

Искандер Шаукатович Ахатов

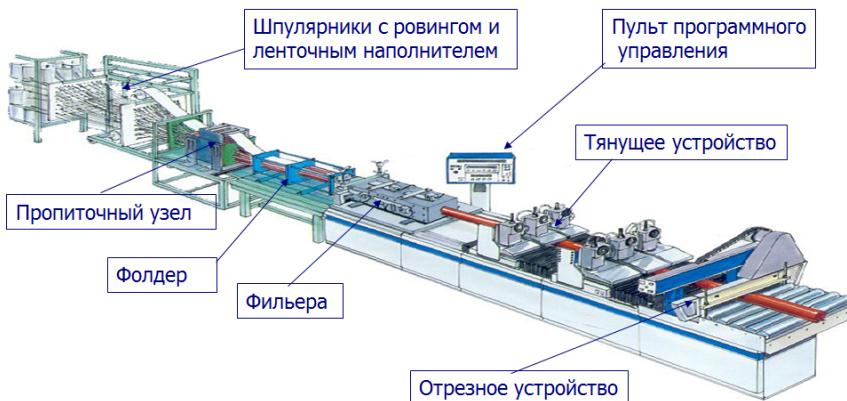
Центр проектирования, производственных технологий и материалов
Сколковский институт науки и технологий, Москва



Technologies:

- ✓ Composite Materials - Моделирование механического поведения композиционных изделий в процессе изготовления методом пултрузии
- ✓ Additive Manufacturing - Керамическая 3D печать
- ✓ Thermal Spray and Functional Coatings

Моделирование механического поведения композиционных изделий в процессе изготовления методом пултрузии



Применение и преимущества

- Строительство, транспорт
- Энергетика, спорт
- Уменьшение веса
- Коррозионная стойкость
- Простота в обслуживании
- Автоматизированный процесс
- Высокая производительность
- Стабильность механических свойств и геометрии композитных профилей

Цели, механические задачи и направления исследований

- Оптимизация технологических режимов
- Проектирование оснастки
- Остаточные напряжения и деформации после изготовления
- Полимеризация смолы и выделение тепла при реакции
- Пропитка волокон и анизотропия проницаемости
- Возникновение технологических дефектов
- Образование пористости
- Прогноз усилия протяжки
- Прогноз механических свойств композиционного материала

Vedernikov A, Safonov A, Tucci F, Carbone P, Akhatov I. Pultruded materials and structures: A review. Journal of Composite Materials 2020.

Лаборатория Композиционных материалов и конструкций

Мировой опыт исследований

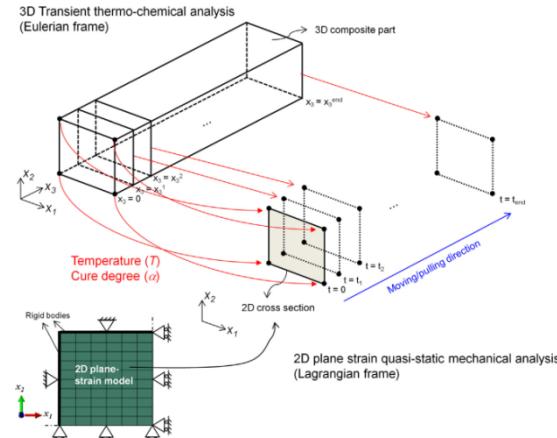
Модели технологического процесса*

- Полимеризация смолы и Теплопроводность – 70 статей
- Течение смолы – 45 статей
- Остаточные напряжения и коробление – 31 статья
- Прогноз усилия протяжки – 20 статей
- Прогноз образования дефектов и пористости – 5 статей
- Всего – 192 статьи

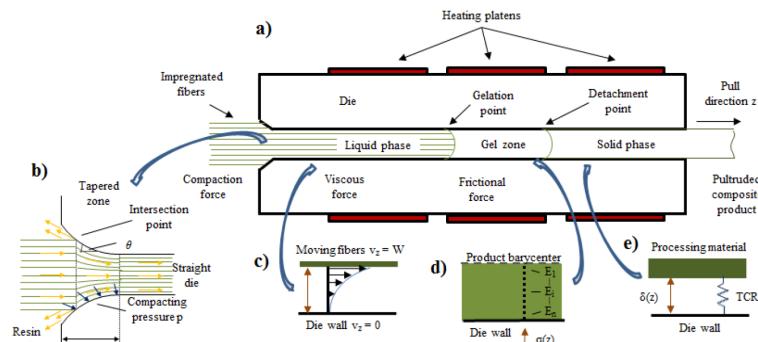
Отечественные ученые в области механики технологических процессов композитов и пултрузии:

Болотин В.В., Виноградов В.М., Бужгулашвили В.А.,
Карпенков С.В., Жовнер Б.А., Новиков В.А., Горелов Д.Н.,
Блиннов В.М., Рябков М. Е., Петров А. В., Ставров В.П.,
Цвирко Э.Н., Царев В.Ф., Красновский А.Н., Казаков И.А.

*Safonov AA, Carbone P, Akhatov I. Mathematical simulation of pultrusion processes: A review. *Composite Structures* 2018;184 pp.153-177.



Baran I, Tutum CC, Nielsen MW, Hattel JH. Process induced residual stresses and distortions in pultrusion. *Compos Part B Eng* 2013.



Расчетные модели технологического процесса

- ✓ Степень полимеризации

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_0(1 - \alpha)^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

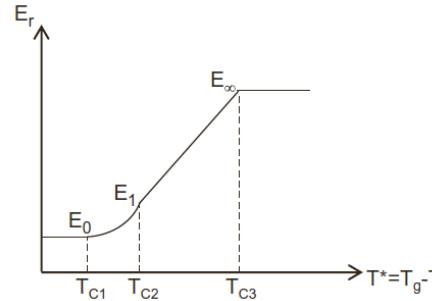
- ✓ Теплопроводность

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + k_3 \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} + q$$

- ✓ Теплота реакции полимеризации

$$q = \rho_r H_{tot} \frac{d\alpha}{dt} (1 - V_f)$$

- ✓ Изменение модуля упругости смолы



- ✓ Изменение температуры стеклования

$$T_g(\alpha) = T_{g0} + (T_{g\infty} - T_{g0}) \frac{\lambda\alpha}{1 - (1 - \lambda)\alpha}$$

- ✓ Химическая усадка

$$\varepsilon_r^{ch} = \Delta V_{tot}^{ch} \cdot \alpha / 3$$

*Константинов А.Ю., Сафонов А.А. Математическое моделирование остаточных технологических деформаций при пултрузии профилей сложного сечения из полимерных композиционных материалов // Проблемы прочности и пластичности. 2014, том 76, номер 4, стр. 310-319.

Расчет эффективных свойств композита на основе микромеханической модели

Модуль упругости вдоль волокон

$$E_{11} = E_{11f}V_f + E_r(1-V_f) + \left[\frac{4(V_r - V_{13f})^2 k_f k_r G_r (1-V_f) V_f}{(k_f + G_r) k_R + (k_f - k_r) G_r V_f} \right]$$

Здесь

$$k = \frac{E_1 E_2}{2(1-\nu_{23})E_1 - 4\nu_{12}^2 E_2}, \quad G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)}$$

индекс f относится к наполнителю, r – к связующему

Модули сдвига

$$G_{12} = G_{13} = G_r \left[\frac{(G_{13f} + G_r) + (G_{13f} - G_r)V_f}{(G_{13f} + G_r) - (G_{13f} - G_r)V_f} \right]$$

$$G_{23} = \frac{G_r [k_r(G_R + G_{23f}) + 2G_{23f}G_r + k_r(G_{23f} - G_r)V_f]}{k_r(G_{23f} + G_r) + 2G_{23f}G_r - (k_r + 2G_r)(G_{23f} - G_r)V_f}$$

$$G_{23f} = \frac{E_{33f}}{2(1+\nu_{23f})}$$

Коэффициенты Пуассона

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{13f}V_f + \nu_r(1-V_f) + \left[\frac{(V_r - V_{13f})(k_r - k_f)G_r(1-V_f)V_f}{(k_f + G_r)k_r + (k_f - k_r)G_rV_f} \right]$$

$$\nu_{23} = \frac{2E_{11}k_T - E_{11}E_{22} - 4\nu_{13}^2 k_T E_{22}}{2E_{11}k_T}, \text{ где } k_T = \frac{(k_f + G_r)k_r + (k_f - k_r)G_rV_f}{(k_f + G_r) - (k_f - k_r)V_f}$$

Модули упругости поперек волокон

$$E_{22} = E_{33} = \frac{1}{(1/4k_T) + (1/4G_{23}) + (\nu_{12}^2 / E_{11})}$$

Матрица податливости монослоя

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{13}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_{22}} & 0 & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ Sym & \frac{1}{G_{12}} & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 & \frac{1}{G_{23}} \\ & & & & & \end{bmatrix}$$

Коэффициенты температурного расширения монослоя

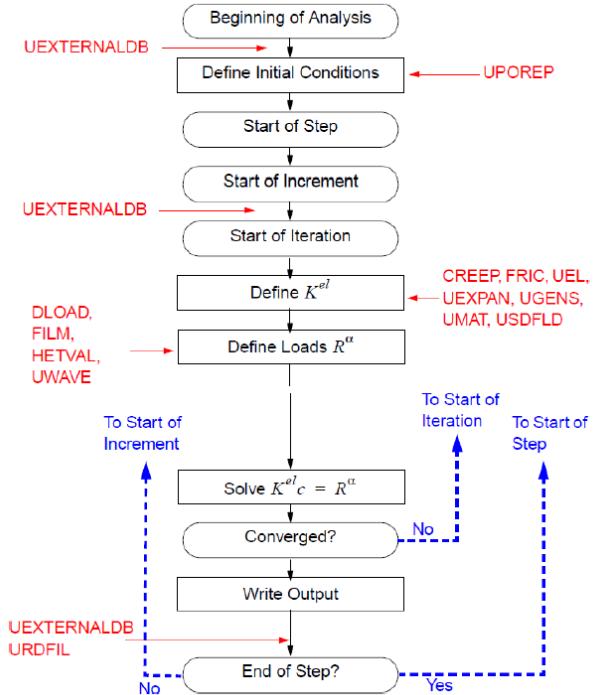
$$CTE_1 = \frac{CTE_{1f}E_{11f}V_f + CTE_R E_R(1-V_f)}{E_{11f}V_f + E_R(1-V_f)}$$

$$CTE_2 = CTE_3 = (CTE_{2f} + \nu_{13f} CTE_{1f})V_f + (CTE_R + \nu_R CTE_R)(1-V_f) - (\nu_{13f}V_f + \nu_R(1-V_f)) \frac{CTE_{1f}E_{11f}V_f + CTE_R E_R(1-V_f)}{E_{11f}V_f + E_R(1-V_f)}$$

*T.A. Bogetti and J.W. Gillespie Jr., "Process-Induced Stress and Deformation in Thick-Section Thermoset Composite Laminates", Journal of Composite Materials 26 (5), 1992, pp. 626-660

Численная реализация

- Описанная модель реализована в ПП ABAQUS.
- Для этого используются авторские программы: HETVAL, UEXPAN, UMAT, FILM, URDFIL, UFIELD, UEXTERNALDB.
- Выбран неявный решатель ABAQUS Standard.
- Уравнения теплопроводности и равновесия решались стандартными средствами.
- Для интегрирования уравнения кинетики полимеризации применялся двухшаговый неявный метод Эйлера-Коши.



Константинов А.Ю., Сафонов А.А. Математическое моделирование остаточных технологических деформаций при пултрузии профилей сложного сечения из полимерных композиционных материалов // Проблемы прочности и пластичности. 2014, том 76, номер 4, стр. 310-319.

Пример: Стержень Ø80 мм



Параметры оптимизации:

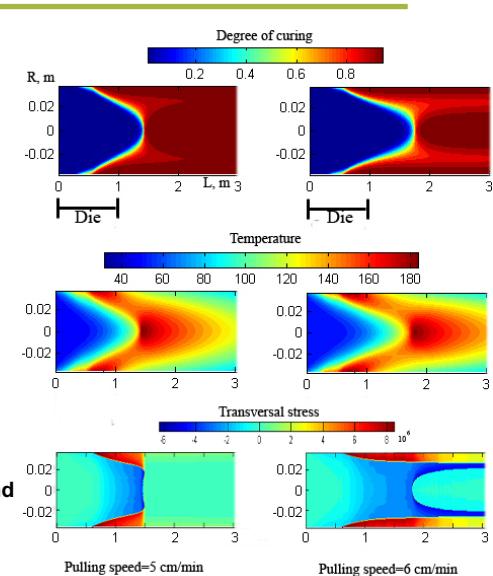
- Температура при входе T_0
- Температура первой зоны фильтры T_1
- Температура второй зоны фильтры T_2
- Скорость протяжки u

Целевая функция :

- Скорость протяжки $u \rightarrow \max$

Ограничения:

- Трансверсальные напряжения в стержне S_{\max}
- Максимальная температура материала T_{\max}
- Максимальная температура на концевом срезе T_{end}
- Степень полимеризации на концевом срезе α



Pulling speed=5 cm/min

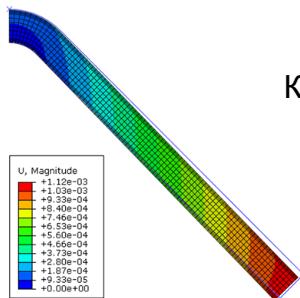
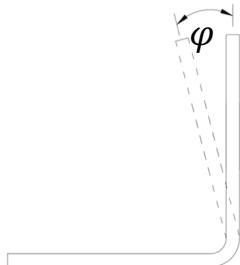
Pulling speed=6 cm/min

Режим	U, см/мин	T_0 , С	T_1 , С	T_2 , С
Исходный	5.0	40	150	180
Оптимальный	6.5	69	170	170

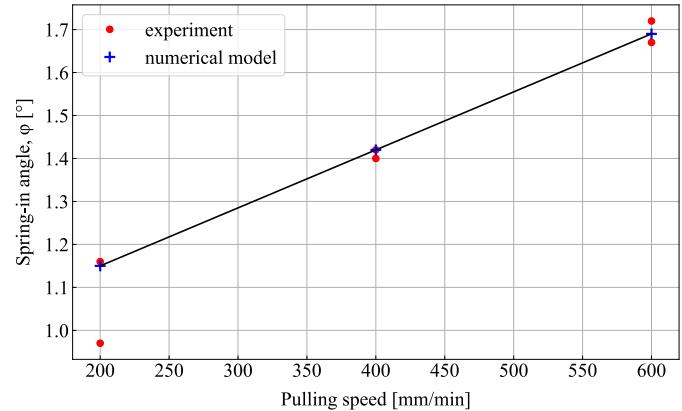
Safonov, A.; Gusev, M.; Saratov, A.; Konstantinov, A.; Sergeichev, I.; Konev, S.; Gusev, S.; Akhatov, I. Modeling of cracking during pultrusion of large-size profiles. *Composite Structures* 2020, 235, 111801

Пример: Уголок 75x75x6 мм

Пултрузионная машина: Pultrex Px500-6T
(Pultrex, Великобритания)
Длина фильтры: 600 мм
Скорость вытяжки: 200, 400, 600 мм/мин



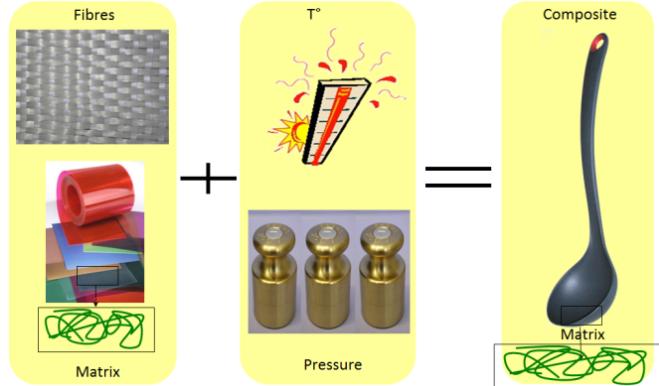
Коробление



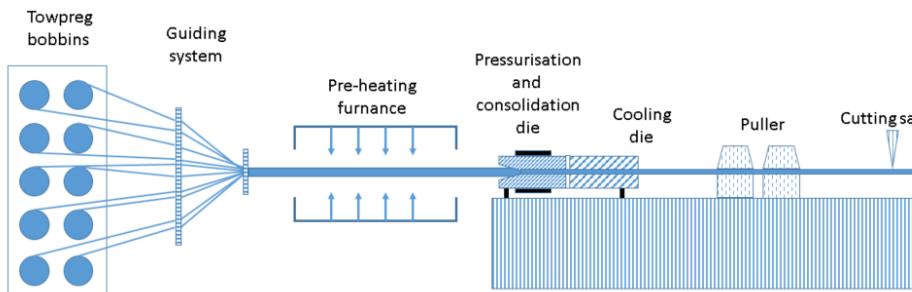
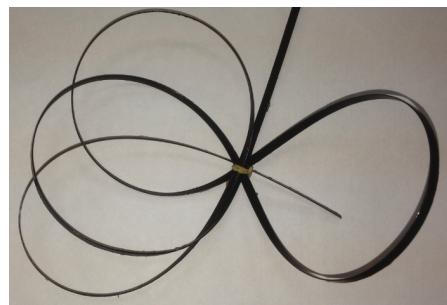
Vedernikov A, Tucci F, Carbone P, Gusev S, Konev S, Firsov D, Akhatov I, Safonov A. Effects of pulling speed on structural performance of L-shaped pultruded profiles. Compos Struct 2021;255:112967

Термопластичная пултрузия

- Исходный материал = твердое вещество
 - Нагревание необходимо для расплавления
 - Высокая вязкость расплава: трудная пропитка
- Плавление = чисто физическое явление
 - Отсутствие зависимости от кинетики реакции
 - Только температурно-вязкостная зависимость
 - Возможны переплавка и вторичная переработка
 - Возможно постформирование

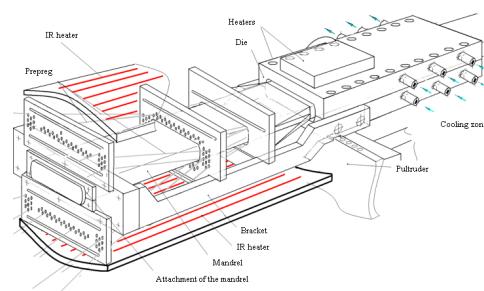


- Преимущества**
- Утилизация
 - Короткий технологический цикл
 - Пост-обработка
 - Сложная геометрия изделий
 - Высокая ударная прочность



Предварительно пропитанные ленты
Стеклянные волокна и полипропилен

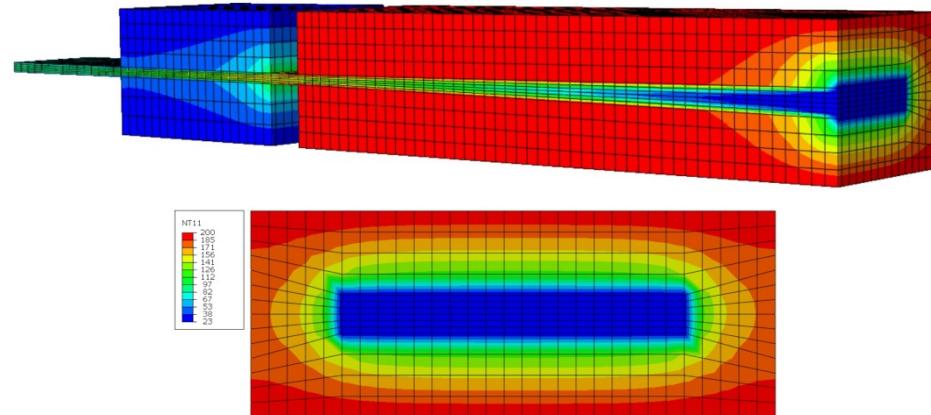
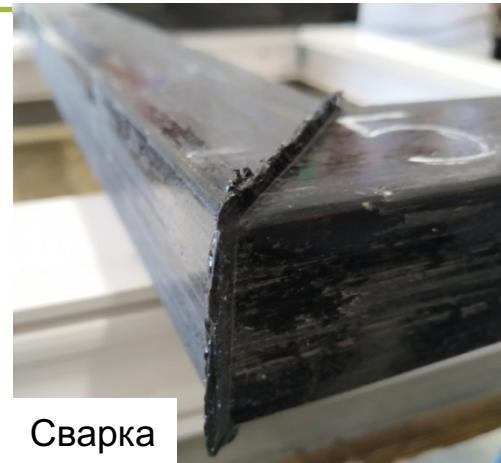
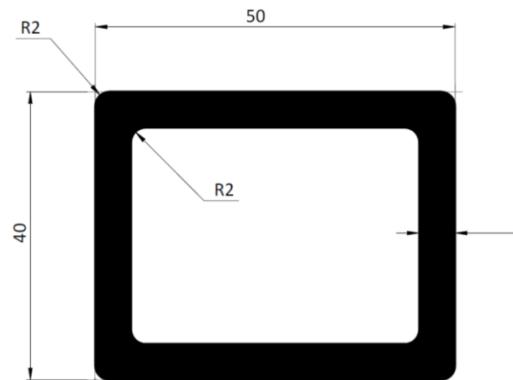
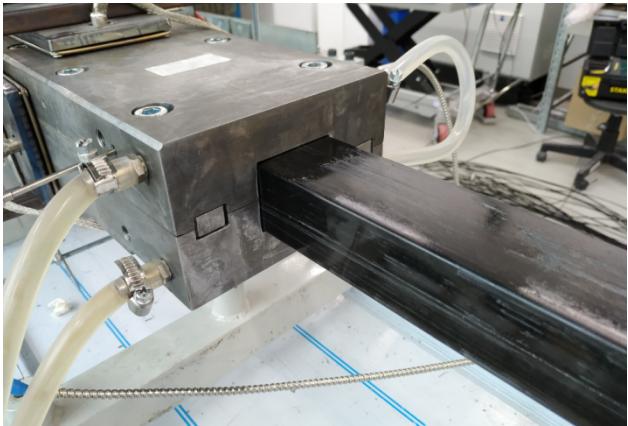
Термопластичная пултрузионная линия
Высокопроизводительное производство композитных профилей



Технологический
процесс

Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., Akhatov, I. Thermoplastic pultrusion: A review. *Polymers* 2021, 13(2), 180

Термопластичная пултрузия. Прямоугольная труба 50x40x5 мм



Свойства	Термопластичный композит	Металл
Плотность, г/см ³	1,53	7,9
Теплопроводность, Вт/(м К)	0,35	50,2
КЛTP, 1/K	1,37·10 ⁻⁶	11,9·10 ⁻⁶
Модуль упругости, ГПа	27,2	206
Прочность, МПа	479	400
Содержание волокна, %	63,3	-
Содержание пор, %	0,68	-

Три патента: материал (1), технология (2) и изделие (3)

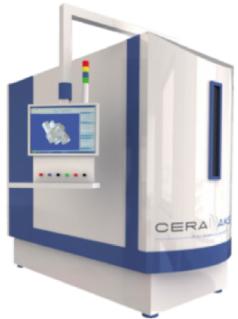
Публикации

1. Vedernikov, A., Nasonov, Y., Korotkov, R., Gusev, S., Akhatov, I., Safonov A. [Effects of additives on the cure kinetics of vinyl ester pultrusion resins](#). **Journal of Composite Materials** 2021. doi:10.1177/00219983211001528
2. Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., Akhatov, I. [Thermoplastic pultrusion: A review](#). **Polymers** 2021, 13(2), 180, doi:10.3390/polym13020180.
3. Vedernikov, A., Tucci, F., Carbone, P., Gusev, S., Konev, S., Firsov, D., Akhatov, I., Safonov, A. [Effects of pulling speed on structural performance of L-shaped pultruded profiles](#). **Composite Structures** 2021, 255, 112967, doi:10.1016/j.compstruct.2020.112967.
4. Vedernikov, A.; Safonov, A.; Tucci, F.; Carbone, P.; Akhatov, I. [Pultruded materials and structures: A review](#). **Journal of Composite Materials** 2020, 54, 4081–4117, doi:10.1177/0021998320922894.
5. Safonov, A.; Gusev, M.; Saratov, A.; Konstantinov, A.; Sergeichev, I.; Konev, S.; Gusev, S.; Akhatov, I. [Modeling of cracking during pultrusion of large-size profiles](#). **Composite Structures** 2020, 235, 111801, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111801.
6. Vedernikov A, Tucci F, Safonov A, Carbone P, Gusev S, Akhatov I. [Investigation on the Shape Distortions of Pultruded Profiles at Different Pulling Speed](#). **Procedia Manufacturing** 2020, 47, 1–5, doi:10.1016/j.promfg.2020.04.107.
7. Safonov, A.A.; Carbone, P.; Akhatov, I. [Mathematical simulation of pultrusion processes: A review](#). **Composite Structures** 2018, 184, 153–177, doi:10.1016/j.compstruct.2017.09.093.
8. Fedulov, B.N.; Safonov, A.A.; Sergeichev, I. V.; Ushakov, A.E.; Klenin, Y.G.; Makarenko, I. V. [Strength Analysis and Process Simulation of Subway Contact Rail Support Bracket of Composite Materials](#). **Applied Composite Materials** 2016, 23, 999–1013, doi:10.1007/s10443-016-9495-2.
9. Константинов А.Ю., Сафонов А.А. [Математическое моделирование остаточных технологических деформаций при пултрузии профилей сложного сечения из полимерных композиционных материалов](#) // **Проблемы прочности и пластичности**. 2014, том 76, номер 4, стр. 310-319.
10. Safonov, A. A. [Mathematical description of the technological process of injection pultrusion](#). **Journal of Machinery Manufacture and Reliability** 2011, 40, 68–73, doi:10.3103/S1052618811010171.
11. Safonov, A.A.; Suvorova, Y.V. [Optimization of the pultrusion process for a rod with a large diameter](#). **Journal of Machinery Manufacture and Reliability** 2009, 38, doi:10.3103/S1052618809060090.

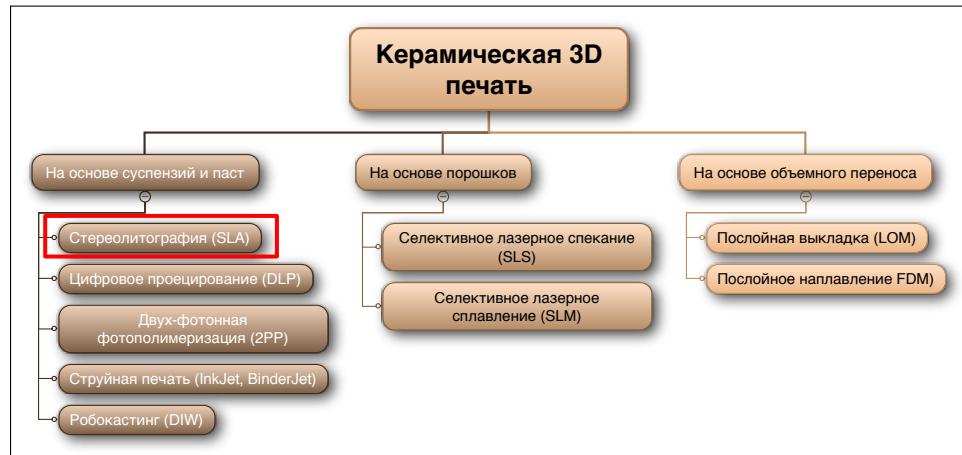
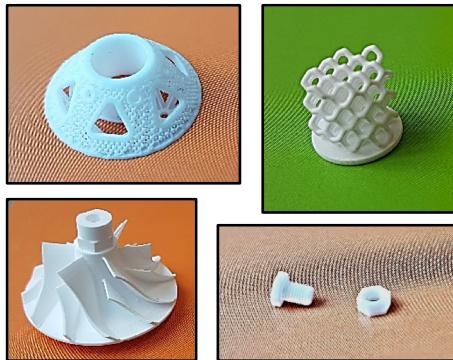
Патенты

1. Пат. 2738062 Российская Федерация. [Термопластичный пултрузионный усилительный вкладыш в полой пластиковой раме оконного или дверного блока](#) / Сафонов А.А., Гусев С.А., Рубцов М.А., Сергеичев И.В., Ахатов И.Ш.; заявитель и патентообладатель Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий». – № 2020125537; заявл. 31.07.2020; опубл. 07.12.2020.
2. Пат. 2738606 Российской Федерации. [Термопластичный армированный пултрузионный профиль](#) / Гусев С.А., Сафонов А.А., Рубцов М.А., Сергеичев И.В., Ахатов И.Ш.; заявитель и патентообладатель Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий». – № 2020113110; заявл. 08.04.2020; опубл. 14.12.2020.
3. Пат. 2742170 Российской Федерации. [Способ непрерывного изготовления термопластичного армированного пултрузионного профиля](#) / Гусев С.А., Сафонов А.А., Рубцов М.А., Сергеичев И.В., Ахатов И.Ш.; заявитель и патентообладатель Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий». – № 2020113106; заявл. 08.04.2020; опубл. 02.02.2021.

Керамическая 3D печать



3D принтер Ceramaker 900



Изделия, изготавливаемые из технической керамики в различных областях индустрии



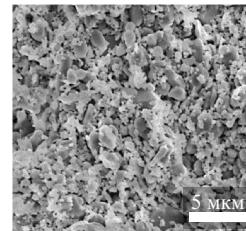
Керамическая 3D печать – Производственная процедура и Исследования



Механические задачи, связанные с процессом 3D печати керамики



Прочностные свойства изделия на этапах печати и отжига зависят от размера и формы исходного керамического порошка



Моделирование процесса нанесения керамической пасты на поверхность области построения

- Псевдопластичность → вязкость пасты понижается при увеличении сдвиговых напряжений
- Механическое удаление пузырьков воздуха из пасты в процессе нанесения нового слоя
- Сдвиговые напряжения в уже нанесенных слоях, передающиеся от вновь наносимого слоя
 - этот процесс критичен при печати изделий со сверхтонкими стенками, с малыми размерами или с бесконтактными поддержками.



Остаточные механические напряжения, проявляющиеся в органическом связующем в процессе полимеризации, приводят к разрушению изделий на этапе печати → необходимо численное моделирование и модификация параметров печати



Эффект сдвиговых напряжений при печати образцов

Механические задачи, связанные с процессом 3D печати керамики

Механические напряжения, возникающие при термическом удалении органического связующего за счет термического разложения органического вещества на молекулы газа и его выхода из объема изделия



Примеры изделий, потрескавшихся в процессе удаления органического связующего, при использовании стандартного подхода к процедуре отжига



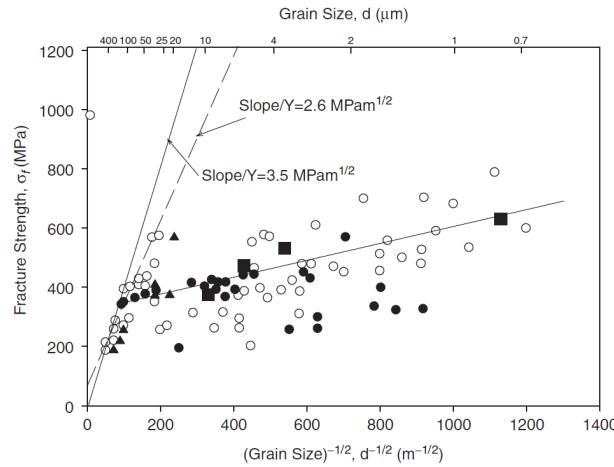
Данная задача требует тщательной разработки численной модели поведения материала в процессе термического воздействия.

В том числе, необходим расчет динамически изменяющихся механических характеристик материала в присутствии множественных зон, содержащих газ высокого давления

При использовании модифицированного метода удаления связующего успешно изготавливаются изделия с весьма сложной геометрией

Механические задачи, связанные с процессом 3D печати керамики

Механические проявления в изделии на этапе спекания как часть общего процесса массопереноса керамического материала на нано- и микро-масштабе, приводящего к повышению эффективной плотности изделия и исчезновению пустот – линейная усадка составляет 15-30%, в зависимости от материала и параметров 3D печати.



Уравнение Холла-Петча

$$\sigma_f = \sigma_y + k_y d^{-1/2}$$

Требуется подбор технологических параметров процедуры спекания для получения заданного размера зерен и обеспечения свойств конечного изделия.

Wachtman et al - Mechanical Properties of Ceramics, 2nd Ed, 2009



Задача прогнозирования усадки изделия для получения точных размеров после стадии спекания – особенно критично для изделий сложной формы

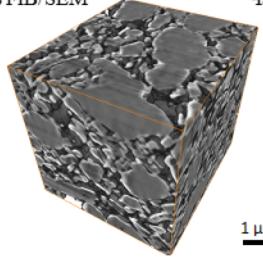


Актуальная задача: модификация исходного материала на этапе создания пасты, для управления формированием зерен на этапе спекания – такая процедура влечет за собой изменения в процедуре печати и отжига

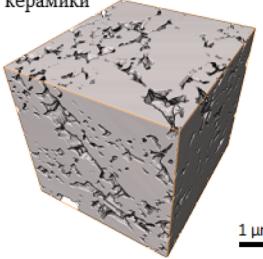
Safonov A, Maltsev E, Chugunov S, Tikhonov A, Konev S, Evlashin S, Popov D, Pasko A, Akhatov I. Design and Fabrication of Complex-Shaped Ceramic Bone Implants via 3D Printing Based on Laser Stereolithography. Applied Sciences. 2020; 10(20):7138. <https://doi.org/10.3390/app10207138>

Изучение микроструктуры 3D-печатной керамики для задач моделирования

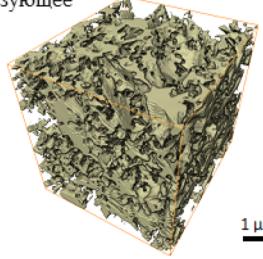
Модель FIB/SEM



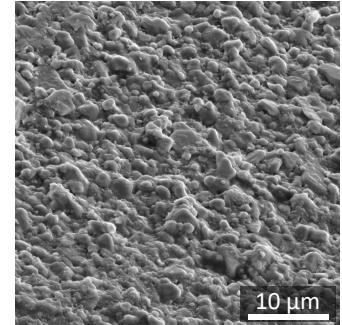
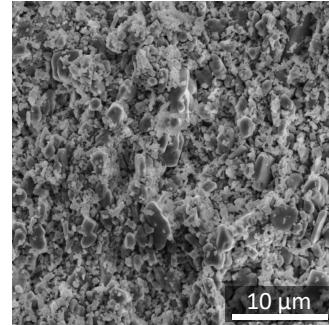
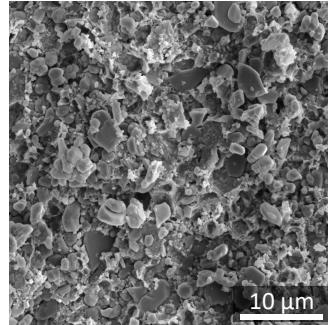
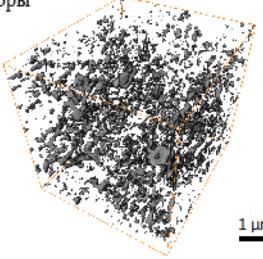
Частицы керамики



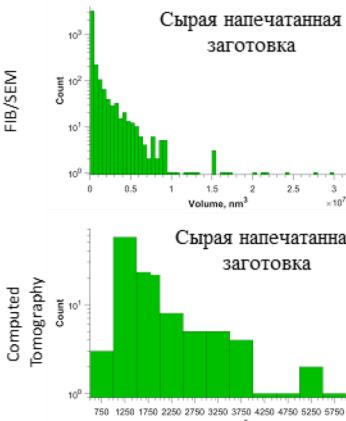
Связующее



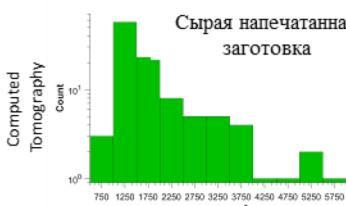
Поры



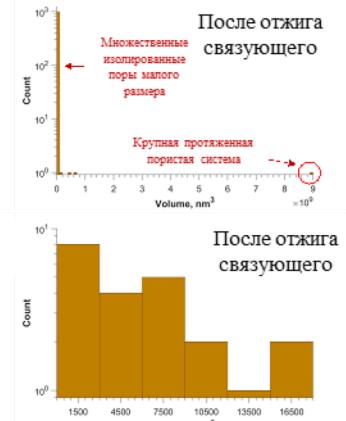
Сырая напечатанная заготовка



Сырая напечатанная заготовка



После отжига связующего



После отжига связующего

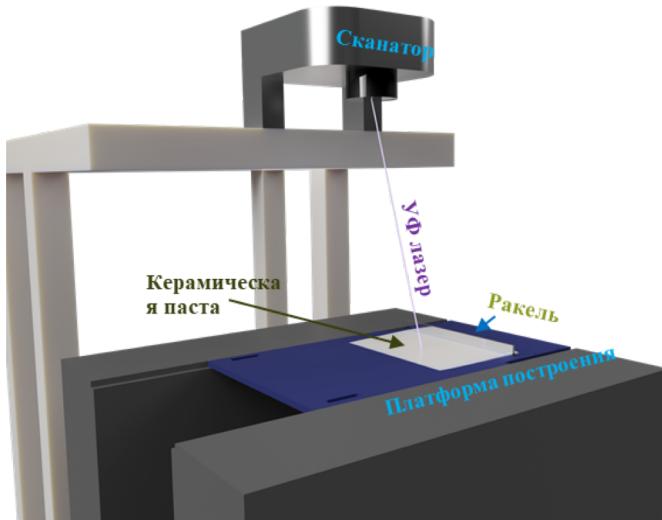


Реконструкция трехмерной микроструктурной модели сырой керамической заготовки, полученной методом 3D-печати с использованием лазерной стереолитографии

S. Chugunov, N.A. Adams, I. Akhatov. Evolution of SLA-Based Al₂O₃ Microstructure During Additive Manufacturing Process. *Materials*. MDPI, 13, pp. 3928, 2020, doi:10.3390/ma13183928

Пористость в керамических образцах на различных этапах производственной процедуры

Моделирование процесса лазерной стереолитографии



В модели используются следующие предположения:

1. Лазерный луч имеет гауссово распределение.
2. Учитываются деформации, возникающие вследствие полимеризации.
3. Модуль Юнга является функцией степени полимеризации.
4. Тепловые деформации незначительны
5. Массовые силы оказывают несущественное воздействие

Процесс представляет собой движение лазерного луча, селективно освещдающего ультрафиолетовым светом слой керамической пасты, параллельно подложке, с постоянной скоростью сканирования и, в случае полимеризации поверхности, с постоянной скоростью штриховки. В зависимости от режима печати, изготовленная деталь представляет собой образец в форме параллелепипеда или пластины. В качестве пасты используется смесь фотополимера с керамическим порошком.

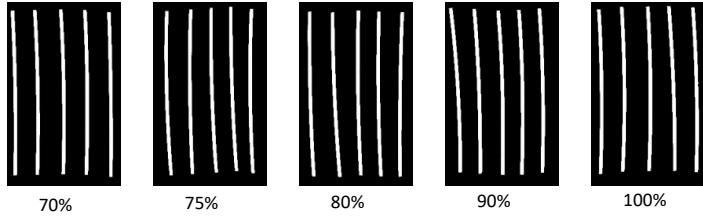
Поток световой энергии, распространяющийся в фотополимере, инициирует реакции полимеризации. Для количественной оценки степени полимеризации вводится параметр, который определяется значениями концентрации мономеров в начальный и расчетный момент времени.

Разработанная модель учитывает кинетику полимеризации, распространение энергии в объеме образца и формирование поля остаточных напряжений

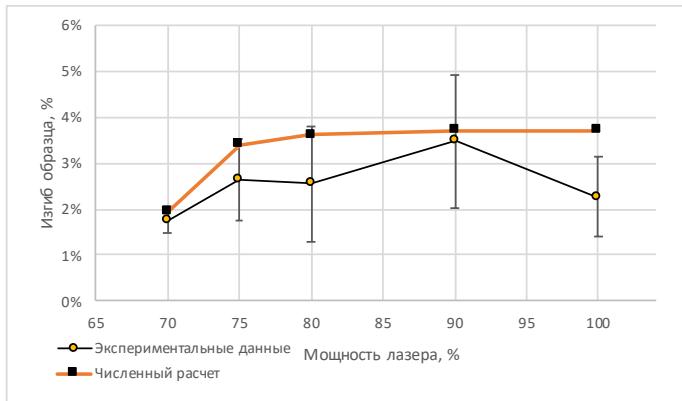
Распространение и поглощение лазерного излучения моделируется на основе закона Бугера — Ламберта — Бера с учётом рассеяния электромагнитных волн на керамических частицах.

Механическая задача решается в приближении малых деформаций

Моделирование процесса лазерной стереолитографии

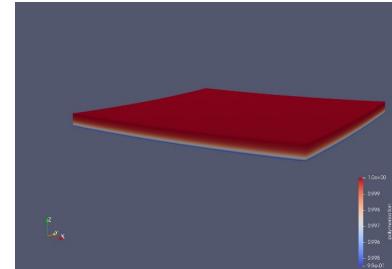


Искривление длинных образцов в форме параллелепипедов, за счет развивающихся в процессе полимеризации внутренних напряжений, в зависимости от мощности лазера



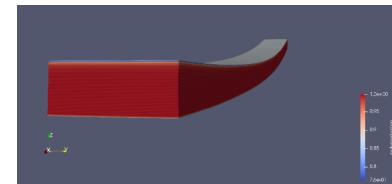
Изгиб образцов $90 \times 5 \times 2 мм в зависимости от мощности лазера, использованной при печати. Изгиб определяется как отношение высоты зазора после деформации детали к ее длине.$

Расчетный прогноз распределения степени полимеризации в деформированной детали $2 \times 2 \times 0.1 мм при 70% мощности лазера.$

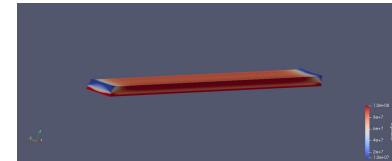


Распределение степени полимеризации в параллелепипеде $90 \times 5 \times 2 мм при 70% мощности лазера.$

Данный тип детали был использован для валидации по эксперименту



Трехмерная визуализация деформированной детали размеров $90 \times 5 \times 2 мм при 70% мощности лазера с закрепленной нижней гранью. Показано распределение напряжений$

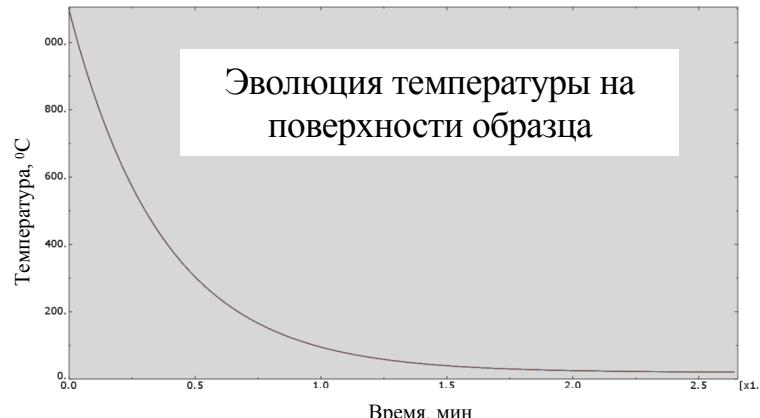


Моделирование процесса термического удаления связующего

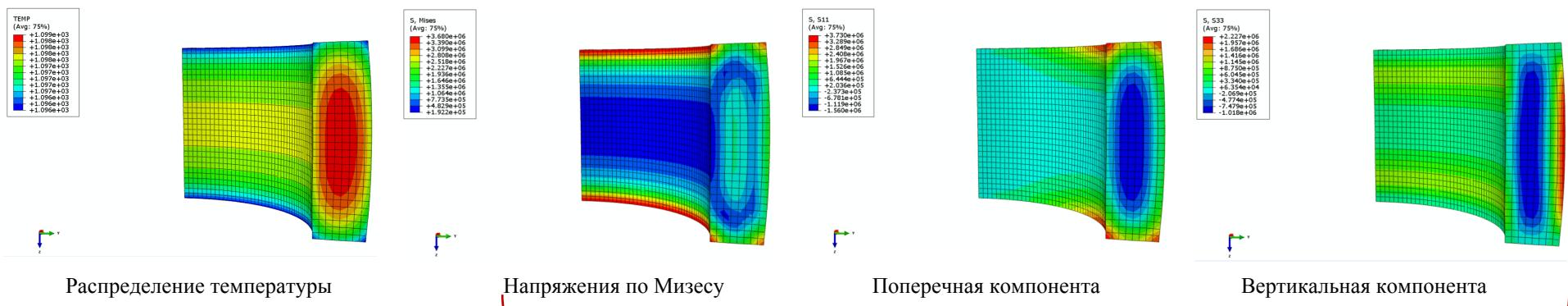
Моделирование процесса проводится в CAE ABAQUS с разработкой и использованием дополнительных пользовательских сабрутин.

При моделировании применяются следующие предположения и упрощения:

- Керамический материал линейный и термо-эластичный
- Теплообмен может быть представлен в транзистентном режиме



Напряжения, возникающие при охлаждении отожженного образца, **не приводят к растрескиванию**



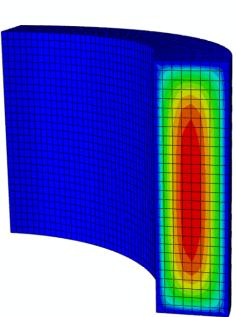
Моделирование процесса термического удаления связующего

Моделирование процесса проводится в CAE ABAQUS с разработкой и использованием дополнительных пользовательских сабрутин.

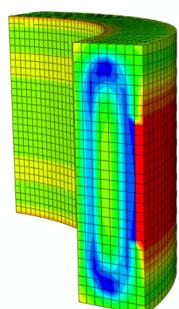
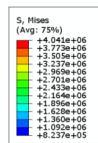
При моделировании применяются следующие предположения и упрощения:

- Керамический материал линейный и термо-эластичный
- Теплообмен может быть представлен в стационарном режиме
- Истечение газа из образца может быть представлен в стационарном виде (закон Дарси)

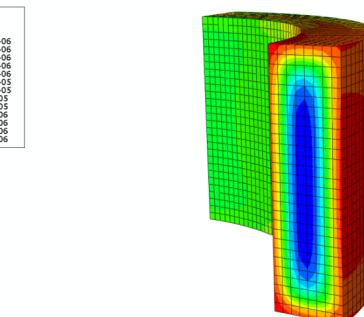
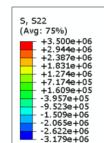
Напряжения, возникающие при удалении связующего, приводят к растрескиванию в силу повышения локальных значений давления в материале



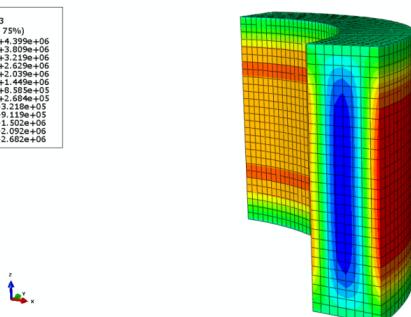
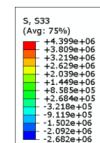
Распределение давления (P/P_0)



Напряжения по Мизесу



Поперечная компонента

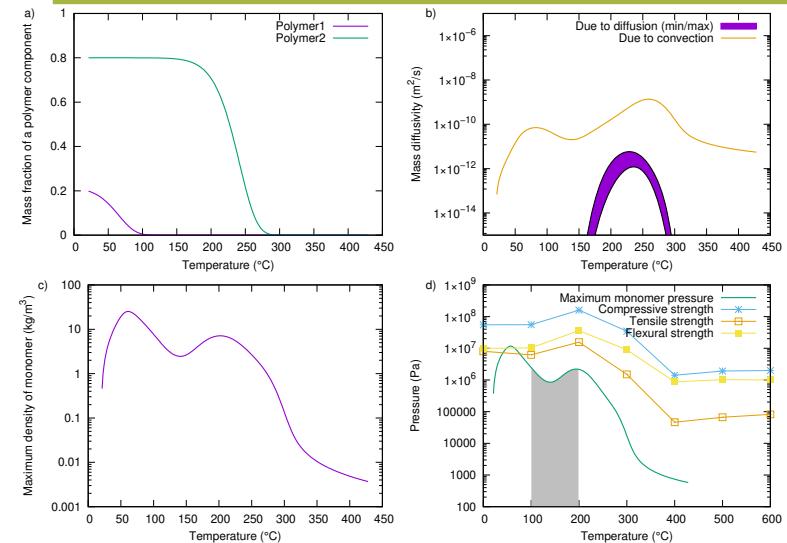


Вертикальная компонента

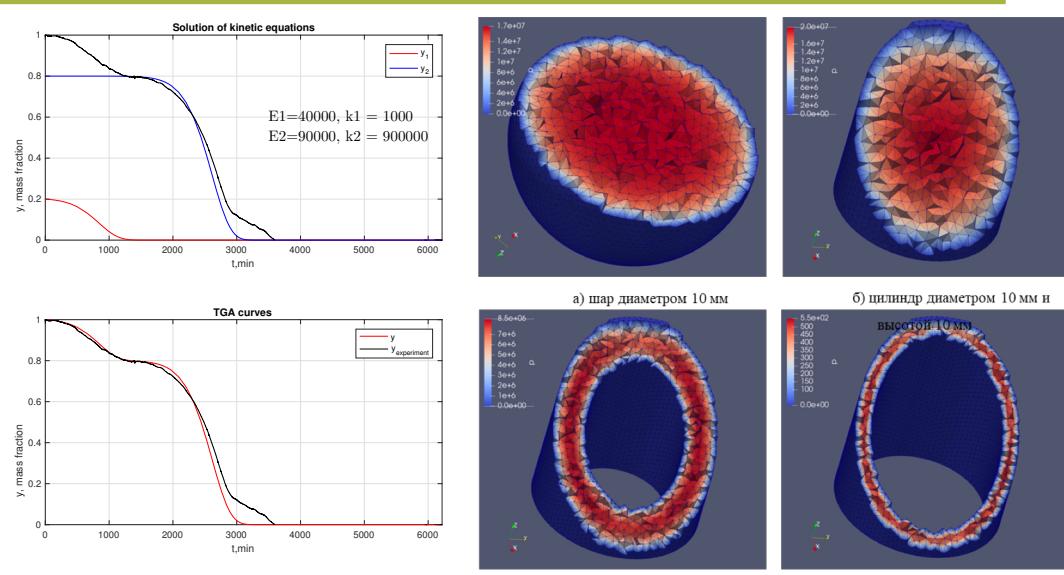
Сравнение с критическими значениями прочности материала

- Sachanandani, R., and Lombardo, S.J. (2011). Modeling of green body strength, internal pressure, and stress in porous ceramic bodies during thermal debinding. *Journal of Ceramic Processing Research* 12, 5–11.
- Feng, Z.C., He, B., and Lombardo, S.J. (2002). Stress Distribution in Porous Ceramic Bodies During Binder Burnout. *Journal of Applied Mechanics* 69, 497.
- Lombardo, S.J., and Feng, Z.C. (2002). Pressure distribution during binder burnout in three-dimensional porous ceramic bodies with anisotropic permeability. *Journal of Materials Research* 17, 1434–1440.

Моделирование процесса термического удаления связующего



Результаты моделирования процесса удаления связующего для кубика со стороной 10 мм и скорости нагрева $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. В зависимости от температуры показаны массовая доля отдельных компонент полимера (а), максимальное и минимальное значение коэффициента диффузии (б), максимальное значение плотности (с) и давления (д) мономера. Давление мономера сравнивается с механической прочностью образцов, измеренной экспериментально. Серым цветом показана область, где происходит разрушение образцов



Расчетные и экспериментальные кривые ТГА при обжиге керамики на основе Al_2O_3 при $\dot{T} = 0.1\text{ K}/\text{мин}$

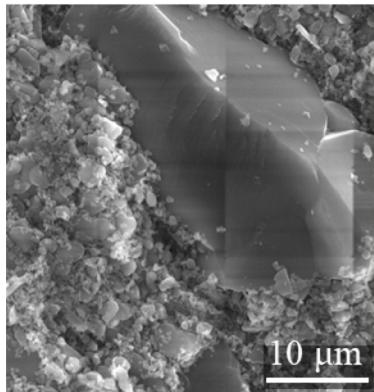
а) шар диаметром 10 мм
б) цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10 мм

в) полый цилиндр со стенкой 4 мм
г) полый цилиндр со стенкой 2 мм

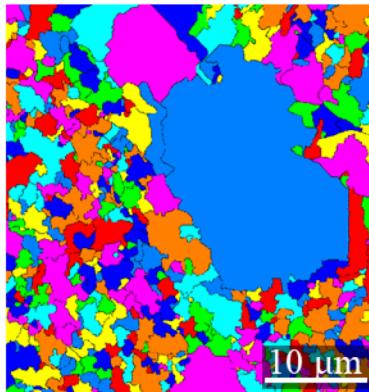
Распределение давления мономера в деталях различной формы при достижении температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пиролизной печи (показаны диагональные разрезы деталей и расчётная неструктурированная сетка)

Механические задачи, моделирование спекания 3D-печатной керамики

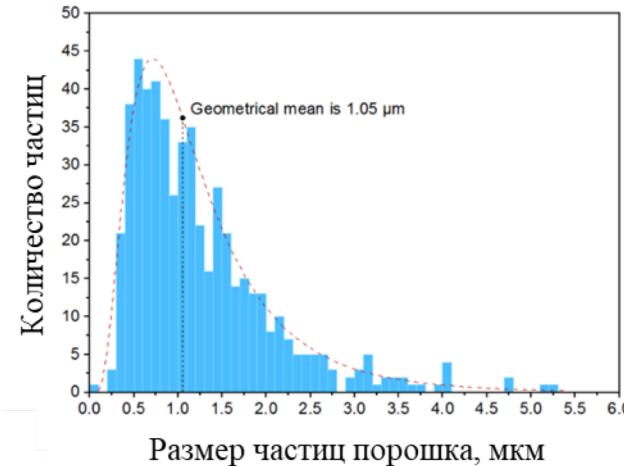
Керамические изделия, изготовленные методом 3D-печати, демонстрируют линейную усадку в процессе спекания в диапазоне 14-25%об. Для качественного прогнозирования процесса усадки и обеспечения точного попадания изделия в заданные размеры проводится численное моделирование процесса спекания.



Изображение SEM



Сегментированное изображение



Распределение размеров частиц порошка в исходной пасте часто следует логнормальному распределению. Среднее значение размера частиц используется в качестве параметра численной задачи.

Механические задачи, моделирование спекания 3D-печатной керамики

Неупругие деформации

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{in} = \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{2G_p} + \frac{(\sigma_m - \sigma_s)}{3K_p} \delta_{ij}$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{in}$ - вязкопластические деформации

δ_{ij} - девиатор напряжений

σ_m - среднее напряжение

G_p - модуль вязкого сдвига

K_p - модуль объемной вязкости

σ_s - напряжения при спекании

Уравнение сохранения массы

$$\dot{\rho} = -\rho \dot{\varepsilon}_{kk}$$

Аналитическая модель

$$G_p = (1 - \theta)^2 \eta(T)$$

$$K_p = \frac{4(1 - \theta)^3}{3\theta} \eta(T)$$

$$\sigma_s = \frac{3\gamma}{r} (1 - \theta)^2$$

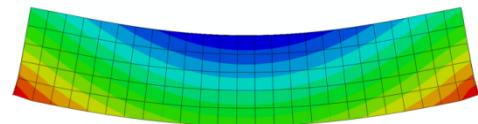
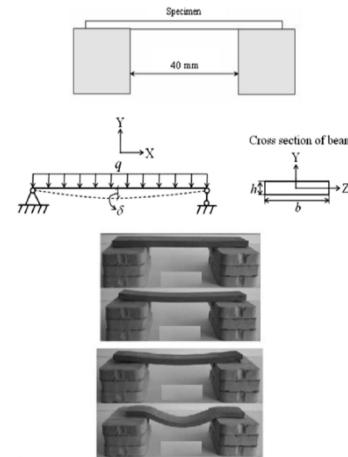
r - средний радиус частиц

γ - удельная поверхностная энергия

$$\eta(T) = AT^n \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

$\eta(T)$ – динамическая вязкость полностью плотной керамики

A, B, n – константы модели



Принципиальная схема проведения тестов на изгиб
при спекании

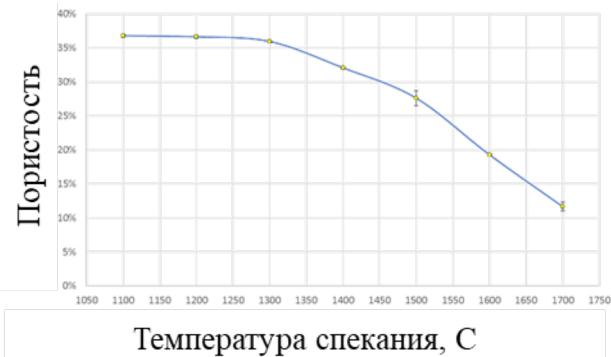
- Olevsky EA (1998) Theory of sintering: from discrete to continuum. Mater Sci Eng R Rep 23:41–100.
- Van Nguyen, Chung et al. (2016). A comparative study of different sintering models for Al2O3. Journal of the Ceramic Society of Japan 124, 301–312.

Механические задачи, моделирование спекания 3D-печатной керамики

Расчеты проводились в программном комплексе ABAQUS при помощи специальных пользовательских подпрограмм, написанных на Fortran

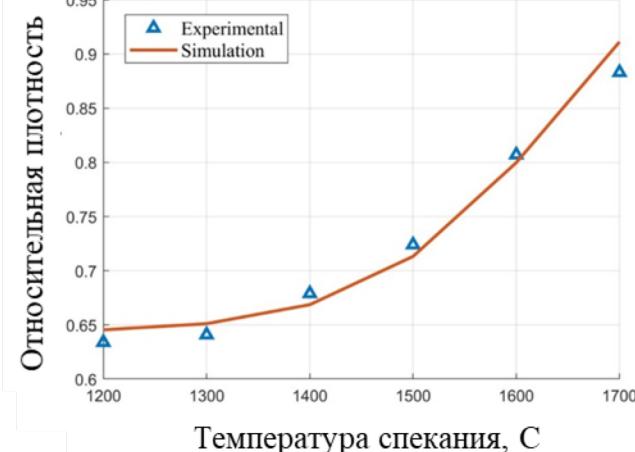
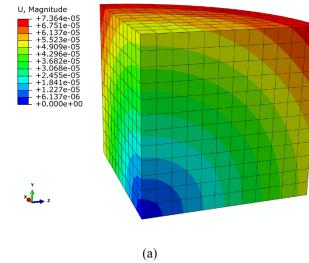


Моделируемый образец керамики 10 x 5 мм



Данные по эволюции пористости материала в зависимости от температуры были получены экспериментальным путем

Для ускорения расчетов моделировалась четверть изделия, используя симметричность. При этом 3D форма сохранялась, в предположении дальнейшего развития модели для несимметричных изделий.



Safonov, A., Chugunov, S., Tikhonov, A., Gusev, M., & Akhatov, I. (2019). Numerical simulation of sintering for 3D-printed ceramics via SOVS model. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.144>

Публикации

1. M. Isachenkov, S. Chugunov, I. Akhatov, I. Shishkovsky, Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure – An overview, *Acta Astronautica* (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.005>.
2. Smirnov, S. Chugunov, A. Kholodkova, M. Isachenkov, A. Vasin, I. Shishkovsky. Progress and challenges of 3D-printing technologies in the manufacturing of piezoceramics. // *Ceramics International*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.243>
3. S. Chugunov, N.A. Adams, I. Akhatov. Evolution of SLA-Based Al₂O₃ Microstructure During Additive Manufacturing Process. *Materials*. MDPI, 13, pp. 3928, 2020, doi:10.3390/ma13183928
4. Safonov A, Maltsev E, Chugunov S, Tikhonov A, Konev S, Evlashin S, Popov D, Pasko A, Akhatov I. Design and Fabrication of Complex-Shaped Ceramic Bone Implants via 3D Printing Based on Laser Stereolithography. *Applied Sciences*. 2020; 10(20):7138. <https://doi.org/10.3390/app10207138>
5. Chugunov, S., Kazak, A., Amro, M., Freese, C., Akhatov, I., "Towards Creation of Ceramic-Based Low Permeability Reference Standards, *Materials*, 2019, 12(23), pp. 3886. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/23/3886>
6. Safonov, A., Chugunov, S., Tikhonov, A., Gusev, M., & Akhatov, I. (2019). Numerical simulation of sintering for 3D-printed ceramics via SOVS model. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.144>

Направления развития в аддитивном производстве керамики

