

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

*А.А. Музаффаров ассистент.,*

*Ш.А. Жахонов ассистент,*

*Алмалыкский государственный технический  
институт, кафедра «Технология машиностроения».*

*Электрон почта: [abdurashidkhon@inbox.ru](mailto: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 алебаstra, 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 (АМ-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 окунаия («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  $< 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$  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  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  с ускорением  $\sim 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  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  $\alpha \rightarrow \beta$  ( $\sim 573 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и (iv) нагрузку оболочки термомеханическим 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  $600^\circ\text{C}$ : 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:

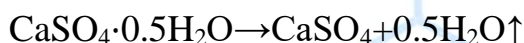
$$\sigma_{\text{therm}} + P_{\text{gas}} \geq R_f,$$

где  $P_{\text{gas}}$  – 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<sup>-1</sup>,  $E_{\text{eff}} \approx 15$  GPa (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  $\approx 30$  МПа, что превышает предел прочности  $R_f$  типичной гипсо-инвестированной формы ( $\sim 25$  МПа) — что соответствует факту разрушения.

## Обсуждение

Комбинация трёх ключевых факторов стала причиной дефектов оболочки:

1. Дегидратация алебаstra. 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 °С, 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 °С.
2. Ступенчатый нагрев: до 200 °С (удаление свободной влаги), затем до 400 °С (пиролиз модели, дегазация), далее до 600 °С (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 алебаstra как связующего при термообработке до 600 °С 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



ПРОЦЕССЕ 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. NIKEL QOTISHMASINI TOZA HOLDA ERITISH TEXNOLOGIK JARAYONINI ISHLAB CHIQISH //Tadqiqotlar. – 2025. – Т. 64. – №. 5. – С. 95-98. <https://scientific-jl.com/tad/article/view/22524>