДК 539.3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Воронин С.В. \*, Лобода П.С. \*\*, Ледяев М.Е. \*\*\*

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,  
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

*\* e-mail: voronin@ssau.ru*

*\*\* e-mail: stimulator90@mail.ru*

*\*\*\* e-mail: sillmarllion@mail.ru*

---

Построены конечно-элементные модели (КЭМ) образцов с различной пористостью и типом пористой структуры. Проведены виртуальные испытания на одноосное растяжение данных КЭМ образцов. При анализе полученных результатов определена пористость, при которой предел текучести увеличивается на 2,062% по сравнению с компактным материалом из сплава АД1М. При замене марки алюминиевого сплава на А5 получено совпадение пределов текучести КЭМ пористого и компактного образцов. Для проверки адекватности моделирования были получены натурные образцы. В результате испытаний натуральных образцов подтверждена достоверность конечно-элементного моделирования. Таким образом, доказана возможность повышения удельных механических свойств материала путем введения упорядоченного расположения пор.

*Ключевые слова:* пора, пористая структура, метод конечных элементов, моделирование, удельные механические свойства, испытания на растяжение, предел текучести.

---

#### Введение

Создание конкурентоспособной техники требует применения новых материалов с высокими удельными механическими характеристиками. Традиционно такие материалы получают путем введения легирующих элементов, которые образуют упрочняющие фазы в объеме основного металла. Данный подход, как правило, приводит к увеличению массы, так как плотность упрочняющих фаз чаще всего больше, чем плотность основного материала. Масса материала может быть уменьшена путем введения

в его объем дефектов структуры, таких, как поры. Благодаря высоким демпфирующим свойствам, низкой теплопроводности, высокой звукоизолирующей способности и негигроскопичности пористые материалы нашли широкое применение в промышленности [1–7]. При существующих технологиях изготовления пористого алюминия снижается уровень его прочностных свойств. Однако по мере упорядочения пористой структуры прочностные свойства готовых изделий повышаются [8–10].

Целью проведенного исследования было повышение удельных механических свойств материала, в частности предела текучести, путем введения упорядоченно расположенных пор.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить конечно-элементное моделирование процесса деформирования образцов с различной пористостью и типом упорядоченной пористой структуры.

2. Определить пористую структуру, при которой происходит повышение удельных механических характеристик, в частности значения предела текучести, пористого материала.

3. Получить опытный плоский образец с упорядоченной пористой структурой методом лазерного прожига и механического сверления.

4. Выявить характерные особенности макроструктуры при различных способах изготовления.

5. По результатам натурных испытаний на одноосное растяжение оценить адекватность конечно-элементного моделирования.

#### Методика построения КЭМ образцов

В данном исследовании для определения оптимальной пористой структуры применялось конечно-элементное моделирование процессов деформации в пакете программ инженерного анализа MSC.Marc [11, 12].

Исследование влияния пористости и типа пористой структуры на механические свойства проводилось на следующих типах упорядоченных пористых структур:

а) квадратной — поры расположены в вершинах воображаемых сопряженных квадратов (рис. 1,а);

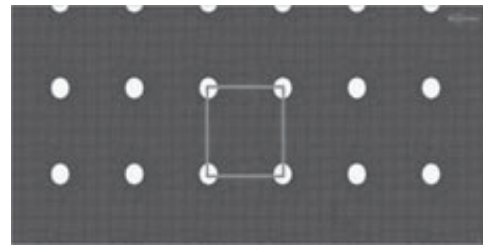
б) шахматной — продольные и поперечные расстояния между пор одинаковы, но каждый нечетный ряд сдвинут на половину межцентрового расстояния (рис. 1,б);

в) квадратной с порой в центре — аналогична квадратной пористой структуре, однако на пересечениях диагоналей вершин квадратов расположена дополнительная пора (рис. 1,в);

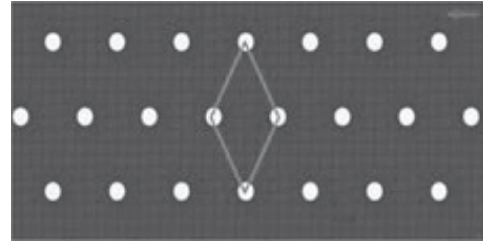
г) треугольной — поры расположены в вершинах воображаемых сопряженных правильных треугольников (рис. 1,г);

д) шестигранной — поры расположены в вершинах воображаемых сопряженных правильных шестигранников (рис. 1,д).

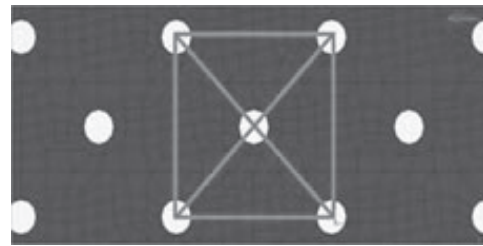
Для оптимизации процесса создания КЭМ и сокращения временных затрат был написан ряд программ-приложений на языке программирования



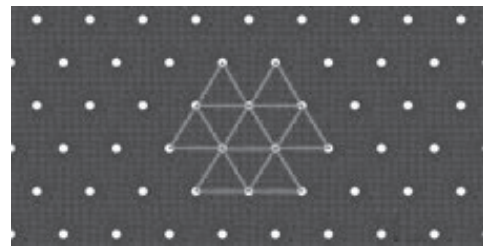
а)



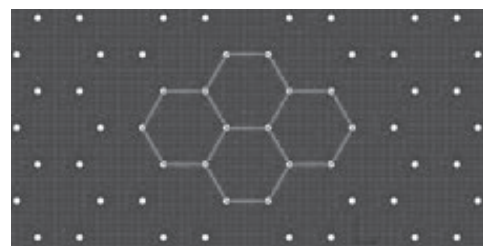
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Типы пористых структур: квадратная (а); шахматная (б); квадратная с порой в центре (в); треугольная (г) и шестигранная (д)

Python. Построение пористой структуры, с помощью разработанных программ-приложений осуществлялось методом копирования элементарной ячейки с единичной порой в плоскости рабочей зоны образца. Линейные размеры элементарной ячейки варьировались в зависимости от расстояния между центрами пор в продольном и поперечном направлениях.

В целях сокращения продолжительности конечно-элементного анализа в алгоритм программ-при-

ложений были заложены следующие допущения. Первое допущение заключалось в том, что модель строилась двухмерной. Второе допущение позволяло пропорционально уменьшить линейные размеры КЭМ образца по ГОСТ 11701-84 в 27 раз.

Для равномерного приложения растягивающих нагрузок, по торцам и краям образцов строилась буферная зона из компактного материала [13]. Конечным элементам буферной и рабочей зоны образца задавались механические свойства алюминиевого сплава АД1 в отожженном состоянии. При конечно-элементном анализе учитывались упругие свойства материала и его упрочнение в процессе холодной пластической деформации. К КЭМ образца прикладывались усилия, вызывающие напряжения 50 МПа, что выше предела текучести сплава АД1 (31 МПа), но ниже его предела прочности (71–72 МПа).

### Компьютерное исследование влияния пористой структуры на механические свойства КЭМ образца

Для оценки влияния типа упорядоченной пористой структуры на механические свойства материала был построен ряд КЭМ с различным типом пористой структуры при постоянной пористости 5%. Затем было проведено виртуальное испытание на одноосное растяжение, в результате которого были получены диаграммы растяжения (рис. 2).

Как видно из диаграмм растяжения при пористости 5%, тип пористой структуры не оказывает существенного влияния на предел текучести материала. Это связано с тем, что при низкой пористости отсутствует взаимное влияние пор. Однако

предел текучести КЭМ пористых образцов с вышеуказанными типами пористых структур снизился на 10% по сравнению с компактным материалом.

В ходе исследований было выявлено, что при увеличении пористости до 20% на всех типах пористых структур наблюдается повышение пластических свойств и снижение прочностных свойств по сравнению с компактным материалом.

При пористости от 0,4 до 0,5% наблюдается совпадение пределов текучести КЭМ пористых образцов с пределом текучести КЭМ образцов из компактного материала. При дальнейшем снижении пористости во всех типах пористых структур наблюдается рост предела текучести. Максимальное приращение предела текучести было достигнуто при пористости 0,1% и составило от 1 до 2% (рис. 3).

Поскольку данное исследование преследует прикладные цели, необходимо было промоделировать пористую структуру с таким диаметром пор, который возможно получить в лабораторных условиях. Поэтому диаметр пор был выбран равным 300 мкм. Были построены модели образцов с пористостью 0,1% и диаметром пор 300 мкм. Размер пористых образцов выбирался таким образом, чтобы по ширине располагалось минимум восемь пор. Поскольку в данном исследовании стояла задача приблизиться к геометрическим размерам образца по ГОСТ 11701-84 [14], то для моделирования испытаний с новыми условиями была выбрана квадратная пористая структура с порой в центре, так как данный тип является наиболее компактным из всех рассмотренных ранее. Параметры КЭМ пористого и компактного образцов указаны в табл. 1.

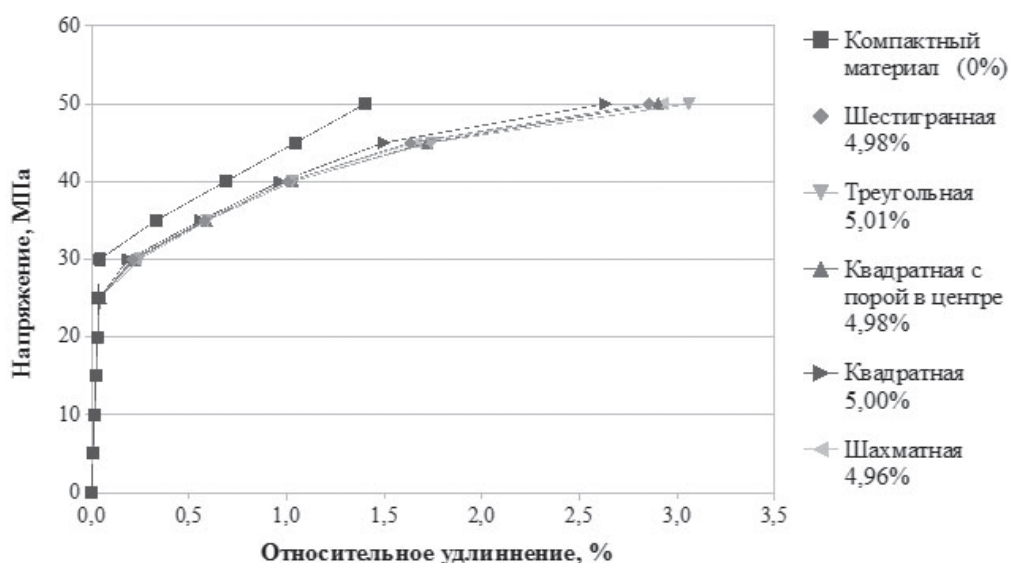


Рис. 2. Диаграммы растяжения КЭМ образцов с различным типом упорядоченной пористой структуры при пористости 5%

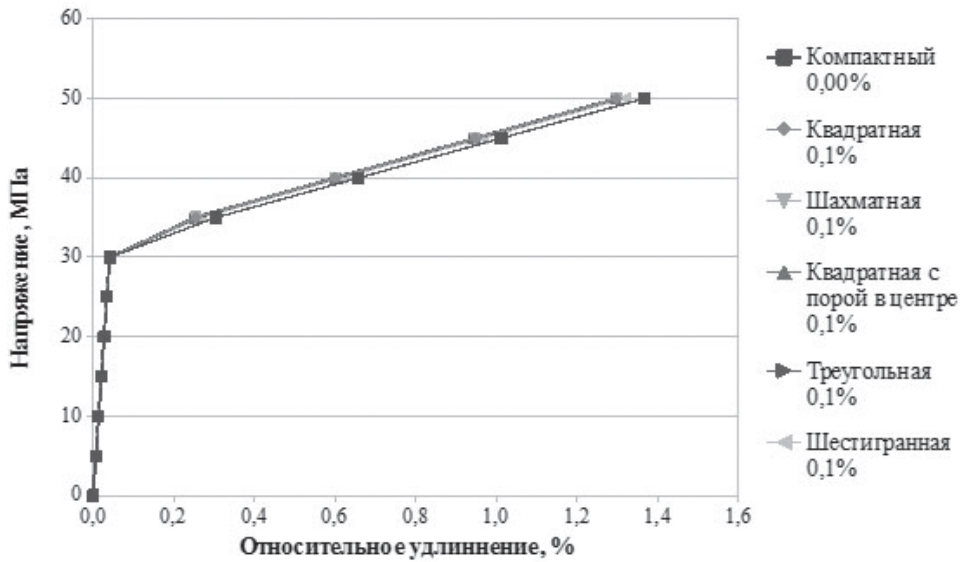


Рис. 3. Диаграммы растяжения КЭМ образцов с различным типом упорядоченной пористой структуры при пористости 0,1%

Таблица 1

Параметры КЭМ пористого и компактного образца

Параметры	Квадратная структура с порой в центре	Компактный материал
Пористость, %	0,1	—
Диаметр пор, мм	0,3	—
Размеры рабочей части образца, мм	130,38×52,15×0,65	172,10×52,15×0,65
Размеры образца, мм	172,10×52,15×0,650	172,10×52,15×0,65
Количество элементов пористого образца, шт.	8060	8040
Количество пор $n \times m$ , шт.	8×12	—

Диаграммы растяжения КЭМ образца с квадратной пористой структурой с порой в центре и КЭМ образца из компактного материала показаны на рис. 4.

Как видно из графика, в КЭМ с квадратной пористой структурой с порой в центре при пористости 0,1% наблюдается приращение предела теку-

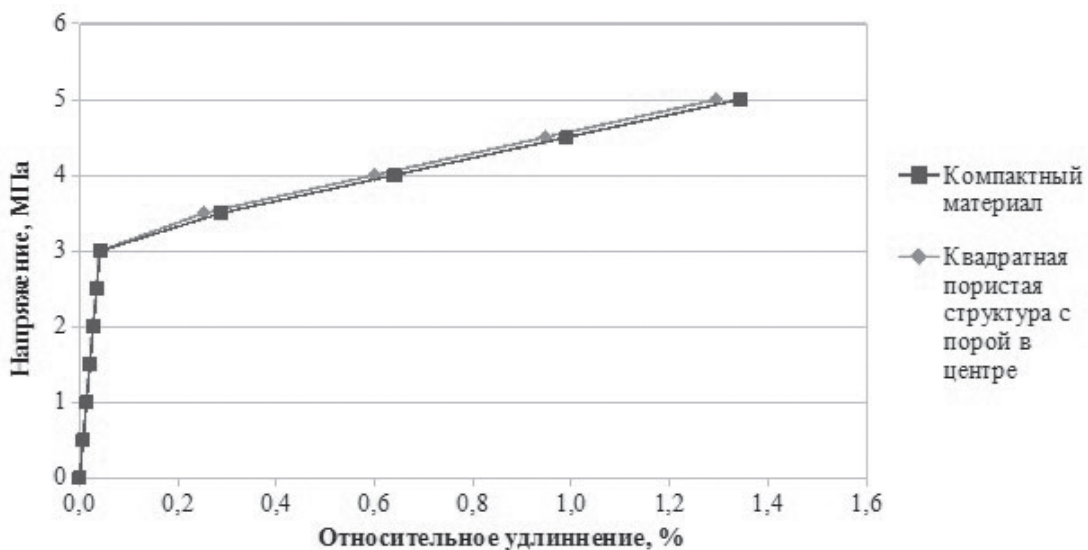


Рис. 4. Диаграммы растяжения КЭМ образцов при пористости 0,1%

чести на 2,062% по сравнению с компактным материалом.

Полученная на сплаве АД1М закономерность была проверена на более распространенном алюминиевом сплаве А5.

КЭМ образца с квадратной пористой структурой с порой в центре с пористостью 0,1% и КЭМ образца из компактного материала подвергались одноосному растяжению с усилием, вызывающими напряжение 60 МПа, что превышает предел текучести для сплава А5 (40 МПа), но не превышает его предел прочности (75 МПа). Конечным элементам задавались механические свойства сплава А5. Затем были получены диаграммы растяжения, которые позволяли оценить предел текучести модели пористого образца и сравнить его с пределом текучести образца из компактного материала аналогичного размера (рис. 5).

При анализе диаграмм растяжений (рис. 5) видно, что при изменении механических свойств материала КЭМ образца наблюдается сохранение предела текучести на уровне компактного материала.

### Проверка адекватности компьютерного исследования влияния пористой структуры на механические свойства материала. Получение натуральных образцов

Для проверки результатов моделирования требовалось изготовить натурные образцы с квадратной пористой структурой с порой в центре. Также требовалось изготовить образцы из компактного материала того же размера для фактического сравнения механических свойств (в частности, предела текучести) с механическими свойствами полученных пористых образцов.

Заготовки для всех образцов были вырезаны из листа алюминиевого сплава А5 на комплексе лазерной резки Bystronic Bystar 3015. В процессе резки по причине низкой температуры плавления алюминия и его высокой теплопроводности на краях вырезанных образцов образовались дефекты. При увеличении изображения края образцов обнаружены зоны плавления, которые образуют неровные края на гранях образца со стороны входа лазерного луча (рис. 6).

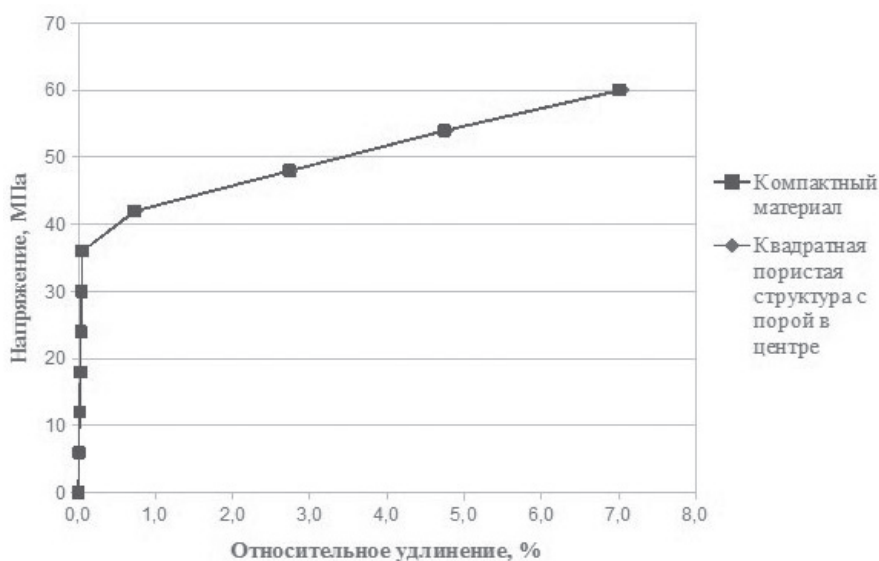


Рис. 5. Диаграммы растяжения КЭМ образцов из сплава А5 с габаритами 172×52×0,65 мм, при пористости 0,1%

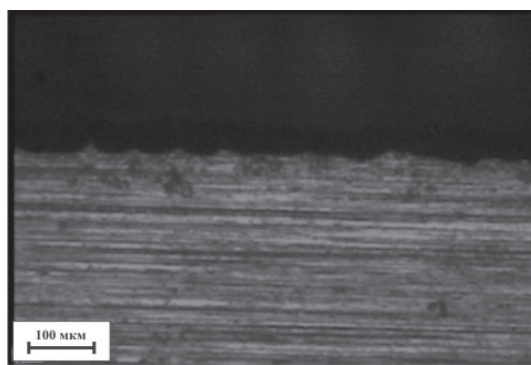
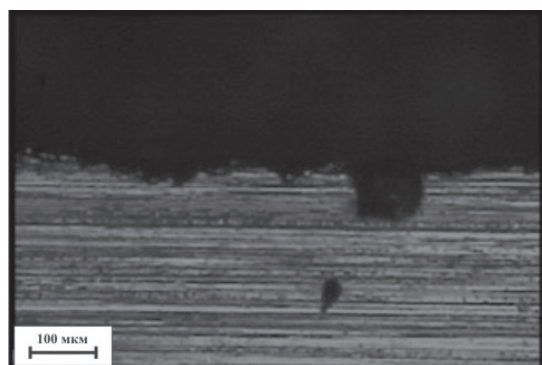


Рис. 6. Макроструктура на гранях вырезанных образцов со стороны входа лазерного луча

Со стороны выхода лазерного луча на образце присутствует значительное количество наплавленного металла (рис. 7).

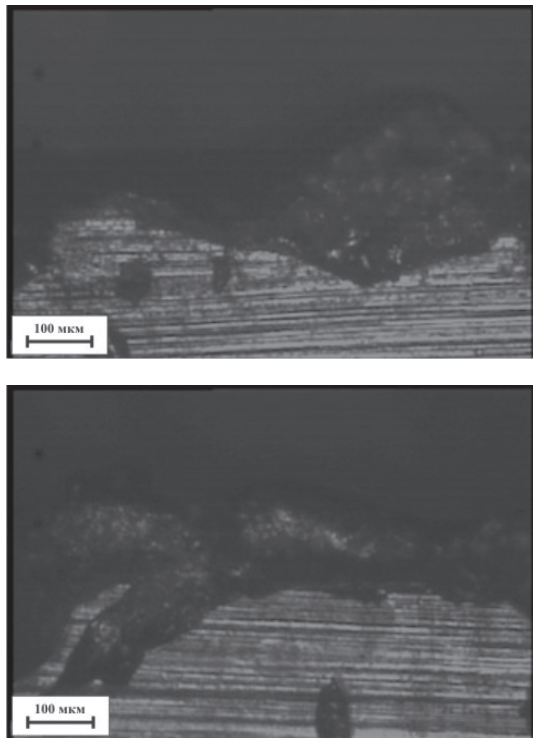


Рис. 7. Макроструктура на гранях вырезанных образцов со стороны выхода лазерного луча

С целью исключения влияния вышеуказанных дефектов на результаты натурных испытаний грани всех заготовок были обработаны абразивной бумагой с зернистостью Р 150, а затем с зернистостью Р 1000. В итоге заготовки приобрели вид, представленный на рис. 8.

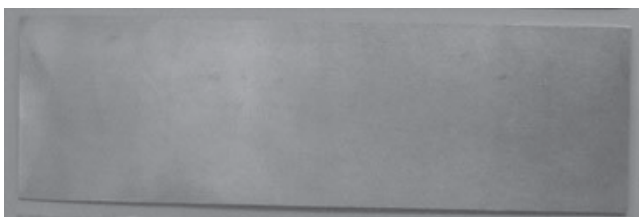


Рис. 8. Общий вид заготовок из компактного материала

При увеличении изображения края видна более однородная макроструктура металла на гранях образцов (рис. 9).

Все полученные заготовки были разделены на три части. Первая часть была оставлена без изменений в качестве образцов компактного материала.

Во второй части заготовок упорядоченная пористая структура была получена методом лазерного прожига. Общий вид полученных образцов представлен на рис. 10.

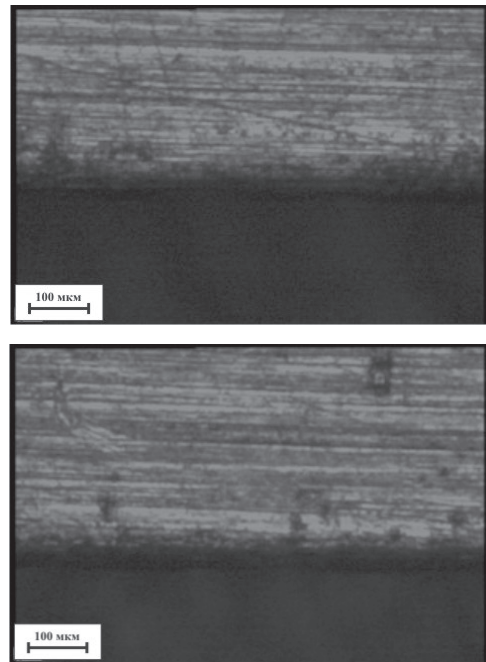


Рис. 9. Макроструктура на гранях образцов после обработки абразивной бумагой

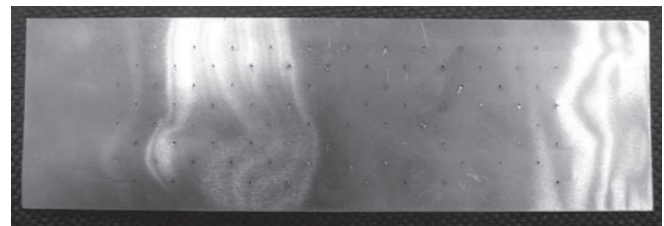


Рис. 10. Общий вид образцов, пористая структура в которых получена методом лазерного прожига

Получившиеся поры приобрели форму усеченного конуса с большим количеством наплавленного металла со стороны входа лазерного луча (рис. 11). Это связано с низкой температурой плавления алюминия и его высокой теплопроводностью.

Измерение геометрических параметров полученной пористой структуры выполнялось в программе анализа и обработки изображений Image Expert Pro 3 (табл. 2).

Таким образом, средний диаметр пор при данном способе получения упорядоченной пористой структуры составляет 340 мкм, что больше расчетного значения на 40 мкм. Однако при данном способе изготовления диаметры пор в образце находятся в очень широком диапазоне от 140 до 540 мкм, что говорит о значительной степени неоднородности свойств полученных образцов.

Фактическая пористость образца  $Q$  вычисляется по формуле

$$Q = \left( 1 - \frac{ab - nS_1}{ab} \right) \cdot 100\% \sim 0,128\%, \quad (1)$$

где  $a, b$  — длина и ширина рабочей части образца;

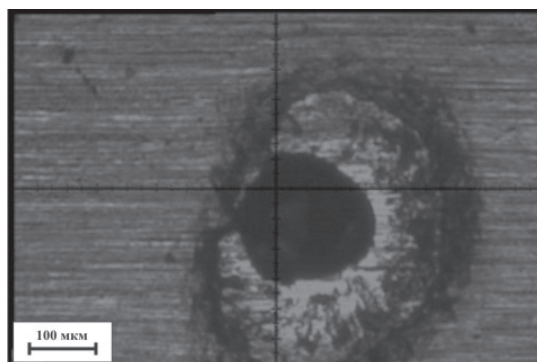
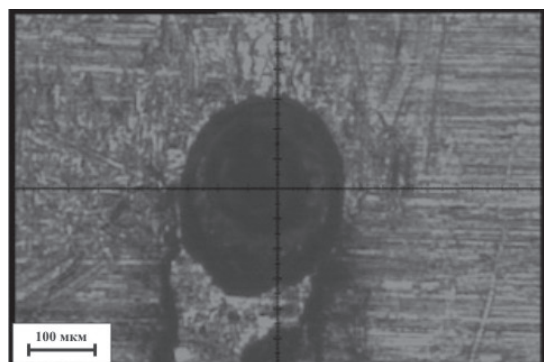


Рис. 11. Макроструктура пор, полученных путем лазерного прожига

Таблица 2

**Диаметры пор  $D$  в пористых образцах, полученных методом лазерного прожига**

№ п/п	$D$ , мкм	№ п/п	$D$ , мкм	№ п/п	$D$ , мкм
1	336,23	6	489,84	11	368,47
2	214,12	7	463,27	12	368,59
3	531,61	8	473,45	13	254,31
4	493,92	9	357,11	14	145,28
5	496,87	10	356,64	15	144,92
Средний диаметр пор, мкм					341,18

$S_1$  — средняя площадь одной поры;  $n$  — количество пор.

Полученная пористость образца составляет 0,128 %, что выше значения, полученного в ранее проведенных компьютерных исследованиях (0,1 %).

В оставшихся образцах пористая структура была получена на фрезерно-гравировальном станке с ЧПУ — PROXXON MF 70. Диаметр сверла составлял 300 мкм. Полученная пористая структура показана на рис. 12.



Рис. 12. Общий вид образца с упорядоченной пористой структурой, полученной методом механического сверления

При исследовании макроструктуры наблюдаются более ровные края пор, чем при лазерном прожиге (рис. 13).

Геометрические параметры в полученной пористой структуре также определялись в программе

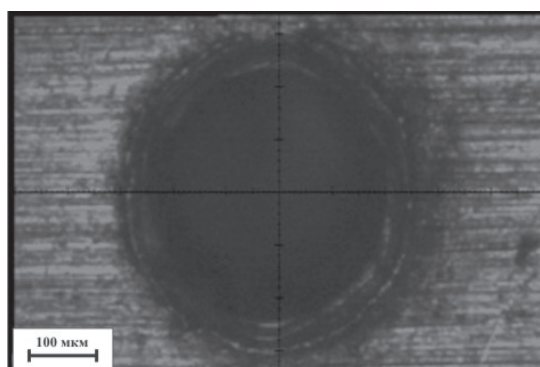
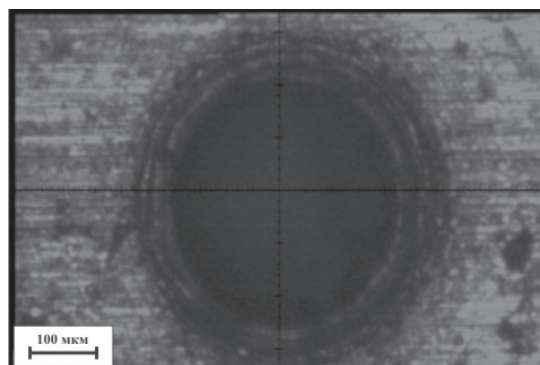


Рис. 13. Макроструктура пористых образцов, полученных механическим сверлением

анализа и обработки изображения Image Expert Pro 3 (табл. 3).

Средний размер пор при данном способе получения упорядоченной пористой структуры составил

Таблица 3

**Диаметры пор в пористых образцах, полученных методом механического сверления**

№ п/п	$D$ , мкм	№ п/п	$D$ , мкм	№ п/п	$D$ , мкм
1	389,43	6	395,33	11	387,90
2	402,13	7	398,47	12	397,58
3	399,02	8	402,33	13	405,94
4	400,75	9	406,29	14	400,18
5	404,21	10	402,30	15	407,27
Средний диаметр пор, мкм					399,94

ляет 400 мкм, что больше расчетного значения на 100 мкм. Это может объясняться наличием люфта в цанге патрона шпинделя, не абсолютно жестким креплением образца на рабочем столе станка, а также упругими свойствами обрабатываемого материала. Также следует отметить, что отклонение от фактического среднего значения составляет менее 13 мкм, что говорит о более стабильной пористой структуре, чем при лазерном прожиге. Фактическая пористость образца вычислялась по формуле (1) и составила 0,177%, что выше показателя, заложенного в модели (0,1 %).

**Проведение натурных испытаний на одноосное растяжение**

Образцы испытывались на растяжной машине с усилием 500 кгс. По результатам испытаний были построены диаграммы растяжения. Для корректного сравнения реальных испытаний на одноосное растяжение с виртуальными диаграммы растяжений были ограничены значением нагрузки, соответствующей напряжению, равному 60 МПа (рис. 14). Результаты испытаний приведены в табл. 4.

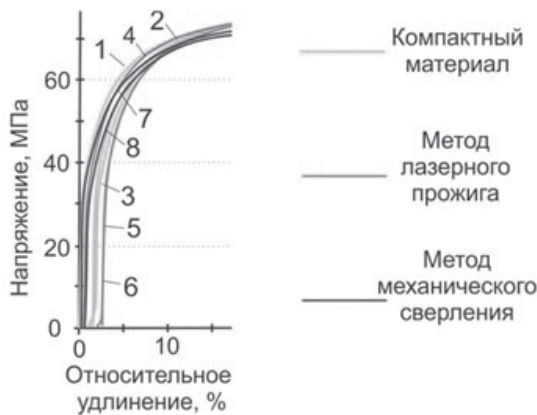


Рис. 14. Диаграммы растяжений натурных образцов, ограниченные по оси ординат до 60 МПа

По данным, представленным в табл. 4, наблюдается сходимость результатов конечно-элементного моделирования с результатами реальных испытаний на одноосное растяжение.

**Выводы**

1. Методом конечно-элементного моделирования установлено, что при пористости 5% и диаметре пор 10 мкм тип пористой структуры оказывает незначительное влияние (менее 1%) на предел текучести плоских пористых образцов.

2. Обнаружено, что при пористости 0,1% наблюдается приращение предела текучести КЭМ пористых образцов на 2% по сравнению с пределом текучести КЭМ образцов из компактного материала.

3. По результатам компьютерного моделирования установлено, что при замене марки алюминиевого сплава АД1М на А5 при пористости 0,1% предел текучести совпадает с пределом текучести компактного материала.

4. Выявлено, что при использовании метода лазерного прожига поры имеют форму усеченного конуса. Средний диаметр пор составляет 340 мкм. Отклонения от среднего значения достигают 200 мкм. При использовании метода механического сверления поры имеют более стабильную структуру, чем при лазерном прожиге. Средний диаметр цилиндрических пор составляет 400 мкм. Отклонения от среднего значения составляют менее 13 мкм.

5. По результатам натурных испытаний установлено совпадение предела текучести образцов с пористостью 0,1% с пределом текучести образцов из компактного материала аналогичного сплава.

6. Доказана возможность повышения удельных механических свойств, в частности предела текучести, технически чистого алюминия путем введения в его структуру упорядоченного расположения пор.

Таблица 4

**Результаты испытаний на одноосное растяжение КЭМ и натурных образцов**

Образец	№ на кривой	Реальные испытания		Виртуальные испытания	
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Компактный материал	1	39	4,52	37,90	7,01
	2	38	5,05		
	3	40	5,82		
Пористый материал, полученный лазерным прожигом	4	39	6,33	37,90	7,06
	5	39	6,74		
	6	38	6,74		
Пористый материал, полученный механическим сверлением	7	39	5,81	37,90	7,06
	8	38	6,20		



## Библиографический список

1. Щеглов Г.А., Луковкин Р.О. Анализ динамики пластически деформируемых опор посадочного устройства космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 63-72.
2. Калинин В.А., Андрушевич А.А. Вспененные пористые теплоизоляционные материалы на основе алюминия // Литье и металлургия. 2012. № 3 (66). С. 31-34.
3. Финкельштейн А.Б., Казанцев И.С., Юн И.А. Фильтрующие свойства пористого литого алюминия // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 8. С. 55-60.
4. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Идентификация моделей, определение и прогноз свойств высокопористых теплозащитных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 48-57.
5. Бондарь В.С., Темис Ю.М., Бирюков М.В. Определение механических свойств пеноалюминия при ударном нагружении // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. № 4 (22). Т. 4. С. 11-14.
6. Казанцев А.Г., Первухин Л.Б., Капустин Р.Д., Николаенко П.А., Смольянин С.С. Определение энергопоглощающей способности твердых огнеупорных ячеистых материалов (твёрдых пен) // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1. С. 28-32.
7. Zargarian A., Esfahanian M., Kadkhodapour J., Ziaei-Rad S. Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures // Materials Science and Engineering. 2016. С 60. Pp. 339-347.
8. Yuxia Sun, Yibin Ren, Ke Yang. New preparation method of micron porous copper through physical vacuum dealloying of Cu-Zn alloys // Materials Letters. 2016. No. 165. Pp. 1-4.
9. Хакадзима Хидео. Патент 2281980 РФ, МПК C22C1/08, H05B6/00. Способ получения пористого металлического тела. № 2004128246/02. Бюл. № 23, 20.08.06, 21 с.
10. Конов М.А., Хамизов Р.Х. Патент 2371498 РФ, МПК C22C1/08, C22C21/00. Микроструктурный конструкционный материал на основе алюминия или его сплавов. №2008123777/02. Бюл. № 30, 27.10.09, 17 с.
11. Золотухин А.Н. Численное моделирование свойств пористых металлов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1. № 7. С. 138-139.
12. Минаев А.А., Смирнов Е.Н., Лейрих И.В., Зуб В.В. Исследование и математическое моделирование формоизменения пор в непрерывно-литом металле при пластической деформации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 4. С. 47-52.
13. Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е. Оценка механических характеристик пористого материала на основе алюминиевого сплава АД1 с квадратным расположением пор с порой в центре // X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург. 16-20 мая 2016 г.: Сб. материалов. — Екатеринбург: ИМАШ, УрО РАН. 2016. — 385 с.
14. ГОСТ 11701 — 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. — Введ. 1986-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 15 с.

## OPTIMAL POROUS STRUCTURE DETERMINATION TO IMPROVE ALUMINUM ALLOY MECHANICAL PROPERTIES

Voronin S.V.\* , Loboda P.S.\*\* , Ledyayev M.E.\*\*\*

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

\* e-mail: voronin@ssau.ru

\*\* e-mail: stimulator90@mail.ru

\*\*\* e-mail: sillmarllion@mail.ru

## Abstract

Creating a competitive technology requires implementation of new materials with high specific mechanical properties. Conventionally, such materials are produced by introducing alloying elements, which form strengthening phases within the base metal structure. This approach usually results in the mass gain, because the hardening phase density is often higher than that of the base material. The mass of material can be reduced by introducing it into the volume of structural defects, such as pores. Due to high damping properties, low thermal conductivity, high sound-insulating ability

and good moisture resistance, the porous materials are widely used in industry [1-7]. With existing porous aluminum, manufacturing technologies its strength properties decline takes place. However, with porous structure ordering the strength properties of finished products improve [8-10].

Thus, the goal of the presented work consists in improving specific mechanical properties, yield strength in particular, of the material by introducing orderly arranged pores.

This study employed deformation processes finite element modeling with engineering analysis pack

MSC.Marc to determine an optimal porous structure [11-12].

The study of porosity and a type of porous structure effect on mechanical properties was carried out with the following types of porous structures: square, field-interleaved, square with a pore in its center, triangle and hexagonal.

With porosity of 0.4 to 0.5% porous samples FEM yield strength matching with compact material FEM samples yield strength is observed. With further porosity decrease growth of yield strength is observed for all types of porous structures. Maximum yield strength increase of 1 to 2% was achieved with porosity of 0.1%.

The blanks for all the samples were cut from the aluminum alloy A5 sheet using laser cutting complex. All the obtained blanks were decollated into three parts. The first part was left intact as a compact material sample. In the second part of the blanks, the ordered porous structure was obtained by laser burning. In the remaining samples, the porous structure was obtained with CNC milling and engraving machines with the drill diameter of 300  $\mu\text{m}$ .

The finite modelling and real uniaxial tensile tests results matching is observed.

**Keywords:** pore, porous structure, finite element method, modeling, specific mechanical properties, tensile testing, yield strength.

## References

1. Shcheglov G.A., Lukovkin R.O. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 63-72.
2. Kalinichenko V.A., Andrushevich A.A. *Lit'e i metallurgiya*, 2012, no. 3 (66), pp. 31-34.
3. Finkel'shtein A.B., Kazantsev I.S., Yun I.A. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2006, no. 8, pp. 55-60.
4. Alifanov O.M., Cherepanov V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 48-57.
5. Bondar' V.S., Temis Yu.M., Biryukov M.V. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2014, no. 4 (22), pp. 11-14.
6. Kazantsev A.G., Pervukhin L.B., Kapustin R.D., Nikolaenko P.A., Smol'yanin S.S. *Pis'ma o materialakh*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 28-32.
7. Zargarian A., Esfahanian M., Kadkhodapour J., Ziaei-Rad S. Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures. *Materials Science and Engineering*, 2016, no. 60, pp. 339-347.
8. Yuxia Sun, Yibin Ren, Ke Yang. New preparation method of micron porous copper through physical vacuum dealloying of Cu-Zn alloys. *Materials Letters*, 2016, no. 165, pp. 1-4.
9. Khakadzima Khideo. *Patent RU 2281980 C22C1/08 H05B6/00*, 20.08.2006.
10. Konov M.A., Khamizov R.Kh. *Patent RU 2371498 C22C1/08 C22C21/00*, 27.10.2009.
11. Zolotukhin A.N. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2011, vol. 1, no. 7, pp. 138-139.
12. Minaev A.A., Smirnov E.N., Leirikh I.V., Zub V.V. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2006, no. 4, pp. 47-52.
13. Voronin S.V., Loboda P.S., Ledyayev M.E. *Materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii "Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruksii"*, Ekaterinburg, 2016, p. 89.
14. *Metally. Metody ispytaniy na rastjazhenie tonkih listov i lent, GOST 11701 - 84* (Metals. Methods tensile tests of thin sheets and ribbons, State Standart 11701 - 84), Moscow, Standarty, 1993, 15 p.