

РАЗРАБОТКА АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МУЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Каверина Юлия Евгеньевна – аспирант 1 курса технологического института ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Научный руководитель – Мартеха Александр Николаевич, к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Аннотация: разработана аддитивная технология получения мучных изделий, совместимых с экструзией для 3D-печати, с использованием структурирующих свойств крахмала и белков при нагревании при сдвиге. Был разработан термомеханический процесс лабораторного масштаба, который позволил теплоиндуцированными изменениям в организации крахмала и белков увеличить вязкость пшеничного теста. Были исследованы реологические свойства полученного материала и сопоставлены с его качеством и стабильностью 3D-печати.

Ключевые слова: экструзия, 3D-печать, мучные изделия, тесто, реология.

Персонализированное питание является растущей тенденцией потребления продуктов питания за рубежом последние 20 лет. Эта тенденция перекликается с индивидуализацией потребления, наблюдаемой во многих других секторах (автомобилестроение, одежда, технологические объекты и т. д.).

В этом контексте перед производителями пищевых продуктов стоит задача поддержать потребителей в их выборе, диверсифицируя текущее предложение и предлагая им инструменты для облегчения их подхода. Трехмерная печать пищевых продуктов – это технология с огромным потенциалом для объединения «домашней» и персонализированной еды.

В качестве объекта исследований нами были рассмотрены мучные изделия. Использование пшеничной муки в качестве исходного сырья входит в подход к обоснованной формулировке по нескольким пунктам. Во-первых, зерновые – важная часть нашего рациона. Они являются источником сложных углеводов, белков и волокон, необходимых компонентов сбалансированной диеты. В отличие от крахмала, пшеничная мука не явля-

ется пищевой добавкой и может использоваться для приготовления блюд без добавок. С другой стороны, ноу-хау промышленников в производстве и переработке муки в макароны, а затем в готовую продукцию, является активом для перевода производства материалов для печати из лабораторных в промышленные масштабы [1, 2].

Разработка и формование тестовых масс на основе зерновых культур актуальна по нескольким пунктам: посредством механической или термической обработки зерновое сырье можно использовать для контроля реологических свойств материалов и улучшить их возможности печати; состав материала можно разнообразить, добавив помимо текстуры классические кондитерские ингредиенты (сахар, жир) участвующие в узнаваемых ароматах готовых мучных изделий; после термообработки можно получить различные текстуры в зависимости от производственного процесса и содержания воды в готовом изделии [3].

Материалы и методы

Приготовление хлебопекарного теста

Рецептура теста (на 100 г) представляла собой смесь сахарной пудры (6,6 г), сливочного масла (6,0 г), яйца (10,4 г), воды и муки, масса которой варьировалась от 36 до 54 г. Хранящееся в холодильнике сливочное масло размягчали при комнатной температуре в течение 15 мин и тщательно перемешивали с сахарной пудрой в блендере (*Thermomix TM6, Vorwerk*, Германия), затем добавляли яйцо и снова перемешивали до получения однородной массы. Затем муку с низким содержанием клейковины и дистиллированную воду смешивали в смесь до получения однородной смеси. Стандартная рецептура представляла собой смесь сахарной пудры, сливочного масла, муки с низким содержанием глютена, яйца и воды в соотношении 6.6: 6.0: 48: 10.4: 29, в зависимости от веса. Чтобы исследовать влияние ингредиентов на свойства 3D-печати теста для выпечки, были протестированы четыре уровня сахарной пудры, сливочного масла и муки с низким содержанием клейковины. Экспериментальная температура и относительная влажность составили 24,8 °С и 51 % соответственно.

Приготовление макаронного теста

Пшеничную муку (содержание влаги 14,6 % и белки 11,3 %) и дистиллированную воду смешивали с образованием теста с использованием планетарного миксера с подогревом (*Thermomix TM6, Vorwerk*, Германия), оборудованного листовой мешалкой. Температура нагрева емкости смесителя поддерживалась на уровне 85–90 °С. К муке добавляли часть воды и перемешивали в смесителе на скорости 130 об/мин в течение 3 минут с получением теста с 50 % влажностью. Затем к этому тесту добавляли вторую часть воды и перемешивали еще 12 мин для получения теста с влажностью 55 %. Этот процесс применялся для повышения стабильности теста с течением времени и предотвращения фазового разделения теста. Описанные

ниже процессы термообработки проводились на единственном цилиндрическом слое экструдированного материала.

Исследование реологических свойств

Реологические свойства теста различных составов характеризовали с помощью реометра с параллельной пластиной при температуре 25°C. Для определения установившихся вязкостей сдвига скорость сдвига увеличивали с 0,1 до 100 1/с. В этом процессе 3D – печати скорость сдвига экструзии составляла 0,98 1/с. Динамические вязкоупругие свойства характеризовались с использованием режима колебательной частоты [4]. Угловая частота варьировалась от 0,1 до 100 рад/с, и все измерения проводились в пределах выявленной линейной вязкоупругой области и производились при деформации 0,2%. Были записаны модуль упругости (E') и модуль вязкости (E''). Каждое реологическое измерение оценивалось в трех экземплярах с использованием трех различных образцов теста.

Экспериментальная установка для 3D-печати

Прототип пищевого принтера был разработан на базе принтера *Magnit* компании Ирвин. Этот прототип осуществляет трехмерную печать по технологии *Fused Deposition Modeling (FDM)* – наиболее часто используемой технологии 3D-печати в пищевой промышленности. Прототип принтера относится к декартовой конфигурации 3D-принтеров, то есть положение и направление печатающей головки являются функцией декартовых координат точек в пространстве по осям X, Y, Z .

Картридж представляет собой шприц объемом 60 мл. Наибольший диаметр шприца составляет 26 мм, а диаметр сопла – 4 мм. Среди параметров печати, контроль температуры является ключевым, как в процессе экструзии, так и во время сушки после осаждения.

Этот прототип сопла показан на рисунке 1.

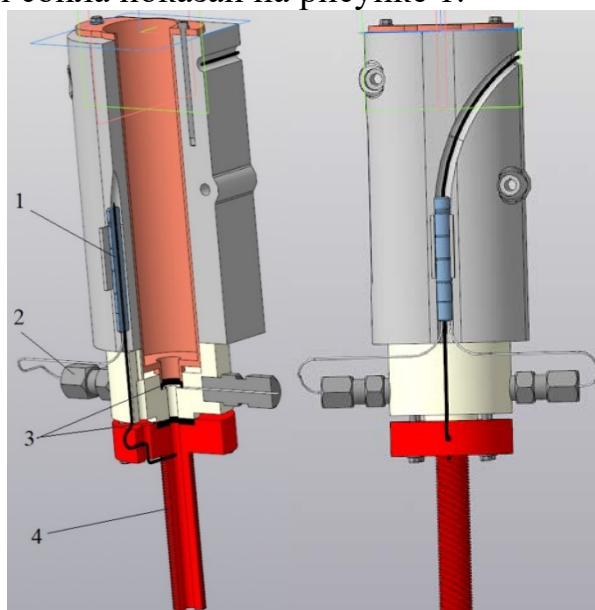


Рис. 1. Прототип печатной головки с нагревательным соплом:

1 – источник питания; 2 – термопара; 3 – уплотнения; 4 – нагревательный блок

Для изготовления соединительного и нагревательного блоков использовали фторопласт из-за его совместимости с пищевыми продуктами, его термомеханических характеристик и простоты обработки. Держатель шприца изготавливается из *PLA* с помощью 3D-печати. Три части прототипа независимы и скручены друг с другом, чтобы облегчить очистку сопла и ограничить работу с термопарами.

Держатель шприца позволяет вводить шприц с продуктом над соединительным блоком и намагничивается на подвижной опоре по оси *X* принтера. Провода питания, термопары и разъем вставляются в вырез, напечатанный для этой цели. Две термопары вводятся через соединения в соединительном блоке, одна измеряет температуру на входе в зону нагрева, а другая измеряет температуру на выходе из зоны нагрева.

Результаты и обсуждения

Оптимизация трехмерной печати хлебопекарного теста

Графические зависимости модуля упругости (E') и модуль вязкости (E'') представлены на рисунках 2,3 соответственно.

Конечные физические свойства 3D-печатной продукции определяются различными рецептурами. Основные физические свойства, влияющие на процесс 3D-печати пищевых продуктов, можно разделить на две категории. Первая категория, которая влияет на экструзионное действие, включает характеристики текучести и модуля вязкости теста. Вторая категория, которая влияет на способность поддерживать трехмерную структуру печатной продукции, включает в себя модуль упругости, прочность на разрыв и адгезию.

Рис. 2. Зависимость модуля упругости (E') от угловой частоты при различном содержании муки на 100 г смеси: 1 – 54 г; 2 – 48 г; 3 – 42 г; 4 – 36 г

Рис. 3. Зависимость модуля вязкости (E'') от угловой частоты при различном содержании муки на 100 г смеси: 1 – 54 г; 2 – 48 г; 3 – 42 г; 4 – 36 г

Модуль упругости был выше, чем модуль вязкости в тестовом линейном вязкоупругом диапазоне, что говорит о возможности образования

эластичной структуры. Оба модуля постепенно увеличивались с увеличением угловой частоты, более того, при одной и той же угловой частоте E' и E'' непрерывно и значительно увеличивались по мере увеличения содержания муки.

На рисунке 4 представлена зависимость эффективной вязкости хлебопекарного теста в зависимости от скорости сдвига при различном содержании муки. Тесто проявляло псевдопластическое поведение с уменьшением вязкости при увеличении скорости сдвига, что крайне желательно для достижения хорошего соответствия формы продукции. Кроме того, при той же скорости сдвига вязкость возрастала по мере увеличения содержания муки в рецептурах.

Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига при различном содержании муки на 100 г смеси: 1 – 54 г; 2 – 48 г; 3 – 42 г; 4 – 36 г

Это явление могло быть связано с тем, что слишком сухой гидроколлоидный материал не способен быть последовательным и стабильным. Мука содержит большое количество крахмала и клейковины с высокой водоудерживающей способностью и вязкоупругостью, большее содержание муки приводит к низкой пластичности и высокой вязкости, модулю вязкости, прочности структуры и прочности на разрыв, что также приводит к тому, что материал легче поддается экструдированию. Этим можно объяснить тот факт, что E' и E'' увеличиваются с добавлением большего количества муки, что приводит к образованию жесткой сети взаимодействий между частицами [5].

Влияние компонентов макаронного теста на качество печати

Изменения модуля упругости (E') и угла потерь ($\tan \delta$) обработанных тестовых заготовок показаны в зависимости от соотношения вода/мука (рисунок 5А и 5В, соответственно).

Однако, когда масса муки превышает определенное пороговое значение, экструдиремость материала ухудшается, и легко возникает разрыв печати, что в конечном итоге влияет на конечный эффект моделирования 3D-печати. Печатные изделия имели наилучшую неповрежденную форму с содержанием муки 48 г/100 г рецептуры, за которой следовали мука 42 и 54 г/100 г рецептуры, тогда как изделия с содержанием муки 36 г/100 г рецептуры имели наиболее неправильную форму.

Рис. 5. Модуль упругости (А) и угол потерь (В), при 1 Гц, по сравнению с измеренными соотношениями вода/мука обработанных тестовых заготовок

Поскольку модуль упругости измеряется при низкой деформации, в концентрированных системах твердых частиц, состоящих из деформируемых частиц, он отражает жесткость системы. В настоящем исследовании это можно объяснить большей мягкостью гранул крахмала, а также белковых нитей и клея между гранулами крахмала из-за более низкой скорости агрегации белка.

Похоже, что при соотношении вода/мука выше 2,0 добавление сахарозы и/или масла в тесто не оказывает никакого эффекта. Содержание воды было наиболее важным фактором с точки зрения смягчения. С другой стороны, при соотношении вода/мука ниже 2,0 модуль упругости теста, содержащего масло, был значительно ниже, чем у теста, не содержащего масла, что означает, что масло само по себе обладает смягчающим эффектом. Влияние сахарозы само по себе на модуль упругости при таком соотношении воды и муки менее очевидно. Все значения угла потерь находились в диапазоне 0,14–0,17, за исключением теста, содержащего 12 мас.% сахарозы, которое имело более высокие значения (0,19 и 0,20). Все тестовые образцы с $\tan\delta < 1$ показали устойчивое поведение. По-видимому, высокое содержание сахарозы приводит к менее структурированным системам с более высокой диссипацией энергии. При используемом здесь соотношении вода/мука крахмал не был полностью желатинизирован, а мягкость основных гранул крахмала была средней. Таким образом, белковые нити, вероятно, являются структурой, на которую больше всего влияет высокое содержание сахарозы.

Качество печати объектов, напечатанных с использованием большинства из этих образцов, было удовлетворительным, даже если диапазон их значений E' был довольно широким (3,8–12 кПа). Однако в этом исследовании качество печати теста, содержащего 12 мас.% сахарозы, было

средним, а также тестовые образцы, содержащие 12 мас.% сахарозы и 7,5 мас.% масла, были еще хуже, хотя их значения E' находились в диапазоне модуля упругости других тестовых образцов для печати. Интересно, что их $\tan\delta$ был значительно выше (0,19 и 0,20 соответственно). Таким образом, качество печати, по-видимому, выше для обработанных тестовых заготовок со значением $\tan\delta$ в диапазоне 0,14-0,17.

Выводы

Процесс горячей экструзии позволил преобразовать тесто, полученное при помощи механической обработки. При прохождении теста через нагревательное сопло печатной головки пищевого 3D-принтера большая часть гранул крахмала клейстеризуется, а белки денатурируются и затем агрегируются, при этом вязкость увеличивается, а нанесенный слой пасты не деформируется под его весом. Мы показали, что рычагом рецептуры первого порядка для адаптации состава с учетом этих факторов вариации является модуляция соотношения вода/мука в составе теста. Увеличение содержания воды приводит к увеличению деформируемости желатинизированных гранул, а также к меньшему структурированию белков, что приводит к снижению вязкости теста без ухудшения ее печатных свойств.

При использовании в сочетании с другим процессом нагревания материала, выходящего из сопла, процесс горячей печати сводит к минимуму время приготовления напечатанной массы. Результаты печати мучных изделий при 50°C перед заполнением картриджа показывают, что печатные свойства теста при горячей экструзии радикально не изменяются. Процесс горячей экструзии является оптимальным для реализации принципа «все в одном» в пищевом принтере.

Библиографический список:

1. Бредихин С.А., Мартеха А.Н., Каверина Ю.Е. Исследование реологической модели макаронного теста для аддитивного производства // Вестник ВГУИТ. – 2021. – Т. 83. №3. – С. 55-60.
2. Бредихин С.А., Мартеха А.Н., Каверина Ю.Е. Исследование структурно-механических свойств макаронного теста для аддитивного производства / С.А. Бредихин, А.Н. Мартеха, Ю.Е. Каверина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2021. – № 4(50). – С. 12-19.
3. Влияние реологических характеристик на качество 3Д-печати пищевых паст / С.А. Бредихин [и др.] // Вестник ВГУИТ. – 2021. – Т. 83. № 2. – С. 40-47.
4. Корреляция реологических свойств с качеством трехмерной печати шоколадной массы / С.А. Бредихин [и др.] // Ползуновский вестник. – 2021. – № 3. – С. 111-116.

5. Оптимизация трехмерной печати хлебопекарного теста / С.А. Бредихин [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2021. – № 5(70). – С. 39-42.

DEVELOPMENT OF ADDITIVE TECHNOLOGY FOR OBTAINING FLOUR PRODUCTS BASED ON THERMOMECHANICAL PROCESSING

Kaverina Yuliya Evgenievna – 1st year postgraduate student of the Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Russian Federation.

Scientific supervisor – Martekha Alexander Nikolaevich, Phd in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Russian Federation.

Abstract: an additive technology has been developed for obtaining flour products compatible with extrusion for 3D printing, using the structuring properties of starch and proteins during shear heating. A laboratory-scale thermomechanical process was developed that allowed heat-induced changes in starch and protein organization to increase the viscosity of wheat dough. The rheological properties of the resulting material were investigated and compared with its quality and 3D printing stability.

Keywords: extrusion, 3D printing, flour products, dough, rheology.