

Конкурсная работа

для участия в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2021 года в номинации «За создание новой технологии»

Повышение экономичности и надежности летательных аппаратов неразрывно связано с возможностью уменьшения массы конструкции при сохранении прочностных характеристик. Решение проблем в этом направлении связывают с разработкой новых видов облегченных конструкций.

Деталь из ячеистого материала — это новый элемент, обеспечивающий высокую удельную прочность конструкции в сочетании с низкой плотностью.

Актуальной задачей является разработка и получение ячеистой структуры с оптимальными геометрическими параметрами для обеспечения максимальной технологичности конструкции.

Отливки с регулируемой ячеистой структурой изготавливаются с помощью технологии прямого лазерного спекания металлического порошка, преимущества которой — обеспечение более высокой точности и пористости изделия, изготовление деталей сложной геометрии с тонкими стенками (менее 2 мм). Основной недостаток — невозможность получения монолитного изделия, ввиду чего не удается обеспечить прочностные характеристики, соответствующие литым экземплярам и высокая стоимость.

Внедрение в производство новых гибридных технологий (аддитивные и литейные) позволяет выполнить эту задачу.

Технология заключается в создании выжигаемой пластиковой модели с помощью FDM-печати и последующей заливкой гипсовой формы расплавленным металлом с помощью вакуумного всасывания с затвердеванием под давлением в специальной заливочной камере.

С помощью литья с использованием выжигаемой пластиковой модели получается материал с заданной регулируемой ячеистой структурой металлического изделия с заданной прочностью и жесткостью. Литой материал обеспечит увеличенный срок эксплуатации, повышение надежности, удельной прочности и энергетической эффективности детали. Кроме того, себестоимость продукции значительно снижается.

При заполнении полости протяженной тонкостенной литейной формы важнейшим фактором, обеспечивающим получение годной отливки, является ее заполняемость, т. е. воспроизведение внутренней полости литейной формы, которая определяется необходимым и достаточным охлаждением фронта потока в течение всего процесса заливки. Охлаждение фронта потока является функцией скорости заполнения, режима заполнения, свойств материала поверхности формы и геометрии полости формы.

Для выбора оптимальной скорости заполнения необходимо знать, как влияют на охлаждение фронта потока ранее перечисленные факторы.

Гипсовые и керамические формы обладают сравнительно низкой теплопроводностью и достаточной газопроницаемостью, что позволяет получить тонкостенные (толщиной до 3 мм) отливки сложной конфигурации. Литье в гипсовые или керамические формы обеспечивает высокую точность и чистоту поверхности, удаления материала формы из готовой отливки.

Разработана математическая модель (1) заполняемости полости гипсовой формы.

$$Y = \frac{c\rho l_0}{\alpha} \omega \left(1 + \frac{b_M}{b_\Phi}\right) \ln \frac{T_{\text{зеп}} - T_{\Phi H}}{T_l - T_{\Phi H}}, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость жидкого металла, Дж/(кг·К); ρ — плотность жидкого металла, кг/м³; l_0 — приведенный размер струи, м; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; ω — средняя скорость течения металла, м/с; b_Φ и b_M — теплоаккумулирующие способности

формы и металла соответственно, $\text{Вт}\cdot\text{с}^{1/2}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; $T_{\text{зал}}$ – температура заливки сплава; $T_{\text{л}}$ – температура ликвидуса сплава; $T_{\text{фн}}$ – начальная температура формы.

Для оценки адекватности полученного теоретического решения была проведена экспериментальная проверка, по результатам которой определены коэффициенты теплоотдачи при течении расплава по каналам литейной формы.

Для определения коэффициентов теплоотдачи применялся метод натянутой термопары. Заливка проводилась в специальные гипсовые формы. Скорость заполнения полости формы регулировалась мерным отверстием в чаше (диаметр 4 мм; 6 мм; 8 мм; и 10 мм) и варьировалась в интервале (0,02 – 0,13) м/с. Формы перед прокалкой просушивались на воздухе при температуре (20 – 25) °С в течение суток, затем прокачивались при температуре (200 – 250) °С в течение (20 – 24) часов. Температура заливки металла - 677 °С, что на 80 °С выше $T_{\text{л}}$. Для измерения температуры фронта потока применялся метод натянутой термопары.

Результаты экспериментов и расчетов для нижнего подвода расплава приведены в таблице 1.

Таблица 1

| № опыта | Напор, H , м | Диаметр отверстия, $d_{\text{отв}}$, м | Скорость, ω , м/с | Коэффициент теплоотдачи, α , $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ | $\text{Nu}_{\delta\text{ж}}$ | $\text{Re}_{\delta\text{ж}}$ |
|---------|----------------|---|--------------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0,07 | 0,004 | 0,022 | 8316 | 0,2 | 1,5 |
| 2 | 0,07 | 0,006 | 0,05 | 8999,6 | 0,22 | 3,4 |
| 3 | 0,07 | 0,008 | 0,09 | 10308,6 | 0,25 | 6,2 |
| 4 | 0,07 | 0,01 | 0,13 | 12284,4 | 0,3 | 9,0 |

На основании обобщения полученных экспериментальных данных с помощью пакета прикладных программ «Statistica 6.0» было получено новое уравнение подобия, зависимость $\text{Nu}-\text{Re}$ для нижнего подвода металла:

$$\text{Nu}_{\delta\text{ж}} = 0,173 \cdot \text{Re}_{\delta\text{ж}}^{0,23}, \quad \text{Re}_{\delta\text{ж}} \leq 10, \quad R = 0,95 \quad (2)$$

Графики сравнения расчетных и экспериментальных значений параметров представлены на рисунке 1

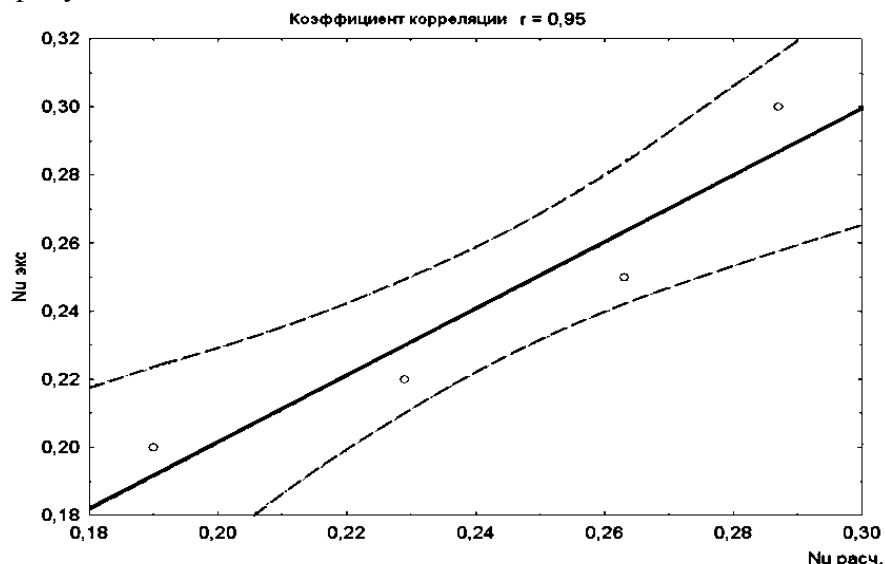


Рисунок 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений чисел Нуссельта

Анализ полученных данных показывает, что предложенное уравнение подобия значительно и вполне адекватно описывает процесс теплообмена между фронтом потока металла и поверхностью формы, поэтому математическая модель может быть рекомендована для описания процесса заполнения полости гипсовых и керамических форм при нижнем подводе металла для определения значений температуры фронта потока.

Разработанная математическая модель может применяться в условиях литья в керамические и гипсовые формы и позволяет определить размеры литниковой системы.

Для определения коэффициентов теплоотдачи и заполняемости тонких стенок толщиной 2 и 4 мм алюминиевым сплавом АК12 [3] проводились расчеты заполняемости песчано-гипсовой формы при $T_{фн} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{фн} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты моделирования показали, что нагрев гипсовой формы до температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличило заполняемость пластинчатой полости толщиной 2 мм на 28,5 %.

Численные значения полученных расчетных и экспериментальных данных сведены в таблице 2.

Таблица 2

| Сплав | Температура заливки, $T_{зал},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Начальная температура песчано-гипсовой формы, $T_{фн},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Толщина пластин, $\delta,\text{ мм}$ | Высота заполненных полостей отливки пластинчатого типа, $Y,\text{ мм}$ | |
|-------|---|---|--------------------------------------|--|-----------|
| | | | | Экспериментальная | Расчетная |
| АК12 | 677 | 20 | 2 | 63,251 | 62 |
| | | | 4 | 212,798 | 210 |
| | | 200 | 2 | 88,402 | 87 |
| | | | 4 | 293,922 | 297 |

Анализ полученных данных показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений высоты заполненных полостей отливки пластинчатого типа и доказывает адекватность полученных теоретических решений.

Моделирование процесса заполнения и затвердевания отливок в программном комплексе «LVM Flow 3D» с использованием экспериментальных результатов позволило адекватно оценить заполняемость полости отливки пластинчатого типа толщиной 2 мм в песчано-гипсовой форме, прокаленной до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в вакуумной среде с разрежением от 0,2 атм до 2,0 атм.

Результаты моделирования процесса заполнения отливки под низким давлением сведены в таблице 3.

Таблица 3

| Сплав | Температура заливки, $t,\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Начальная температура песчано-гипсовой формы, $T_{фн},\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Толщина пластины, $\delta,\text{ мм}$ | Разрежение, атм | Высота заполненной полости отливки пластинчатого типа, $Y,\text{ мм}$ |
|-------|---|---|---------------------------------------|-----------------|---|
| АК12 | 677 | 200 | 2 | 0,2 | 97,24 |
| | | | | 0,4 | 106,08 |
| | | | | 0,7 | 113,21 |
| | | | | 0,9 | 132,60 |
| | | | | 2,0 | 300,0 |

Ход заполнения полостей отливки пластинчатого типа представлен на рисунке 2.

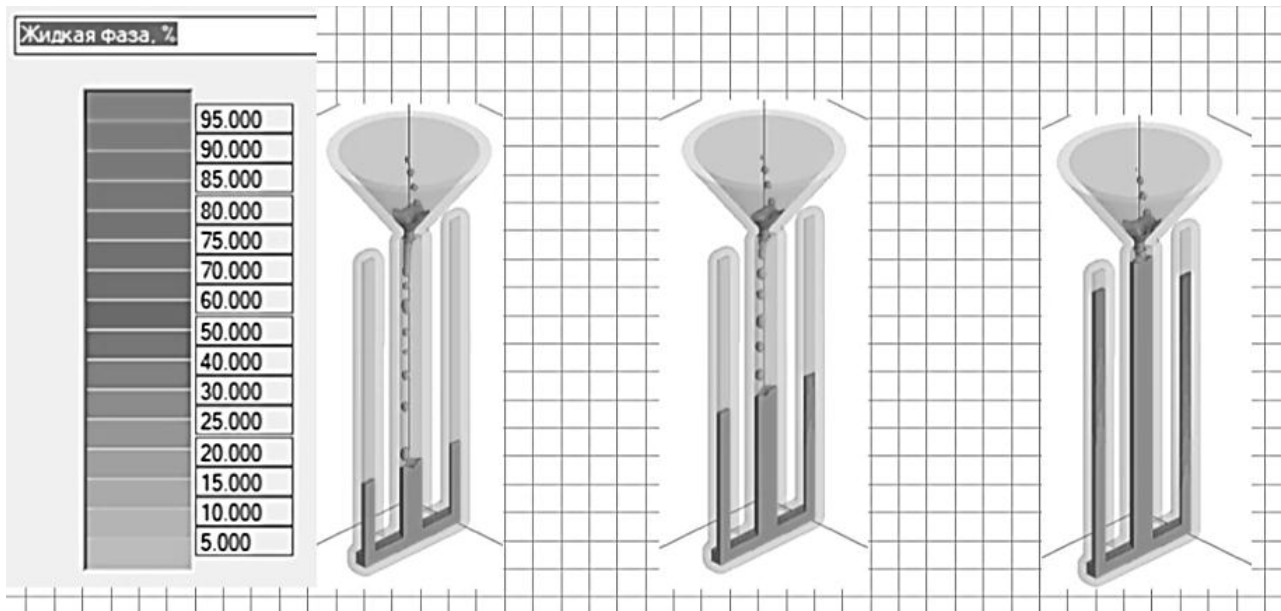


Рисунок 2 – Заполнение полостей отливки пластинчатого типа

Управление гидродинамическими параметрами течения металла позволяет заполнить форму с минимальными потерями теплоты, что особенно важно для сложных тонкостенных крупногабаритных отливок. Заполняемость форм возрастает в 1,3 — 1,5 раза.

Результаты моделирования показали, что литье под низким давлением с разрежением 2,0 атм в нагретую до температуры 200 °С песчано-гипсовую форму полностью заполнило пластинчатую полость толщиной 2 мм.

Учитывая рассчитанные геометрические параметры для отливок из алюминиевого сплава марки АК7, разработана гексагональная ячеистая структура для детали «Кронштейн», изготавливаемой с помощью литья по выплавляемым моделям с применением специальных условий заливки. Заготовка имеет пористую структуру 40%.

На основании полученных теоретических решений опробован технологический процесс получения отливок по выплавляемым моделям литьем в гипсовые формы с применением PLA-пластика (рисунок 3).



Рисунок 3 – Процесс изготовления детали «Кронштейн»

Результаты статического расчета модели на прочность удовлетворяют требованиям к изготавливаемой заготовке.

Коммерческий продукт - технологический процесс изготовления облегченных деталей из пористого алюминия с управляемой переменной плотностью пор, обеспечивающей оптимальные распределенные механические свойства детали.

Реализация проекта позволяет снизить материалоемкость выпускаемой продукции 32 % за счет:

1. Комплексного извлечения сырья. За счет переработки вторичного сырья осуществляется повторное использование и возвращение в оборот материалов, которые после первоначального использования могут применяться повторно в производстве как исходное сырье, что позволяет сократить объемы добычи руды, необходимой для производства, требующие огромных сырьевых затрат. Комплексное извлечение сырья обеспечивает не только увеличение объема и ассортимента продукции, снижение её материальных затрат и сокращение затрат на создание сырьевых баз, предупреждает загрязнение окружающей среды, но и повышение рентабельности производства.

2. Использования современных технологий и внедрения в производство современного оборудования. Переход на гибридную технологию позволяет использовать сравнительно недорогое оборудование, что значительно снизит накладные расходы (на 3318 р. на 1 кг изготавливаемой продукции).

Все эти меры позволят повысить объемы изготовленной продукции за счет снижения затрат рабочего времени на единицу изготовленной продукции. Снижение трудоемкости на 18% увеличивает производительность труда, что непосредственно влияет на повышение эффективности производства.

Производительность труда повышается за счет следующих факторов:

1. Автоматизация производства, модернизация уже имеющейся техники, улучшение качества сырья.

2. Изменение организации производства и труда, перемена специализации деятельности, улучшение управления производством, уменьшение потерь рабочего времени, уменьшение объема брака и отклонений.

3. Изменение масштабов производства, снижение численности сотрудников за счет использования роботизированной техники и современных программных продуктов.

Снижение материалоемкости и трудоемкости, повышение производительности труда означает получение большего количества выпускаемой продукции из тех же материальных ресурсов, что приводит к снижению себестоимости продукции и затрат на развитие сырьевой отрасли. Выпускаемая отечественная продукция сможет успешно конкурировать с мировыми аналогами (см. рис. 4).

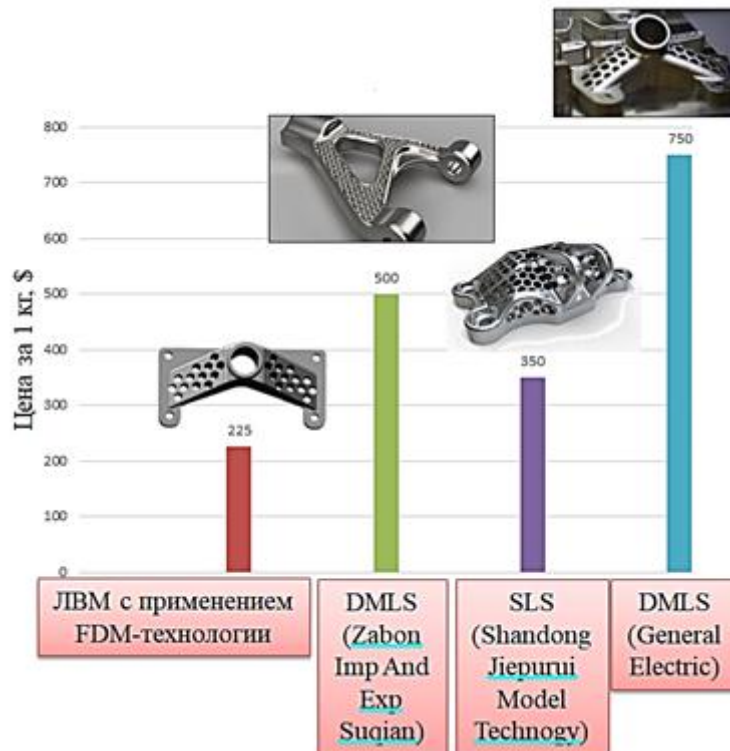


Рисунок 4 – Сравнение цен с мировыми аналогами

Цели реализуемого проекта совпадают с целями национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости», разработанного и утвержденного президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 сентября 2018 г. № 12) в рамках реализации Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», а именно:

1. Рост производительности труда на средних и крупных предприятиях не ниже 5% к 2024 году (более 20% прирост производительности труда к 2024 году).
2. Разработка эффективных мер повышения производительности труда.
3. Распространение знаний в области повышения производительности труда и стимулирование интереса к повышению производительности труда со стороны предприятий, региональных и федеральных органов власти.

Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»

Инженер-технолог
категории

1

Рослова

Анастасия

Александровна