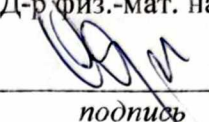


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физико-технический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
Руководитель ООП  
Д-р физ.-мат. наук, профессор

  
\_\_\_\_\_ В.А. Скрипняк  
подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА  
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-SI-MG

по направлению подготовки 15.04.03 Прикладная механика  
направленность (профиль) «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг»

Федотовской Яны Анатольевны

Руководитель ВКР  
доцент кафедры МДТТ к.ф.- м.н.  
  
\_\_\_\_\_ А.А. Козулин  
подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Автор работы  
студент группы № 102009  
  
\_\_\_\_\_ Я.А. Федотовская  
подпись

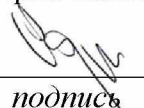
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физико-технический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

д-р. физ.-мат. наук, профессор

 В.А. Скрипняк  
подпись

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы магистра обучающемуся  
Федотовской Яне Анатольевне

по направлению подготовки направление подготовки 15.04.03 – Прикладная механика,  
направленность (профиль) «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг»

1 Тема выпускной квалификационной работы

Изучение влияния параметров дендритной структуры на свойства алюминиевого  
сплава системы Al-Si-Mg

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) в учебный офис / деканат – 05.06.2022 б) в ГЭК – 01.06.2022

3 Исходные данные к работе:

- |                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объект исследования –  | Количественный и качественный методы оценки микроструктуры алюминиевых дендритных сплавов.                                                                                                                                                                                                                   |
| Предмет исследования – | Алюминиевый сплав системы Al-Si-Mg, полученный гравитационным литьем и используемый для изготовления ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания, подверженных большим уровням термомеханических нагрузок при эксплуатации.                                                                        |
| Цель исследования –    | С использованием современных методов микроскопии и определением физико-механических свойств конструкционных материалов провести оценку влияния параметров структуры алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg, используемого в изготовлении ответственных деталей двигателестроения, на его прочностные свойства. |

Задачи:

1. Провести аналитический обзор опубликованных научных данных за последние 10 лет о изучении физико-механических свойств силуминовых алюминиевых сплавов и современных методах оценки структуры; анализ ранее проведенных экспериментов.
2. Составить план экспериментальных работ по оценке структуры силуминов и нахождению их физико-механических свойств. Ознакомиться с документами, регламентирующими порядок проведения экспериментов и интерпретации полученных результатов.
3. Провести эксперименты по оценке структуры исследуемых сплавов и физико-механических свойств образцов изготовленных из деталей двигателя внутреннего сгорания.

Методы исследования:

---

Рентгенофлуоресцентный анализ для определения элементного состава.

Рентгеноструктурный анализ.

Микроструктурный анализа сплава.

Методика растяжения плоских образцов из алюминиевого сплава АК9ч.

---

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа

Отрасль: машиностроение

---

#### 4 Краткое содержание работы

---

1. Аналитический обзор литературных данных

2. Методы исследования сплава.

3. Результаты экспериментальных исследований и их обработка

Руководитель выпускной квалификационной работы

к.ф.- м. н. , доцент кафедры МДТТ

(должность, место работы)

---

  
(подпись)

А.А. Козулин

(И.О. Фамилия)

---

Задание принял к исполнению

Студент группы 102009

(должность, место работы)

---

  
(подпись)

Я.А. Федотовская

(И.О. Фамилия)

---

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа представлена на 61 странице с 35 иллюстрациями, 10 таблицами и 30 литературными источниками, приложений нет.

Были поставлены задачи для выявления зависимости физико-механических свойств от микроструктурных особенностей алюминиевых сплавов с дендритной эвтектической структурой. Для решения этих задач был проведен аналитический обзор, установлено, что для количественной оценки микроструктуры дендритных сплавов эвтектического строения больше всего подходит параметр SDAS. Проведены испытания на одноосное растяжение, микроструктурные исследования материала, проанализированы результаты и установлены закономерности.

## ABSTRACT

The final qualifying work is presented on 61 pages with 35 illustrations, 10 tables and 30 literary sources, there are no appendices.

Tasks were set to identify the dependence of physical and mechanical properties on the microstructural features of aluminum alloys with a dendritic eutectic structure. To solve these problems, an analytical review was carried out, it was found that the SDAS parameter is most suitable for quantifying the microstructure of dendritic alloys of eutectic structure. Tests for uniaxial tension, microstructural studies of the material were carried out, the results were analyzed and patterns were established.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                | 4  |
| 1 Аналитический обзор.....                                                                                    | 6  |
| 1.1 Силумины .....                                                                                            | 6  |
| 1.2 Измерение параметра расстояния между вторичными осями дендритов .....                                     | 14 |
| 1.2 Алгоритмам оценки параметров расстояния между вторичными осями дендритов (SDAS).....                      | 24 |
| 2 Методы исследований .....                                                                                   | 34 |
| 1.3 Рентгенофлуоресцентный анализ для определения элементного состава .....                                   | 34 |
| 1.4 Рентгеноструктурный анализ.....                                                                           | 34 |
| 2.1 Методы микроструктурного анализа сплава .....                                                             | 35 |
| 2.2 Методика растяжения плоских образцов из алюминиевого сплава АК9ч .....                                    | 35 |
| 2.2 Образцы для испытаний на одноосное растяжение.....                                                        | 37 |
| 3 Результаты экспериментальных исследований и их обработка.....                                               | 39 |
| 3.1 Результаты рентгенофлуоресцентного анализа.....                                                           | 39 |
| 3.2 Результаты рентгеноструктурного анализа.....                                                              | 40 |
| 3.3 Результаты изучения структуры исследуемого сплава.....                                                    | 43 |
| 3.4 Изучение механических свойств образцов из материала изделия после испытаний на одноосное растяжение ..... | 51 |
| 3.5 Влияние режимов литья на формирование структуры.....                                                      | 54 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                              | 57 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                                                                        | 59 |

## ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые при изготовлении ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания, часто подвергаются критическим термомеханическим усилиям. При этом к материалу изделий предъявляются высокие требования с позиции прочности, долговечности, коррозионной стойкости при относительно малом весе. Поэтому производители подобных деталей делают выбор в пользу алюминиевых сплавов благодаря их хорошей теплопроводности (лучшее охлаждение двигателя), хорошей текучести (выполнение детали в литье), простоте механической обработки и малом весе.

Алюминиевый сплав высокой чистоты АК9ч относится к категории высокопрочных силуминов системы Al-Si. Материал имеет около 8-10 % кремния, 0,2-0,5 % магния в своем составе и небольшое количество примесей (в пределах 1,5 %). Используют данный материал для производства методом литья всевозможных деталей, работающих в условиях больших и средних нагрузок.

Установлено, что физико-механические свойства литых алюминиевых сплавов сильно зависят от микроструктурных параметров; существует множество исследований, изучающих эти зависимости. Приобретение определенных механических свойств также зависит от используемого метода литья.

Зачастую литые алюминиевые сплавы имеют не равноосные зерна, а сложную дендритную структуру с преобладанием эвтектики. В этом случае количественная оценка структуры классическими методами секущих не представляет возможности. Поэтому разрабатываются альтернативные методы исследований. Для материалов с дендритной структурой расстояние между вторичными дендритными осями можно оценивать по параметру SDAS (secondary dendrite arm spacing). Значения этого параметра характеризуются как микроструктурная особенность, аналогичная размеру зерен в деформируемых структурах. Данный параметр оценки чаще всего встречается

в зарубежной научной литературе и используется как регламентирующий параметр в конструкторской документации западных промышленных предприятий, работающих с литейными сплавами.

В отечественных источниках научной литературы определение «дендритное плечо» (прямой перевод - dendrite arm spacing) встречается крайне редко. В промышленности этот параметр также не используется. Однако ссылаясь на опыт зарубежных исследователей отмечается зависимость физико-механических и некоторых функциональных свойств от параметра SDAS, а также существуют указания на необходимость учитывать данный параметр при аттестации реальных промышленных конструкций, деталей ответственных механизмов и использовать при создании проектной документации.

Целью представленного исследования явилось установление зависимостей физико-механических свойств от микроструктурных особенностей алюминиевых сплавов системы  $AlSi7Mg0.4$  с дендритной эвтектической структурой.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

- на основе аналитического обзора научной литературы и изученного опыта промышленных предприятий обосновать необходимость использования параметра SDAS для количественной оценки дендритных структур литейных алюминиевых сплавов;
- провести исследование влияния структуры на физико-механические свойства и характер разрушения литейных алюминиевых сплавов с дендритной структурой;
- установить особенности кристаллизации и влияние режимов литья на специфику формирования структуры литейных алюминиевых сплавов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе аналитического обзора современной научной литературы и регламентирующих документов некоторых промышленных предприятий установлено, что для количественной оценки микроструктуры дендритных сплавов эвтектического строения больше всего подходит параметр SDAS (secondary dendrite arm spacing) – расстояние между осями вторичных дендритов. Проведен анализ пяти методов оценки SDAS. Установлено, что каждый метод подходящим образом характеризует изменение дендритной структуры при повышении скорости кристаллизации. Однако промышленности и науке рекомендуется применять метод D для измерений SDAS.

Установлено, что параметр SDAS влияет на физико-механические свойства алюминиевых сплавов и характер разрушения. Чем выше параметр, тем ниже прочностные свойства. Существующие экспериментальные данные и собственные исследования позволяют делать проверять качество изготовления изделий и теоретические оценки структуры и свойств сплавов непосредственно на стадии планирования производства или экспериментов по литью.

Эксперименты по одноосному растяжению образцов из алюминиевого сплава системы  $AlSi7Mg0.4$  с различными значениями SDAS показали, что условный предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение в сплаве монотонно увеличивается вместе с уменьшением значений этого параметра.

Микроструктурные исследования показали, что области отливок с наибольшим параметром SDAS при изготовлении прилегают к песчаным стенкам литейных форм, имеющим низкую теплопроводность – это сказывается на понижении скорости кристаллизации. И, наоборот, в областях отливок, прилегающих к стальным стенкам литейных скорость теплоотвода

выше, тем самым выше скорость кристаллизации и ниже значение параметра SDAS.

Микроструктурные исследования образцов с наведенной трещиной при цикловом нагружении, показали разницу в механизме роста трещин в материалах с разным параметром SDAS. В обоих случаях разрушение начинается в момент разрушения хрупких частиц кремния в пластичной матрице и коалисценции микротрещин от них в магистральную трещину. Однако, в материале с низкими значениями параметра развитию трещины активно препятствуют дендритные ячейки. В этом случае трещина растет по границам вторичных дендритов по межкристаллитному сценарию. В образцах с большими параметрами SDAS трещина зарождается и растет, преимущественно, в области эвтектики и распространяется по транскристаллитному сценарию, легко разгоняясь и перерезая встречающиеся на пути оси вторичных и первичных дендритов, в этом случае тратится меньше, чем при межкристаллитном разрушении.

Установлено, что на формирование дендритной структуры и параметр SDAS, кроме скорости кристаллизации, зависящей от материала литейной формы соприкасающейся с поверхностью отливки, влияет способ литья. Для этого получены отливки методом гравитационного литья и литья под давлением и обработкой Т6 в обоих случаях. В материале оливок, полученных гравитационным литьем, структура представлена дендритным строением с зернистой эвтектикой, кремний в эвтектике выделен в глобулярные частицы одинаковых размеров. Материал отливок, полученных литьем под давлением, представлен дендритной структурой с игольчатой структурой эвтектики, где кремний выделен в образования в виде иголок. Параметр SDAS сплава, полученного гравитационным литьем меньше, чем у сплава, полученного под давлением 21 и 42 мкм соответственно.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. – М., 18.06.2003. – 31 с.
- 2 ГОСТ 16865-79. Аппаратура для рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализов. – М., 27.08.2007. – 11 с.
- 3 ГОСТ 1497-84. (ИСО 6892-84) Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М., 2008. – 26 с.
4. Пригунова, А.Г. Силумины. Атлас микроструктур и фрактограмм промышленных сплавов: справ. изд. / А.Г. Пригунова, Н.А. Белов, Ю.Н. Таран / под ред. Ю.Н. Тарана, В.С. Золотаревского. – М.: МИСиС, 1996. – 175 с. – ISBN-5-87623-034-0
5. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 346 с.
7. Воздвиженский, В.М. Сплавы цветных металлов для авиационной техники: учеб. пособ. / В.М. Воздвиженский, А.А. Жуков, А.Д. Постнова, М.В. Воздвиженская / под общ. ред. В.М. Воздвиженского. – Рыбинск: РГТА, 2002. – 219 с. – ISBN-5-88435-107-0.
8. W. Callister, Materials Science and Engineering: an Introduction, 8th edn. (Wiley, Hoboken, NJ, 2010)
9. ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (ASTM International, West Conshohocken, 2013)
10. J. Gruzleski, Microstructure Development During Metalcasting (American Foundrymen's Society Inc, Des Plaines, 2000)
11. Y. Shi, Q. Xu, R. Chen, B. Liu, Q. Wu, H. Yang, A microstructure-strength calculation model for predicting tensile strength of AlSi7Mg alloy castings. In 2nd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering, Somerset, 2013

12. D. Argo, R. Drew, J. Gruzleski, A simple electrical conductivity technique for measurement of modification and dendrite arm spacing in Al–Si alloys. *AFS Trans.* 95, 455–464 (1987)
13. Wang, Q.G. Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. *Metall Mater Trans A* 34, 2887–2899 (2003).
14. Zhang, S., Xu, Z., & Wang, Z. (2017). Numerical modeling and simulation of water cooling-controlled solidification for aluminum alloy investment casting // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 763-770.
15. Feurer U, Wunderlin K (1977) *Proceedings of the Conference on Solidification and Casting of Metals*, Sheffield
16. G. Sigworth, *Fundamentals of solidification in aluminum castings*. *Int. J. Metalcast*.
17. S. Boontein, N. Srisukhumbovornchai, J. Kajornchaiyakul, C. Limmaneevichitr, Reduction in secondary dendrite arm spacing in cast aluminium alloy A356 by Sb addition. *Int. J. Cast Met. Res.* 24(2), 108–112 (2011)
18. M. Kabir, E. Ashrafi, T. Minhaj, M. Islam, Effect of foundry variables on the casting quality of as-cast LM25 aluminium alloy. *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 3(6), 2249–8958 (2014)
19. D. Hanumantha Rao, G. Tagore, G. Ranga Janardhana, Evolution of artificial neural network (ANN) model for predicting secondary dendrite arm spacing in aluminium alloy casting. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 32(3), 276–281 (2010)
20. Y. Zou, Z. Xu, J. Zeng, Effect of SDAS on homogenization of Al–Si–Mg casting alloys. *Adv. Mater. Res.* 97–101, 1041–1044 (2010)
21. M. Easton, C. Davidson, D. St John, Grain morphology of as-cast wrought aluminium alloys. *Mater. Trans.* 52(5), 842–847 (2011)
22. A. Mullis, L. Farrell, R. Cochrane, N. Adkins, Estimation of cooling rates during close-coupled gas atomization using secondary dendrite arm spacing measurement. *Metall. Mater. Trans. B* 44B, 992–999 (2013)

23. M. Zeren, Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al–Cu–Si–Mg alloys. *J. Mater. Process. Technol.* 169, 292–298 (2005)
24. R. Pierer, C. Bernhard, On the influence of carbon on secondary dendrite arm spacing in steel. *J. Mater. Sci.* 43, 6938–6943 (2008)
25. X. Hu, H. Yan, W. Chen, S. Li, H. Fu, Effect of sample diameter on primary and secondary dendrite arm spacings during directional solidification of Pb-26 wt% Bi hypo-peritectic alloy. *Rare Met.* 30(4), 424–431 (2011)
26. B. Ait El Haj, A. Bouayad, M. Alami, Effect of mould temperature and melt treatment on properties of an AlSi9 cast alloy: thermal and microstructural investigations. *Int. Lett. Chem. Phys. Astron* 55, 12–18 (2015)
27. Vandersluis, E., Ravindran, C. Comparison of Measurement Methods for Secondary Dendrite Arm Spacing. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 6, 89–94 (2017).
28. E. Vandersluis, Influence of Solidification Parameters on the Thermal Conductivity of Cast A319 Aluminum Alloy (Ryerson University, Toronto, 2016)
29. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М., 23.08.2018. – 7 с.
30. Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К. Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – 256 с.

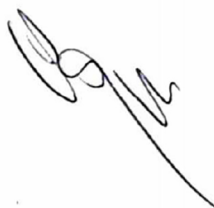
**Заключение**  
**руководителя ООП 15.04.03 Прикладная механика**  
профиль «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг»

Руководствуясь п.3.2 и п. 3.4 «Регламента размещения текстов выпускных квалификационных работ в электронной библиотеке НИ ТГУ» (Приказ ректора №301/ОД от 22.04.2016) выпускную квалификационную работу магистранта (магистерскую диссертацию) Федотовской Яны Анатольевны: «Изучение влияния параметров дендритной структуры на свойства алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg» следует разместить в депозитарий НБ НИ ТГУ с изъятием разделов: *1, 2, 3*

04.06.2022 г.

Руководитель ООП  
зав. кафедрой механики  
деформируемого твердого тела,  
д.ф.-м.н., профессор

моб. тел. +7 9039140028



В.А. Скрипняк

Поиск заимствований в научных текстах<sup>β</sup>[\(/index.php/ru/\)](/index.php/ru/) [\(/index.php/en/\)](/index.php/en/)

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации:

2022

Выберите коллекции

Все

Рефераты

Авторефераты

Иностранные конференции

PubMed

Википедия

Российские конференции

Иностранные журналы

Российские журналы

Энциклопедии

Англоязычная википедия

Анализировать

Проверить по расширенному списку коллекций системы Руконтекст (<http://text.rucont.ru/like>)

Обработан файл:

Диссертация .pdf.

Год публикации: 2022.

Оценка оригинальности документа - 99.35%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 0.65%

Просмотр заимствований в документе

Время выполнения: 31 с.

Документы из базы

Источники заимствования

**1. Реферат: Стрoение металлов (<http://www.bestreferat.ru/files/60/bestreferat-381660.docx>)**

Год публикации: 2016. Тип публикации: реферат.

<http://www.bestreferat.ru/files/60/bestreferat-381660.docx><http://www.bestreferat.ru/files/60/bestreferat-381660.docx>[Показать заимствования \(3\)](#)[Значимые оригинальные фрагменты](#)[Библиографические ссылки](#)[Искать в Интернете](#)В списке  
литературыИсточники  
Заимствования

0.65%

Дополнительно

Научный руководитель  А.А. КозулинРуководитель ООП  В.А. Скрипняк