

Научная статья

УДК 532.13: 664.691

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-4-12-19

Исследование структурно-механических свойств макаронного теста для аддитивного производства

С.А. Бредихин, А.Н. Мартеха*, Ю.Е. Каверина

*РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева
Москва, Россия, *man6630@rgau-msha.ru*

Аннотация. Исследованы перемещения воды и влияние скорости нагрева и влагосодержания на реологические и структурные характеристики теста для макаронных изделий с целью определения стабильности теста с течением времени. Образцы размером 150x150x20 мм нагревали от 25 до 80°C в печи при температурах 100 и 150°C для достижения различных скоростей нагрева. Температура измерялась в центре образца и на его поверхности. Реологию образцов после термообработки исследовали с помощью испытаний на растяжение. Рассчитывали предельное напряжение сдвига, модуль Юнга и энергию до предела разрушения. Образцы макаронного теста нагревали от 25 до 90°C при скорости 5°C/мин и колебаниями сжатия 1 Гц. Получены значения фазового угла и модуля упругости, перемещение воды внутри теста для макаронных изделий не обнаружено. Скорость нагрева, а также влагосодержание оказывали влияние на структурные и реологические свойства теста для макарон. Максимальное значение модуля Юнга с уменьшением влагосодержания смещалось в зону более высокого температурного диапазона. Энергия до точки разрыва и предельное напряжение сдвига зависели от скорости нагрева, на размер пор влияет величина влагосодержания. Полученные данные будут использованы при разработке и моделировании аддитивной технологии производства макаронных изделий на основе термомеханической обработки.

Ключевые слова: реология; структурно-механические свойства; аддитивные технологии; макаронное тесто

Original article

Structural and mechanical properties of pasta dough for additive production

Sergey A. Bredihin, Alexander N. Martekha*, Yuliya E. Kaverina

*RSAU–MAA named after K.A. Timiryazeva
Moscow, Russia, *man6630@rgau-msha.ru*

Abstract. The movement of water and the effect of the heating rate and moisture content on the rheological and structural characteristics of the pasta dough were investigated in order to determine the stability of the dough over time. Samples with dimensions of 150x150x20 mm were heated from 25 to 80°C in an oven at the temperatures of 100 and 150°C to achieve different heating rates. The temperature was measured in the center of the sample and on its surface. The rheology of the samples after heat treatment was investigated using tensile tests. The ultimate shear stress, Young's modulus and the energy to fracture limit were calculated. Samples of pasta dough were heated from 25 to 90°C at a rate of 5°C/min and compression oscillations of 1 Hz. The values of the phase angle and modulus of elasticity were obtained; the movement of water inside the dough for pasta was not detected. The heating rate as well as the moisture content influenced the structural and rheological properties of the pasta dough. The maximum value of Young's modulus with a decrease in moisture content shifted to a zone of a higher temperature range. The energy to the point of rupture and the ultimate shear stress depended on the heating rate; the pore size was influenced by the value of the moisture content. The data obtained will be used in the development and modeling of an additive technology for the production of pasta based on thermomechanical processing.

Keywords: rheology; structural and mechanical properties; additive technologies; pasta dough

Введение

Пищевое сырье растительного происхождения при переработке продуктов питания подвергается различным механическим воздействиям, при этом производственные процессы организуются таким образом, чтобы обеспечить максимально высокий уровень качества готового продукта. Примером такого процесса является экструзионная 3D-печать пищевых продуктов, в частности, макаронных изделий. Решению задачи по обеспечению высокого уровня качества готового изделия в процессе трехмерной

печати способствует изучение структурно-механических и реологических свойств пищевых продуктов. Определение таких параметров, как вязкость, модуль упругости, предельное напряжение сдвига способствует прогнозированию и моделированию поведения продукта во время истечения из сопла печатной головки, а также определению оптимальных параметров при аддитивном производстве [1].

Авторы [2] сообщили о вязкопластичном поведении макаронных изделий и структурных трансформациях, которые макаронные изделия проявляют при изменении содержания влаги и температуры. Другие исследователи изучали реологическое поведение макаронных изделий, обогащенных манной крупой с помощью фаринографических исследований [3]. Однако недостаточно изучено поведение теста во время экструзии с реологической точки зрения.

Почти все продукты перед употреблением проходят термическую обработку. В процессе нагрева происходит множество различных физических, химических и структурных изменений, например, диффузия тепла и воды, клейстеризация крахмала, денатурация белков, образование ароматических соединений и т.п. Все эти явления влияют на качественные свойства конечного продукта и сложным образом взаимодействуют друг с другом.

Температурный градиент во влажном пористом материале с непрерывной системой пор, который применяется к большинству пищевых продуктов, вызывает градиент парциального давления водяного пара. Этот градиент приводит к диффузии водяного пара к более холодным областям материала, где он может конденсироваться. Интересно оценить, как перенос влаги, то есть ее количественное содержание, влияет на структурно-механические свойства продуктов во время процесса нагревания. Перемещение воды может привести к структурным и реологическим изменениям в тех зонах продукции, где, например, влагосодержание увеличилось. Скорость нагрева и взаимодействие между скоростью нагрева и влагосодержанием также могут влиять на структурные и реологические свойства, которые напрямую связаны с качеством продукции [4].

В обзорной статье о крахмале авторы пришли к выводу, что температура и энтальпия набухания увеличивается с уменьшением влагосодержания для данного типа крахмала. При исследовании картофельного крахмала с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии можно было наблюдать, что он имел эндотермический пик примерно при 66°C для высоких концентраций воды. Для более низких концентраций воды появился второй пик, который сдвигался в сторону более высоких температур по мере уменьшения влагосодержания. Это характерная реакция, которая наблюдалась с различными видами крахмала [5, 6].

В исследовании по выпечке хлеба оценивалась диффузия воды в процессе выпечки. Результаты эксперимента показали отсутствие перемещения воды в тесте, имеющем систему, состоящую из дискретных пор. Когда из теста формируется мякиш, система пор открывается и начинается диффузия влаги [7, 8].

Цель настоящего исследования – определить влияние влагосодержания и скорости нагрева на структурно-механические свойства макаронного теста с последующим использованием этих данных при разработке и моделировании аддитивной технологии производства макаронных изделий на основе термомеханической обработки.

Объекты и методы исследования

Подготовка образцов. Тесто для макаронных изделий готовили с использованием пшеничной муки и воды. Процесс приготовления осуществляли с двумя различными содержаниями воды: первый образец содержал 39,5 г воды на 100 г теста (низкое влагосодержание), а второй – 41 г воды на 100 г теста (высокое влагосодержание). В лабораторной печи устанавливали две различные температуры 100 и 150°C, для достижения двух разных скоростей нагрева 0,6°C/мин (низкая скорость нагрева) и 2°C/мин (высокая скорость нагрева) в центре образцов. Для теста использовали следующие содержание муки и воды: первый образец содержал 1400 г пшеничной муки и 600 г воды, второй образец – 1400 г пшеничной муки и 650 г воды. Пшеничная мука содержала 11 г белка, 2 г жира, 68 г углеводов и 12,8 г воды на 100 г муки.

В исследовании был применен двухфакторный эксперимент. В качестве переменных факторов были выбраны влагосодержание и скорость нагрева. Чтобы определить влияние влагосодержания, скорости нагрева и взаимодействия между ними, результаты были оценены с помощью дисперсионного анализа.

Приготовление теста и термообработка. Ингредиенты для теста смешивали в миксере Bear Varimixer при 80 об/мин в течение 2 мин и при 190 об/мин в течение 3 мин. Затем тесто раскатывали в пластину толщиной 20 мм, и из нее вырезали квадратные образцы размером 150x150 мм. Термопары помещали в образцы и нагревали в печи до достижения температуры в центре изделия 80°C. После нагрева образцы оставляли охлаждаться на 60 мин. Всего было приготовлено 20 различных партий теста, из каждой были вырезаны по два-три квадратных образца. В исследовании использовалась лабораторная печь Neгаeus без принудительной конвекции.

Измерение влагосодержания и температуры. Локальное содержание воды было измерено с помощью метода ближней инфракрасной спектроскопии (БИКС). Прибор NIRS DS2500 Analyzer очень чувствителен к температуре и структурным изменениям в образцах. В такой спектроскопии сигнал калибруется, чтобы избежать влияния изменений этих параметров. Однако, если сигнал не откалиброван по этим параметрам, его можно использовать для оценки структурных изменений в образцах. Некалиброванный сигнал использовался в исследовании для определения возможности измерить какие-либо различия между образцами и коррелировать эти различия со структурными изменениями [9].

Во время нагрева образцов в печи оптическое волокно помещалось в центр образцов. Температуры в печи и в образцах измерялись медно-константановыми термопарами. Термопары располагались в центре и на поверхности образцов. Двадцать образцов из 10 различных партий теста использовали для измерений в ближней инфракрасной области и температуры. Сразу после нагрева из центра и с поверхности образцов вырезались небольшие части. Их взвешивали и сушили в течение 10 ч при 105°C, а затем снова взвешивали для определения содержания воды.

Измерение больших деформаций. Структурно-механические свойства образцов, нагретых в печи, изучали путем увеличения напряжения до разрушения с использованием прибора МИМ при постоянной скорости испытания 10 мм/мин. Были измерены сила и прогиб, рассчитаны модуль Юнга, предельное напряжение сдвига и энергия до разрушения. Модуль Юнга, называемый также модулем продольной упругости и модулем упругости первого рода, – это важная механическая характеристика вещества, являющаяся мерой сопротивляемости продольным деформациям, и определяет степень жесткости. Предельное напряжение сдвига описывает способность образца выдерживать высокие нагрузки без разрушения. Площадь фигуры под кривой характеризует энергию, запасенную в образце до разрушения.

Центры образцов разрезали на 16 элементов размером 10x10x20 мм и отрезали корку. Образцы приклеивались к параллельной пластине, установленной в приборе, и вдоль двух сторон образца перпендикулярно направлению удлинения делалась выемка для предотвращения их разрушения на границе раздела. Затем образцы растягивали до разрушения. Для испытаний на растяжение использовали шестнадцать образцов из 12 различных партий теста.

Измерение малых деформаций. Влияние влагосодержания на структурные изменения в необработанном тесте во время процесса нагревания изучали с использованием динамико-механического анализа на приборе Структурометр СТ-2. Температуру повышали с 25 до 90°C со скоростью нагрева 5°C/мин и колебаниями сжатия 1 Гц.

Два необработанных образца теста с высоким и низким содержанием влаги подвергали нагреву во время измерения. Цилиндрические тестовые заготовки диаметром 25 мм и высотой 8 мм помещались между двумя параллельными пластинами. Вокруг цилиндрической тестовой заготовки было залито силиконовое масло, чтобы предотвратить его высыхание при нагревании. Во время нагрева измеряли фазовый угол и модуль упругости. Для исследований динамико-механического анализа макаронного теста были использованы восемь цилиндрических образцов из шести различных партий теста.

Результаты и обсуждение

Некалиброванный сигнал влагосодержания, измеренный с помощью ближней инфракрасной спектроскопии, показал увеличение сигнала до 60°C, а затем снижение до примерно того же значения, что и до нагрева, когда температура достигла 90°C (рисунок 1).

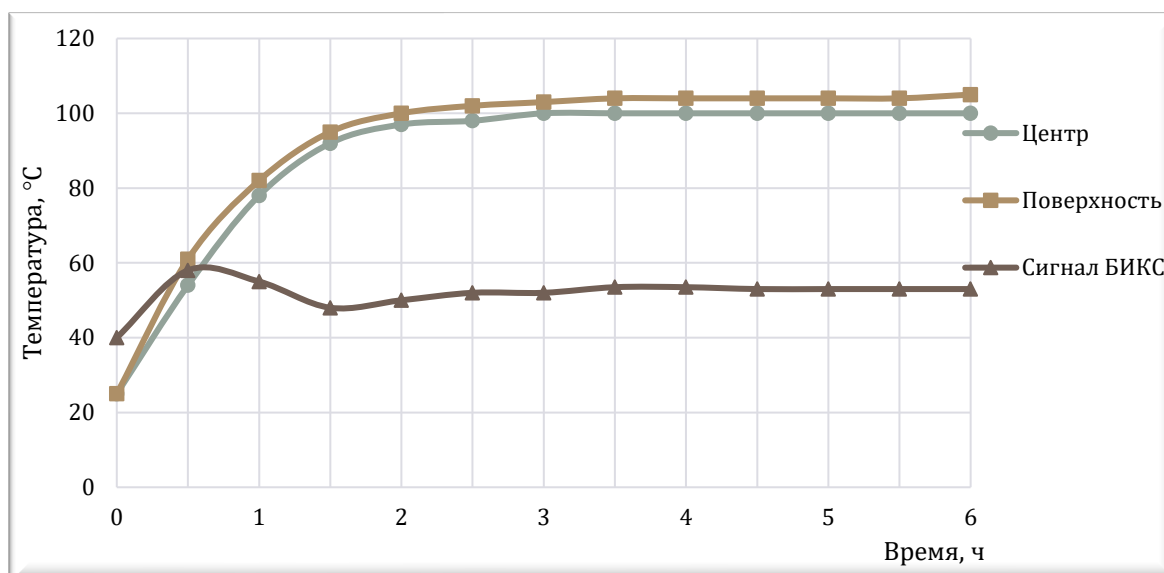


Рисунок 1 – Влияние времени нагрева на температуру теста (на поверхности и в центре) с наложением сигнала БИКС

Figure 1. Influence of heating time on dough temperature (surface and center) with overlaid moisture analyzer signal

Смещение возрастающего сигнала к уменьшающемуся происходил при разных температурах для разных образцов, это смещение можно интерпретировать как структурное изменение в образце. Минимальная температура была достигнута при скорости нагрева 0,6°C/мин с высоким влагосодержанием (ВВ), а максимальная при скорости нагрева 2°C/мин с низким влагосодержанием (НВ).

Структурно-механические изменения измеряли с помощью динамико-механического анализа при скорости нагрева 5°C/мин. На рисунках 2 и 3 показаны зависимости модуля упругости и фазового угла от температуры в центре образцов с высоким и низким влагосодержанием. Модуль упругости начинает увеличиваться при 50°C и достигает максимума примерно при 70°C для образцов ВВ и 80°C для НВ. После достижения максимума, модуль упругости снова уменьшился. Пик на графике указывает на то, что в образце произошло структурное изменение. Фазовый угол в образце теста уменьшался во время нагрева.

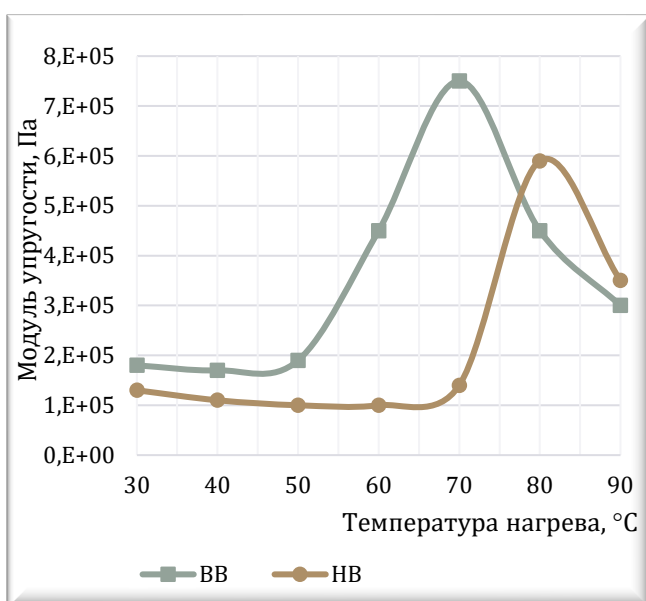


Рисунок 2 – Зависимость модуля упругости теста от температуры нагрева

Figure 2. Dependence of the elastic modulus of the dough on the heating temperature

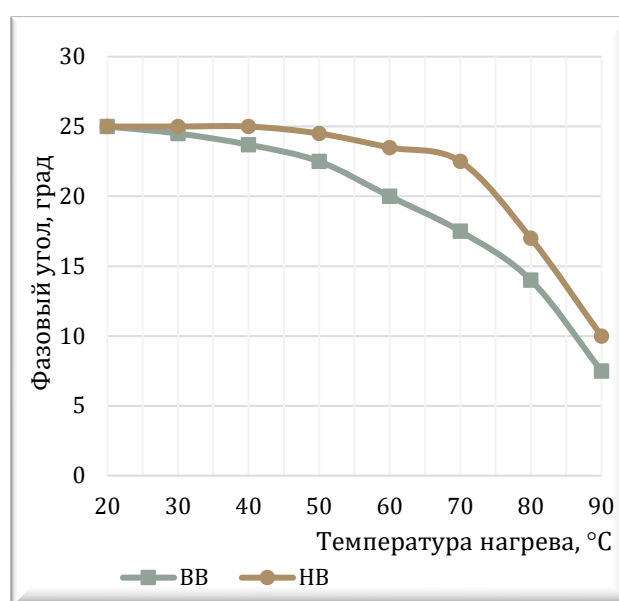


Рисунок 3 – Зависимость фазового угла теста от температуры нагрева

Figure 3. Dependence of the phase angle of the dough on the heating temperature

Измерения влагосодержания как в экспериментах по взвешиванию/сушке, так и в калиброванных измерениях в ближнем ИК диапазоне показывают, что влагосодержание в центре образца во время нагревания остается постоянным и что отсутствует макроскопический перенос влаги к центру макаронного теста.

При наличии градиента температуры в пористом материале возникает градиент парциального давления водяного пара, который приводит к перемещению последнего в более холодные области, где парциальное давление ниже [10–12].

Поскольку результаты показывают, что внутри макаронного теста почти отсутствует перенос влаги, система пор в тесте, вероятно, состоит из дискретных областей и, таким образом, не является непрерывной. Все это хорошо коррелируется с исследованиями в хлебопечении о том, что пока хлебопекарное тесто не превратилось в мякиш, система пор не является непрерывной, и водяной пар не может перемещаться. Кроме того, макаронное тесто плотнее хлебопекарного из-за процесса ферментации, поэтому объем водяного пара в макаронном тесте ограничен. Таким образом, показано, что тесто для макаронных изделий является почти идеальной системой для изучения влияния влагосодержания и скорости нагрева на структурные и реологические свойства во время нагрева [13–15].

Изменение локального влагосодержания происходит при разных температурах для разных типов образцов. Смещение происходит при минимальной температуре при скорости нагрева $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ с ВВ и при максимальной температуре при скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ с НВ. При повышении температуры гранулы крахмала начинают набухать и впитывать влагу. В образцах с ВВ частицам крахмала легче абсорбировать влагу, чем в среде с НВ, где они должны сильнее сопротивляться сетке клейковины. В связи с этим в образцах с НВ набухание будет ограничиваться и протекать при более высокой температуре. При скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ гранулы крахмала имеют меньше времени для поглощения влаги, чем при скорости $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, что также может задерживать или ограничивать набухание.

Исследования малых деформаций показывают, что существует максимальное значение модуля упругости, т.е. он сначала увеличивается, а затем снова уменьшается (рисунок 2, 3). Увеличение, вероятно, связано с набуханием гранул крахмала, которые изначально имеют кристаллическую структуру и овальную форму. Примерно при 70°C абсорбция воды гранулами быстро увеличивается, и выходит большое количество амилозы. Гранулы теряют кристалличность и становятся аморфными, в этот же температурный диапазон клейковина денатурируется. Сочетание этих эффектов, вероятно, приводит к уменьшению модуля упругости. Несмотря на то, что разница во влагосодержании образцов составляла всего 1,5 г воды на 100 г теста, максимальное значение модуля упругости для образцов с НВ наблюдалось при температуре на 10°C выше, чем для образцов с ВВ.

Результаты по изменению массы образцов, нагретых в лабораторной печи, не показали разницы во влагосодержании в центральной части образцов по сравнению с необработанным тестом, однако поверхность начала высыхать.

Структурно-механические свойства термообработанных образцов оценивали по измерениям больших деформаций. Скорость нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ привела к более высоким значениям модуля Юнга (рисунок 4). Максимальное значение модуля Юнга было получено при скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ с НВ.

В обоих случаях предельное напряжение сдвига было больше при скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Для образцов с НВ и скоростью сдвига $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ требовалось больше усилия для разрушения, чем для образцов с ВВ. Наблюдалась тенденция к эффектам взаимодействия между влагосодержанием и скоростью нагрева. Образцы с ВВ и скоростью нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ имели более высокое значение предельного напряжения сдвига, чем образцы с ВВ и скоростью нагрева $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Энергия, необходимая для разрушения быстро нагретых образцов, была больше, чем для медленно нагретых. Кроме того, наблюдался эффект взаимодействия между влагосодержанием и скоростью нагрева, а именно образцам с ВВ и скоростью нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ требовалось больше энергии для разрушения, чем при скорости нагрева $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

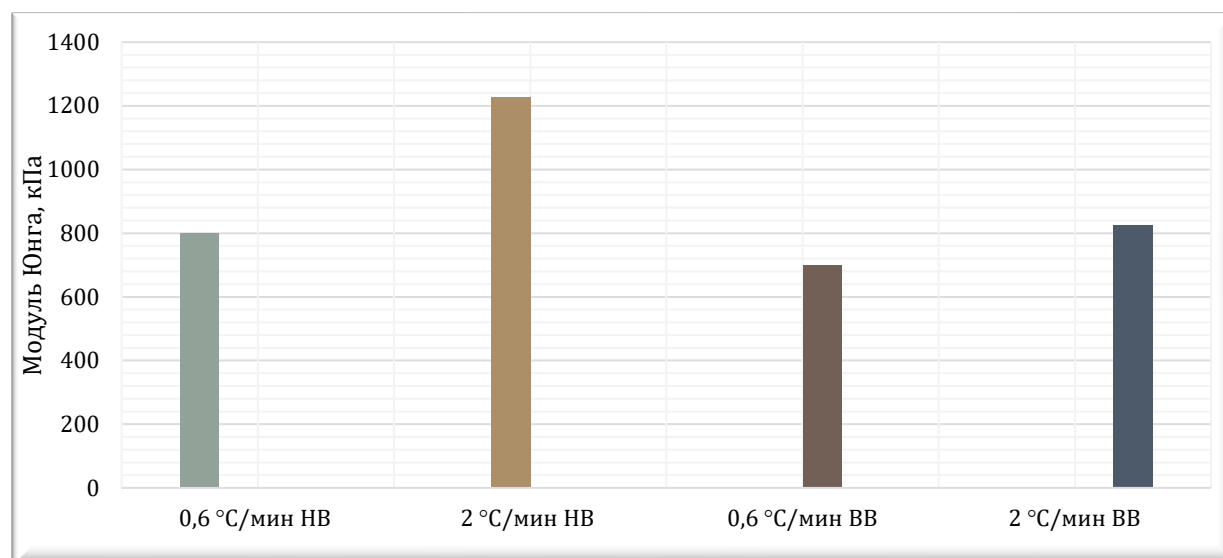


Рисунок 4 – Распределение модуля Юнга при растяжении в зависимости от влагосодержания и скорости нагрева
Figure 4. Distribution of Young's modulus in tension depending on water content and heating rate

Исследования больших деформаций показывают, что образцы с НВ и скоростью нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ были наиболее упругими, т. е. имели самые высокие значения модуля Юнга (рисунок 4). Образцы с НВ и скоростью нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ достигают максимума в сигнале БИКС при максимальной температуре 80°C , то есть температуры извлечения из лабораторной печи. Скорость нагрева также влияет на предельное напряжение сдвига, при скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ образцы обладают более высоким предельным напряжением сдвига, чем при скорости нагрева $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. При скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ у гранул крахмала не было времени для набухания и желатинизации, что могло повлиять на предельное напряжение сдвига.

Скорость нагрева влияет на энергию, необходимую для разрушения, а при скорости $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ на нее также влияет влагосодержание. При скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ требовалось больше энергии для разрыва. Поскольку эти образцы обладали самым высоким значением предельного напряжения сдвига, вероятно, способность образца выдерживать высокое напряжение без разрушения дает более высокую энергию. При скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ влагосодержание также влияло на энергию, необходимую для разрыва и при этом не влияло на предельное напряжение сдвига. Это означает, что увеличение влагосодержания макаронного теста дает более растяжимый образец, что может означать, что влага действует как пластификатор [16].

При скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ образцы имели поры меньшего диаметра, чем при скорости $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, при этом они имели самое высокое значение предельного напряжения сдвига в испытаниях на большую деформацию. На пористость образца влияла не только скорость нагрева, но и влагосодержание, так в образцах с НВ наблюдалось уменьшение пор. При скорости нагрева $0,6^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в образцах с НВ наблюдалось более высокое значение предельного напряжения сдвига, указывающее на то, что крупные поры уменьшают способность образца выдерживать высокие нагрузки без разрушения [17].

Выводы

Не было обнаружено перемещения влаги внутри теста для макаронных изделий во время термообработки в лабораторной печи при температуре в центре изделия 80°C .

При нагревании имело место пиковое значение модуля упругости. На температуру, при которой значение модуля упругости достигает максимума, влияет влагосодержание образца. Для максимального значения модуля упругости образцы с ВВ обладали более низкой температурой. В образцах с ВВ частицам крахмала легче абсорбировать влагу, чем в среде с НВ, где они должны сильнее сопротивляться сетке клейковины. При разнице в содержании влаги $1,5$ г воды на 100 г теста максимальное значение модуля упругости для образцов с НВ наблюдалось при температуре на 10°C выше, чем для образцов с ВВ. Максимальное значение модуля упругости с увеличением влагосодержания и уменьшением скорости

нагрева смещалось в сторону более низких температур. При скорости нагрева 2°C/мин гранулы крахмала имеют меньше времени для поглощения воды, что способствует более высокой температуре набухания.

При скорости нагрева 2°C/мин образцы имели поры меньшего диаметра, чем при скорости 0,6°C/мин, при этом они имели самое высокое значение предельного напряжения сдвига в испытаниях на большую деформацию. При скорости нагрева 0,6°C/мин в образцах с НВ наблюдалось более высокое значение предельного напряжения сдвига. Более быстрое нагревание привело к более высоким значениям модуля Юнга. Образцы с НВ и скоростью нагрева 2°C/мин были наиболее упругими, т. е. имели самые высокие значения модуля Юнга. Энергия, необходимая для разрушения быстро нагретых образцов, была больше, чем для медленно нагретых. Полученные результаты будут использованы при прогнозировании и моделировании поведения макаронного теста во время истечения из сопла печатной головки, а также при определении оптимальных параметров печати в аддитивном производстве. Дальнейшие исследования будут направлены на получение кривых течения и определение влияния параметров 3D-печати в процессе аддитивного производства макаронных изделий.

Литература

1. Березовский Ю.М., Бредихин С.А., Андреев В.Н., Мартыха А.Н. Инженерная реология. Физико-механические свойства и методы обработки пищевого сырья. СПб.: Изд-во Лань, 2021. 192 с.
2. Chillo S., Civica V., Iannetti M., Mastromatteo M., Suriano N., Del Nobile M.A. Influence of repeated extrusions on some properties of non-conventional spaghetti. *Journal of Food Engineering*. 2010, V. 100, Is. 2, pp. 329–335.
3. Doxastakis G., Papageorgiou M., Mandalou D., Irakli M., Papalamprou E., D'Agostina A., Resta D., Boschin G., Arnoldi A. Technological properties and non-enzymatic browning of white lupin protein enriched spaghetti. *Food Chemistry*. 2007, V. 101, Is. 1, pp. 57–64.
4. Коган В.В., Семенова Л.Э. Инженерная реология в пищевой промышленности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 4. С. 147–156.
5. Крякунова Е.В., Михайлова О.С., Канарский А.В., Казаков Я.В. Влияние вязкости крахмала картофельного на физико-механические свойства волокнистых материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 18. С. 173–176.
6. Руськина А.А., Потороко И.Ю., Малинин А.В., Цатуров А.В. Влияние эффектов ультразвука на реологические свойства клейстеров картофельного крахмала // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2019. Т. 7. № 1. С. 89–96.
7. Верхивкер Я.Г., Мирошниченко Е.М., Петькова О.В. Вода в технологии производства хлебобулочных изделий с отложенной выпечкой // Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 1. С. 31–39.
8. Широкова Л.О., Веселова А.Ю. Формирование структурно-механических свойств бараночных изделий на отдельных стадиях технологического процесса // Хлебопродукты. 2016. № 3. С. 56–57.
9. Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Экспресс-оценка содержания масла и влаги в семенах масличного льна с помощью ИК-спектроскопии // Масличные культуры. 2020. № 3(183). С. 63–70.
10. Прибытков А.В., Овсянников В.Ю., Мартыха А.Н., Торопцев В.В. Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 5. С. 33–35.
11. Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Мартыха А.Н. Параметры процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в виброкипящем слое // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 12. С. 54–55.
12. Жучков А.В., Прибытков А.В., Черемушкина И.В., Мартыха А.Н. Математическое моделирование процесса сушки модифицированного корма // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 2(56). С. 100–105.
13. Peressini D., Cavarape A., Brennan M.A., Gao J., Brennan C.S. Viscoelastic properties of durum wheat doughs enriched with soluble dietary fibres in relation to pasta-making performance and glycaemic response of spaghetti. *Food Hydrocolloids*. 2020, V. 102, article 105613.
14. Chen G., Li Y. Aggregation behavior of semolina gluten during dough production and fresh pasta cooking upon kansui treatment. *Food Chemistry*. 2019, V. 278, pp. 579–586.
15. Romero H.M., Santra D., Rose D., Zhang Y. Dough rheological properties and texture of gluten-free pasta based on proso millet flour. *Journal of Cereal Science*. 2017, V. 74, pp. 238–243.
16. Iuga M., Mironeasa S. Application of heat moisture treatment in wheat pasta production. *Food Control*. 2021, V. 128, article 108176.
17. Ovsyannikov V.Yu., Toroptsev V.V., Berestovoy A.A., Lobacheva N.N., Lobacheva M.A., Martekha A.N. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, article 052011.

References

1. Bredihin S.A., Andreev V.N., Berezovskiy Yu.M., Martekha A.N. *Engineering rheology. Physical and mechanical properties and methods of processing food raw materials*. St. Petersburg, Lan. 2021. 192 p. (In Russian)
2. Chillo S., Civica V., Iannetti M., Mastromatteo M., Suriano N., Del Nobile M.A. Influence of repeated extrusions on some properties of non-conventional spaghetti. *Journal of Food Engineering*. 2010, V. 100, Is. 2, pp. 329–335.
3. Doxastakis G., Papageorgiou M., Mandalou D., Irakli M., Papalamprou E., D'Agostina A., Resta D., Boschin G., Arnoldi A. Technological properties and non-enzymatic browning of white lupin protein enriched spaghetti. *Food Chemistry*. 2007, V. 101, Is. 1, pp. 57–64.
4. Kogan V.V., Semenova L.E. Engineering rheology in the food industry. *Proceedings of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. 2019, no. 4, pp.147–156. (In Russian)
5. Kryakunova E.V., Mikhailova O.S., Kanarsky A.V., Kazakov Ya.V. The effect of the viscosity of potato starch on the physical and mechanical properties of fibrous materials. *Proceedings Kazan Technological University*. 2014, V. 17, no. 18, pp. 173–176. (In Russian)
6. Ruskina A.A., Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V. Influence of the effects of ultrasound on the rheological properties of potato starch pastes. *Proceedings South Ural State University Food and Biotechnology*. 2019, V. 7, no. 1, pp. 89–96. (In Russian)
7. Verkhivker, Ya.G., Miroshnichenko E.M., Petkova O.V. Water in delayed baked goods production technology. *Food Systems*. 2021, V. 4, no. 1, pp. 31–39. (In Russian)
8. Shirokova, L.O., Veselova A.Yu. Formation of structural and mechanical properties of donut products at certain stages of the technological process. *Khleboprodukty*. 2016, no. 3, pp. 56–57. (In Russian)
9. Efimenko S.G., Efimenko S.K. Rapid assessment of oil and moisture content in oil flax seeds using IR spectrometry. *Maslichnye kultury*. 2020, no. 3(183), pp. 63–70. (In Russian)
10. Pribytkov A.V., Ovsyannikov V.Yu., Martekha A.N., Toroptsev V.V. The main factors affecting the kinetics of the drying process of fermented wheat raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*. 2015, no. 5, pp. 33–35. (In Russian)
11. Antipov S.T., Ovsyannikov V.Yu., Martekha A.N. Parameters of the drying process of fermented wheat raw materials in a vibrating-boiling bed. *Storage and Processing of Farm Products*. 2013, no. 12, pp. 54–55. (In Russian)
12. Zhuchkov A.V., Pribytkov A.V., Cheremushkina I.V., Martekha A.N. Mathematical modeling of the modified feed drying process. *Proceedings Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013, no. 2(56), pp. 100–105. (In Russian)
13. Peressini D., Cavarape A., Brennan M.A., Gao J., Brennan C.S. Viscoelastic properties of durum wheat doughs enriched with soluble dietary fibres in relation to pasta-making performance and glycaemic response of spaghetti. *Food Hydrocolloids*. 2020, V. 102, article 105613.
14. Chen G., Li Y. Aggregation behavior of semolina gluten during dough production and fresh pasta cooking upon kansui treatment. *Food Chemistry*. 2019, V. 278, pp. 579–586.
15. Romero H.M., Santra D., Rose D., Zhang Y. Dough rheological properties and texture of gluten-free pasta based on proso millet flour. *Journal of Cereal Science*. 2017, V. 74, pp. 238–243.
16. Iuga M., Mironeasa S. Application of heat moisture treatment in wheat pasta production. *Food Control*. 2021, V. 128, article 108176.
17. Ovsyannikov V.Yu., Toroptsev V.V., Berestovoy A.A., Lobacheva N.N., Lobacheva M.A., Martekha A.N. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, article 052011.

Информация об авторах

Сергей Алексеевич Бредихин – д-р техн. наук, зав. кафедрой процессы и аппараты перерабатывающих производств
Александр Николаевич Мартеха – канд. техн. наук, доцент кафедры процессы и аппараты перерабатывающих производств
Юлия Евгеньевна Каверина – аспирант кафедры процессы и аппараты перерабатывающих производств

Information about the authors

Sergey A. Bredikhin, D. Sc., Head of Department of Processes and Devices of Processing Industries
Alexander N. Martekha, Ph.D., Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Processing Industries
Yulia E. Kaverina, postgraduate student of the Department of Processes and Devices of Processing Industries

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 20.09.2021

Одобрена после рецензирования 22.11.2021

Принята к публикации 30.11.2021

The article was submitted 20.09.2021

Approved after reviewing 22.11.2021

Accepted for publication 30.11.2021