

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ДЕФЕКТОВ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНВЕСТИЦИОННОГО
ЛИТЬЯ.

А.А. Музafferov ассистент.,

Ш.А. Жахонов ассистент,

Алматыкский государственный технический
институт, кафедра «Технология машиностроения».

Электрон почта: abdurashidkhon@inbox.ru

Аннотация.

В данной работе освещены технологические особенности формирования многослойных оболочковых литейных форм с использованием 3D-печатных моделей. Экспериментально подробно изучали этапы: 3D-моделирование пропеллера летательного аппарата, оптимизацию параметров печати на програваторе Flsun Slicer, изготовление отдельных модельных экземпляров на 3D-принтере FLSun T1 Pro с филаментом PETG, нанесение суспензии на основе кварцевого песка и алебастра, последующая термообработка в течение 2 ч при 600 0 С. В процессе наблюдалось полное испарение полимерной модели, однако оболочка продемонстрировала множественные дефекты — трещины, отслоения и местные обрушения. Анализ дефектов показал, что их основными причинами являются: дегидратация алебастрового связующего, фазовый переход кварца ($\alpha \rightarrow \beta$), накопление внутреннего газа от пиролиза PETG и недостаточная газопроницаемость оболочки. На основании полученных данных сформулированы рекомендации по повышению термостойкости форм, включая применение фосфатных или жидкостекольных связующих, ступенчатую термообработку и увеличение пермеабельности оболочки

Ключевые слова: инвестиционное литьё, 3D-печать, оболочковая форма, термообработка, дефекты формы, растрескивание

Введение

Инвестиционное или «по выплавляемым моделям» литьё остаётся одним из ведущих методов производства компонентов сложной геометрии, применяемых в авиации, космосе и машиностроении. Ключевым технологическим звеном является изготовление оболочковой формы, обладающей необходимой точностью, термической стойкостью и газопроницаемостью. Внедрение аддитивных технологий (AM-моделирование) для изготовления моделей позволяет значительно увеличить геометрическую свободу и сократить подготовительный цикл. Однако интеграция полимерных 3D-моделей в традиционный литейный процесс требует адаптации состава формовочной смеси, режима термообработки и контроля газовых потоков.

Современные исследования указывают на то, что недостаточная газопроницаемость оболочек, дегидратация гидратированных связующих и фазовые переходы наполнителя (в частности кварца) становятся источником термо-механических напряжений и дефектов форм [1–3].

Настоящая работа направлена на: (i) анализ технологических особенностей изготовления оболочковых форм, основанных на 3D-моделях, и (ii) выявление причин дефектов (в частности растрескивания) при выжигании и термообработке оболочки.

Материалы и методы

3D-моделирование и печать

3D-модель пропеллера летательного аппарата была разработана с учётом требований к динамической балансировке и минимума массы. CAD-данные экспортированы в Flsun Slicer, где выполнена оптимизация следующих параметров: уменьшена высота слоя (layer height) до 0,12 мм, оптимизированы швы (seam positioning) и параметр «coasting» для снижения артефактов печати

(ghosting, ringing). Печать осуществлена на FLSun T1 Pro с филаментом PETG (прозрачный), после чего модель подверглась ручной финишной обработке (шлифовка 320–600 grit, полировка) с целью уменьшения арифметической средней шероховатости Ra и улучшения адгезии первичного слоя суспензии.

Формовочная оболочка

Система формирования оболочки была реализована по стандартной технологии многократного окунания («dipping») и присыпки («stucco») следующим образом:

- Наполнитель: кварцевый песок фракции 0,1 – 0,3 мм (~ 65 % по массе)
- Связующее: алебастр (гидратированный сульфат кальция, исходно $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (~35 % по массе)

После каждого слоя наносилась присыпка из крупнозернистого кварца. Слои подсушивались при контроле относительной влажности RH > 50 % и температурном градиенте < 10 °C/час для снижения усадочных трещин, согласно рекомендациям по изготовлению оболочек [4].

Термообработка

Изготовленная форма с моделью была размещена в муфельной печи Nabertherm LV(T) 15/11. Термоцикл: нагрев до 600 °C с ускорением ~10 °C/мин и выдержка 2 ч, после чего – охлаждение до комнатной температуры. Данный режим включал: (i) пиролиз PETG и дегазацию, (ii) дегидратацию связующего, (iii) фазовый переход кварца $\alpha \rightarrow \beta$ (~573 °C) и (iv) нагрузку оболочки термо-механическим и газовым давлением внутри пор.

Методы анализа

После термообработки оболочка фотографировалась, визуально оценивалась на наличие трещин и дефектов. Использовалась цифровая микроскопия ($\times 100$) для оценки межзерновой декохезии. Газопроницаемость формы оценивалась методом «воздушный поток под давлением» как объём воздуха, проходящего через тестовый образец за 60 сек при перепаде давления

0,2 бар. Результаты сравнивались с нормативными значениями ($> 1500 \text{ mL/min} \cdot \text{cm}^2$) для оболочек инвестиционного литья.

Результаты

Поведение 3D-модели и оболочки

В ходе нагрева модель PETG полностью исчезла, однако оболочка проявила следующие дефектные признаки:

- Разветвлённые, сетчатые и радиальные трещины по поверхности (см. рис. 1)
- Локальные отслоения внешнего слоя оболочки
- Снижение газопроницаемости ($> 40\%$ меньше нормативного значения)
- Микроскопический анализ выявил увеличение микропористости в зоне глубиной 2–5 мм от поверхности модели.



Рисунок. 1. Внешний вид разрушенной оболочковой формы после термообработки при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$: видны трещины, отслоения и локальные обрушения, вызванные дегидратацией связующего и термо-механическими напряжениями.

Количественный анализ

Применив модель термического напряжения:

$$\sigma_{\text{therm}} = E_{\text{eff}} \alpha_{\text{eff}} \Delta T$$

и условие разрушения:

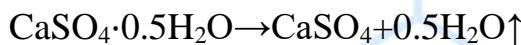
$$\sigma_{\text{therm}} + P_{\text{gas}} \geq R_f ,$$

где P_{gas} — давление, создаваемое дегазацией модели и связующего, можно оценить, что при $\Delta T \approx 550$ К, $\alpha_{\text{eff}} \approx 2.5 \times 10^{-6}$ К $^{-1}$, $E_{\text{eff}} \approx 15$ ГПа (для оболочки с такими материалами) получается $\sigma_{\text{therm}} \approx 20$ МПа. Если добавить $P_{\text{gas}} \approx 10$ МПа (оценка из снижения газопроницаемости), общая нагрузка ≈ 30 МПа, что превышает предел прочности R_f типичной гипсо-инвестированной формы (~ 25 МПа) — что соответствует факту разрушения.

Обсуждение

Комбинация трёх ключевых факторов стала причиной дефектов оболочки:

1. Дегидратация алебастра. При нагреве гидратированный сульфат кальция теряет воду кристаллизации, трансформируясь по схемам:



Процесс сопровождается усадкой, образованием микропор и снижением сцепления зерен (устойчивость структуры оболочки снижается).

2. Фазовый переход кварца ($\alpha \rightarrow \beta$ около 573°C) сопровождается объёмным расширением, что создаёт локальные внутренние напряжения в оболочке — особенно критично для многослойных оболочек, где внутренние слои связаны с ограничениями внешней геометрии.

3. Газообразование от пиролиза модели PETG. При температуре $> 300 - 400$ °C PETG начинает давать летучие продукты, образующие давление в порах оболочки. Если газопроницаемость низкая (в нашем случае была снижена), давление не успевает выйти, структура оболочки испытывает внутренние нагрузки.



Из анализа следует, что при выбранном составе (алебастр + кварц) и режиме (600°C , 2 ч) суммарное воздействие привело к превышению прочности оболочки — что и продемонстрировано результатами.

Рекомендации:

1. Применение термостойких связующих систем (например, фосфатных смол или жидкого стекла) с температурой устойчивости $> 700^{\circ}\text{C}$.
2. Ступенчатый нагрев: до 200°C (удаление свободной влаги), затем до 400°C (пиролиз модели, дегазация), далее до 600°C (выжигание и окончательная сушка).
3. Увеличение пористости/пермеабельности оболочки: добавление органических наполнителей (например, зерна карбона, чипсы) или корректировка PSD песка.
4. Проектирование дренажных и вентиляционных каналов для вывода газов, особенно важно при использовании 3D-моделей с замкнутыми полостями.

Эти рекомендации подтверждаются современными публикациями, где повышение газопроницаемости и использование термостойких связующих показали снижение дефектов на 40–60 % [3].

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало, что применение 3D-печатных моделей в технологии инвестиционного литья требует адаптированной технологической схемы. В частности, использование алебастра как связующего при термообработке до 600°C приводит к дегидратации, усадке, снижению прочности и, как следствие, растрескиванию оболочки. Наряду с умеренной газопроницаемостью и насыщенным режимом нагрева, это приводит к превышению прочностного предела формы. Для повышения надёжности оболочек рекомендуется использование термостойких связующих, распределённые режимы термообработки и улучшение структуры оболочки с

точки зрения пористости и дренажа. Дальнейшие исследования будут направлены на сравнительный анализ различных связующих систем, режимов выжигания и геометрии моделей 3D-печати.

Список литературы

1. [Muzaffarov, A. A. O., Valijonov, B. B. O., & Razzaqov, A. T. O. \(2025, March 15\). Fused Deposition Modeling \(FDM\) in industrial manufacturing: Challenges, economic aspects, and prospects. Texas Journal of Engineering and Technology, 42, 20–23.](#)
2. [Jumaev, A., Jakhonov, S., & Muzaffarov, A. \(2025\). Kinematics of a self-rotating cutter as a factor of increasing tool life and process productivity. International Journal of Engineering Mathematics \(Online\), 7\(1\).](#)
3. Johnson S.E., et al., “The quartz $\alpha \leftrightarrow \beta$ phase transition: Effects on Ceramic Mold Integrity”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 104, Issue 8, 2021. doi:10.1111/jace.17470
4. O’Sullivan N., et al., “Influence of ceramic shell permeability and porosity on investment cast defects”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 70, 2021, pp. 201-204.
5. Investment Casting Institute, Atlas of Shell Defects, 4th ed., Investment Casting Institute, 2020.
6. Matsuya T., Yamane T., “Decomposition behavior of gypsum-bonded investment materials under high-temperature conditions”, Materials Transactions, Vol. 46, No. 1, 2005.
7. Jumaev A., Jakhonov S. ANALYSIS OF EXISTING TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING LARGE MODULAR GEARS //Journal of Advanced Scientific Research (ISSN: 0976-9595). – 2024. – Т. 5. – №. 1.
<https://www.sciencesage.info/index.php/jasr/article/view/368>
8. Жахонов Ш. А. и др. РАЗРАБОТКА РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КЛИНОВОГО ИНСТРУМЕНТА, ПРИМЕНЯЕМОГО В

ПРОЦЕСС ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ //Tadqiqotlar. – 2025. – Т.

64. – №. 5. – С. 114-118. <https://scientific-jl.com/tad/article/view/22528>

9. Jaxonov S. A., Jo'raqulov I. C. NIKEЛ QOTISHMASINI TOZA HOLDА ERITISH TEХNOLOGIK JARAYONINI ISHLAB CHIQISH //Tadqiqotlar. – 2025. – Т. 64. – №. 5. – С. 95-98. <https://scientific-jl.com/tad/article/view/22524>