



Научная статья
05.18.15 – Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания (технические науки)
УДК 664: 001.895
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015

КОРРЕЛЯЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С КАЧЕСТВОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ МАССЫ

Сергей Алексеевич Бредихин¹, Владимир Николаевич Андреев²,
Александр Николаевич Мартеха³, Юрий Михайлович Березовский⁴

^{1, 2, 3} Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

⁴ Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, Москва, Россия

¹ bredihin2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

² andr64.64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>

³ man6630@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

⁴ birjuza1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1002-2580>

Аннотация. В экструзионной 3D-печати реологические свойства пищевых продуктов имеют решающее значение для достижения качественной печати. Целью данного исследования является изучение потенциальных корреляций между печатаемостью шоколадной массой и реологическими характеристиками. Экспериментальные данные получены в аккредитованной лаборатории Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова. В нашем исследовании мы применили метод роторно-шнековой экструзии для дозирования тертого шоколада. Для достижения качественных показателей 3D-конструкций необходимо прогнозировать физические свойства исходного материала. Были оценены толщина стенки, высота и диаметр, вес, а также свойства плавления и текучести 3D-печатного шоколада. Реологические данные использовались для оптимизации важных параметров используемого 3D-принтера, таких как скорость осаждения и температура подложки при экструзии. Хорошая печатная способность на подложке была достигнута путем прогнозирования поведения потока шоколада при постоянной скорости сдвига и определением температуры плавления шоколада путем регистрации спада вязкости во время теста на повышение температуры при постоянной скорости сдвига. Определена температура материала перед осаждением, которая поддерживалась на уровне 32 °С с целью выдавливания расплавленной шоколадной массы. Были проведены реологические исследования путем измерения динамической вязкости шоколадной массы от времени и температуры при постоянных скоростях сдвига 50 и 100 1/с. Сделаны выводы, что вязкость шоколада остается относительно постоянной при скорости сдвига выше 50 1/с, а также в испытываемом диапазоне температур она имела линейную тенденцию к снижению.

Ключевые слова: трехмерная печать, шоколадная масса, оптимизация, реологические характеристики, качество печати.

Для цитирования: Корреляция реологических свойств с качеством трехмерной печати шоколадной массы / С. А. Бредихин [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 111–116. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015.

Original article

CORRELATION BETWEEN RHEOLOGICAL PROPERTIES AND QUALITY THREE-DIMENSIONAL PRINTED CHOCOLATE MASS

Sergey A. Bredikhin ¹, Vladimir N. Andreev ², Alexander N. Martekha ³,
Yuriy M. Berezovskiy ⁴

^{1,2,3} Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

⁴ Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems, Moscow, Russia

¹ bredihin2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

² andr64.64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>

³ man6630@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

⁴ birjuza1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1002-2580>

Abstract. *The rheological properties of food are critical to achieving quality printing in extrusion 3D printing. The aim of this study is to investigate the potential correlations between the printability of chocolate mass and rheological characteristics. The experimental data were obtained in the accredited laboratory of the Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems. To inject chopped chocolate in our experimental studies, the method of screw-rotary extrusion was used. To achieve the quality indicators of 3D structures, it is necessary to predict the physical properties of the starting material. The wall thickness, height and diameter, weight, and melting and flow properties of 3D printed chocolate were evaluated. Rheological data were used to optimize important parameters of the 3D printer used, such as deposition rate and substrate temperature during extrusion. Good printability on the substrate was achieved by predicting the flow behavior of the chocolate at a constant shear rate and determining the melting point of the chocolate by recording the drop in viscosity during a temperature rise test at a constant shear rate. The temperature of the material before deposition was determined, which was maintained at 32 ° C in order to squeeze out the molten chocolate mass. Rheological studies were carried out by measuring the dynamic viscosity of the chocolate mass versus time and temperature at constant shear rates of 50 and 100 1/s. It was concluded that the viscosity of chocolate remains relatively constant at a shear rate above 50 1/s, and in the tested temperature range, it had a linear tendency to decrease.*

Keywords: 3D-printing, chocolate mass, optimization, rheological characteristics, print quality.

For citation: Bredikhin, S. A., Andreev, V. N., Martekha, A. N. & Berezovskiy, Yu. M. (2021). Correlation between rheological properties and quality three-dimensional printed chocolate mass. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 111-116. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.015.

ВВЕДЕНИЕ

3D-печать – это технология, которая работает по аддитивному принципу путем осаждения материалов слой за слоем. Эта технология может быть использована для производства сложных, высококачественных заказных изделий без использования трудоемкой машины и дорогостоящих трудоемких форм. Экструзионная 3D-печать, первоначально введенная как моделирование плавленного осаждения, использовалась для производства пластика или металла, но сейчас она адаптируется в пищевой отрасли. В процессе экструзии реологические свойства материалов имеют решающее значение для обеспечения надлежащей экструдированности, связы-

вания различных слоев пищевых продуктов вместе и поддержания веса осажденных слоев [1, 2].

Технология трехмерной печати пищевых продуктов не только позволяет разрабатывать персонализированные формы и текстуры, но и оптимизировать рецептуру готовых объектов в соответствии с диетическими ограничениями, такими, как продукты с низким содержанием сахара / соли и витаминов [3, 4].

Понимание физических свойств подаваемого материала необходимо для достижения качественных показателей 3D-конструкций. Например, в процессе экструзионной 3D-печати пищевых объектов напечатанные слои должны сохранять свою структуру, пока материал наносится послойно. Эта

КОРРЕЛЯЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С КАЧЕСТВОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ МАССЫ

«самоподдерживающаяся» способность при экструзии зависит от реологических (например, вязкость) и термических (например, температура кристаллизации и температура плавления) свойств; которые в совокупности играют важную роль в процессе кристаллизации осажденного слоя после его нанесения. Печатаемый материал для экструзионного метода должен демонстрировать сдвиговое истечение, которое позволяет субстратам эффективно течь во время экструзии через тонкое сопло. Деформация вязкости пищевого субстрата позволяет ему течь с контролируемой температурой [5, 6, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экструзия – это наиболее распространенный метод дозирования компонентов в 3D-печати пищевых продуктов. В нашем исследовании мы применили метод роторно-шнековой экструзии для дозирования тертого шоколада. В роторно-винтовой экструзии процесс состоял в основном в дозировании компонентов вращательным винтом, влияние которого на степень вращения и скорость перемещения определяет количество дозируемого материала [5].

Шоколад по своей природе считается пригодным для печати материалом. Понятие печатаемости связано со способностью экструдироваться из сопла и сохранять форму после послойного осаждения.

Различные методы могут быть применены для улучшения печатаемости шоколада, такие как точный контроль температуры во время экструзии, оптимизация размера частиц шоколада и введение добавок. Контроль температуры направлен на индуцирование образования более стабильных кристаллов с улучшенной текстурой, глянцевыми свойствами. Кроме того, уменьшение размера частиц шоколада в процессе его измельчения облегчает плавление в процессе печати.

Для повышения эффективности 3D можно использовать широкий спектр добавок, включая углеводы и белки, крахмалы и сахара. В целом они играют важную роль в улучшении текучести, осаждения и смазочных свойств подаваемого материала. Данные исследования сосредоточены на использовании стеарата магния, который известен тем, что действует как усилитель смазки в фармацевтическом производстве таблеток. Производители 3D-пищевых принтеров, рекомендуют добавлять стеарат магния в шоколадную массу в пропорциях до 5 % по массе. Включение этой соли улучшает текучесть и сма-

зочные свойства смеси, предотвращая прилипание ингредиентов к бункеру принтера и вращающемуся шнеку. Эта разрешенная добавка используется для контроля липкости и улучшения текучести материала, используемого для экструзии [8].

Реологические свойства шоколадной массы были коррелированы для достижения оптимальных условий печати при температуре экструзии. Качество 3D-шоколадных конструкций оценивалось путем измерения диаметра стенки, веса и высоты объекта. Это исследование приносит новые идеи в разработку 3D-шоколадных конструкций с улучшенными характеристиками печати и физической стабильности.

Экспериментальные данные получены в Федеральном научном центре пищевых систем им. В.М. Горбатова. В работе использовали темный шоколад торговой марки Коркунов. Для измерения реологических свойств образца шоколада использовали контролируемый реометр напряжения. Все измерения проводились в реометре с регулируемой скоростью сдвига, использующем 40 мм нержавеющую сталь, геометрию пескоструйной обработки. Скорость сдвига устанавливали при 100 1/с, температуре 32 °C и продолжительности испытания 10 мин. Температурный скачок был установлен для определения температуры плавления шоколада. Предварительно определенная начальная температура составляла 25 °C со скоростью предварительного сдвига 2 1/с в течение 10 с. Температурный скачок применялся от 25 °C до 32 °C с постоянной скоростью сдвига 100 1/с в течение 10 мин. Измерения свойств потока проводились для пикового удержания и скачка температуры. Из этих параметров были извлечены данные о вязкости [9].

В исследовании использовали принтер марки *Chocolate Fiesta One*. Перед печатью температура экструдера была установлена на уровне 32 °C в течение 5 мин, чтобы обеспечить контроль и поддержание температуры экструдирования. Параметры печати были установлены следующим образом: скорость печати 70 мм/с, температура экструзии откалибрована при 32 °C, размер сопла 1,5 мм (внутренний диаметр 0,8 мм) и температура слоя принтера поддерживалась при температуре от 15 °C до 22 °C. Эти параметры были установлены на основе корреляций между тепловым и потоковым поведением шоколада. Текучесть шоколадных чернил была проанализирована для определения температуры, при которой шоколад начинает течь (точка плавления шоколада). Динамическую вяз-

кость измеряли при постоянной скорости сдвига (100 1/с) в интервале температур от 24 до 32 °С. Скорость сдвига 100 1/с применяли, имитируя вращение шнека, помогающего движению шоколада из бункера к соплу принтера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1, 2 показана зависимость динамической вязкости от температуры образцов шоколада до и после добавления стеарата магния соответственно.

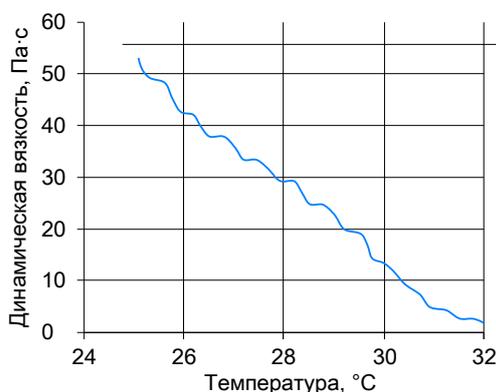


Рисунок 1 – Зависимость динамической вязкости шоколада без стеарата магния от температуры при скорости сдвига 100 1/с

Figure 1 – Dependence of the dynamic viscosity of chocolate without magnesium stearate on temperature at a shear rate of 100 1/s

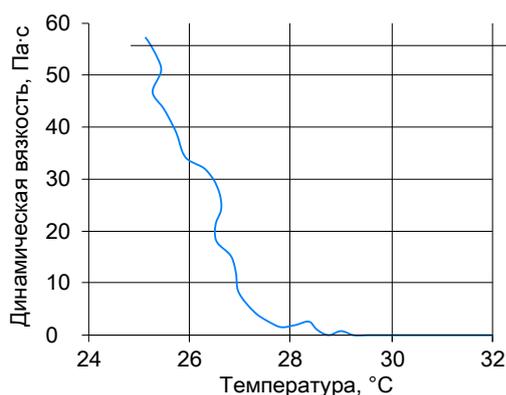


Рисунок 2 – Зависимость динамической вязкости шоколада со стеаратом магния от температуры при скорости сдвига 100 1/с

Figure 2 – Dependence of the dynamic viscosity of chocolate with magnesium stearate on temperature at a shear rate of 100 1/s

Температура плавления шоколада не могла быть четко определена для образца

без стеарата магния. Как видно из рисунка 1, динамическая вязкость в испытуемом диапазоне температур имела линейную тенденцию к снижению. Однако для образца, содержащего стеарат магния, аналогичная тенденция наблюдалась примерно до 29 °С, с этого момента было установлено плато, указывающее на то, что большая часть кристаллов шоколада расплавилась. Продукт считался полностью расплавленным при температуре 32 °С.

Считается, что снижение вязкости при нагревании смеси облегчает процесс экструзии, так как повышает ее текучесть по всему соплу шоколада. Реологические свойства действительно играют важную роль в предсказании поведения печати, поскольку исходная рецептура должна проявлять тиксотропное поведение. В нашем исследовании оценивалась толщина стенок конструкции до и после 3D-печати, они не показали большой вариабельности. Реологические данные использовались для оптимизации важных параметров используемого 3D-принтера, таких как скорость осаждения и температура подложки при экструзии. Хорошая печатная способность на подложке была достигнута путем прогнозирования поведения потока шоколада при постоянной скорости сдвига и определением температуры плавления шоколада путем регистрации спада вязкости во время теста на повышение температуры при постоянной скорости сдвига [7, 8, 9].

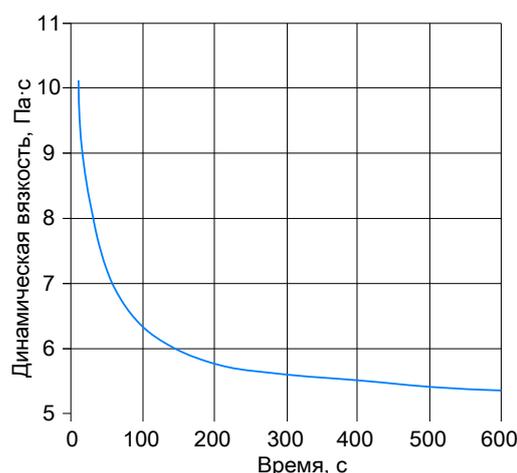


Рисунок 3 – Зависимость динамической вязкости от времени при скорости сдвига 50 1/с

Figure 3 – Dependence of dynamic viscosity on time at a shear rate of 50 1/s

После определения температуры плавления были проведены дополнительные рео-

КОРРЕЛЯЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С КАЧЕСТВОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ МАССЫ

логические измерения путем измерения динамической вязкости от времени при постоянных скоростях сдвига 50 и 100 1/с (рисунки 3 и 4) соответственно.

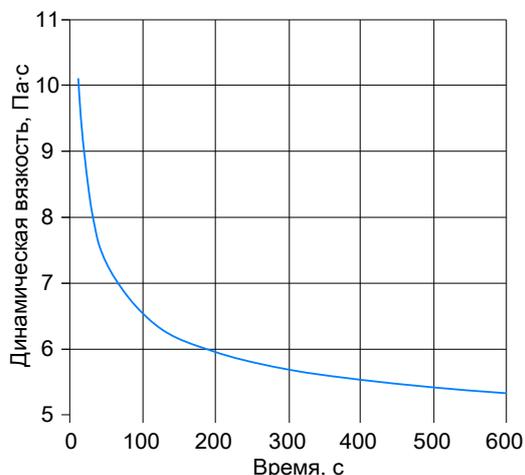


Рисунок 4 – Зависимость динамической вязкости от времени при скорости сдвига 100 1/с для шоколада со стеаратом магния

Figure 4 – Dependence of dynamic viscosity on time at a shear rate of 100 1/s for a chocolate fret with magnesium stearate

Этот тест проводился в течение 10 мин, исходя из времени, затраченного до нанесения первого слоя экструдированного материала. На этом этапе материал подвергается медленному перемещению из бункера принтера в экструдер.

Как видно из рисунков, динамическая вязкость зависела от времени с тиксотропной характеристикой (уменьшающиеся значения со временем сдвига).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты реологии дают полезную информацию, жизненно важную для осаждения шоколада, поскольку она указывает начальную температуру, при которой шоколад начинает плавиться. В этом эксперименте была выбрана более низкая скорость сдвига (50 и 100 1/с), что моделирует скорость экструзии 3D-принтера. Учитывая, что поток ламинарный, скорость сдвига при экструзии через сопло диаметром d и объемным расходом v была рассчитана ($\dot{\gamma} = 8v/d$), примерно равной 100 1/с. Вязкость шоколада остается относительно постоянной при скорости сдвига выше 50 1/с.

Исходя из реологических результатов и механизмов кристаллообразования при

плавлении / перекристаллизации шоколада, максимальная температура 3D-принтера была установлена на уровне 32 °С.

Подчеркнем, что параметры печати, установленные в данном исследовании, могут быть применимы только к шоколадной массе. Однако наши результаты дают важную информацию для будущих исследований, связанных с оптимизацией печатаемости пищевых объектов [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин И.В. Обзор технологий трехмерной печати // Научно-практические исследования. 2018. № 1 (10). С. 35–42.
2. Холодилов А.А., Яковлева А.В., Пузынина М.В. Моделирование технологии послойного деления трехмерной модели при 3D-печати изделий сложной формы // Вестник современных исследований. 2019. № 1.13 (28). С. 173–176.
3. Родионова О.И., Алешков А.В., Синюков В.А. 3D-печать пищевой продукции как инновационная технология // Вестник Хабаровского государственного университета экономики и права. 2019. № 2 (100). С. 119–124.
4. Дресвянников В.А., Страхов Е.П., Возмищева А.С. Анализ применения аддитивных технологий в пищевой промышленности // Продовольственная политика и безопасность. 2017. Т. 4. № 3. С. 133–139. doi: 10.18334/ppib.4.3.38500.
5. Гришин А.С., Бредихина О.В., Помоз А.С. [и др.]. Новые технологии в индустрии питания – 3D-печать // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2016. Т. 4. № 2. С. 36–44. doi: 10.14529/food160205.
6. Толочко Н.К., Андрушевич А.А., Василевский П.Н., Чугаев П.С. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве // Литье и металлургия. 2018. № 4 (93). С. 139–144. doi: 10.21122/1683-6065-2018-4-139-144.
7. Коган В.В., Семенова Л.Э. Инженерная реология в пищевой промышленности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 4. С. 147–156. doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.
8. Инженерная реология. Физико-механические свойства и методы обработки пищевого сырья: учеб. пособие / С.А. Бредихин [и др.]. Санкт-Петербург: Изд-во "Лань". 2021. 192 с.
9. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел / А.Н. Остриков [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 36–43. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.05.005.

Информация об авторах

С. А. Бредихин – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева.

В. Н. Андреев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева.

А. Н. Мартеха – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева.

Ю. М. Березовский – доктор технических наук, научный консультант Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова.

REFERENCES

1. Ilin, I.V. (2018). Overview of 3D printing technologies. *Scientific and practical research*, 1(10), 35-42 (In Russ.).
2. Kholodilov, A.A., Iakovleva, A.V. & Puzynina, M.V. (2019). Modeling the technology of layer-by-layer division of a three-dimensional model in 3D-printing of complex-shaped products. *Proceedings of modern research*, 1.13(28), 173-176. (In Russ.).
3. Rodionova, O.I., Aleshkov, A.V. & Sinyukov, V.A. (2019). 3D printing of food products as an innovative technology. *Proceedings of Khabarovsk State University of Economics and Law*. 2(100), 119-124. (In Russ.).
4. Dresvyannikov, V.A., Strakhov, E.P. & Vozmishcheva, A.S. (2017). Analysis of the application of additive technologies in the food industry. *Food Policy and Security*, (3), 133-139. (In Russ.). doi: 10.18334/ppib.4.3.38500.

5. Grishin, A.S., Bredikhina, O.V., Pomoz, A.S. & [et al.]. (2016). New technologies in the food industry - 3D printing. *Proceedings of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, (2), 36-44. (In Russ.). doi: 10.14529/food160205.

6. Tolochko, N.K., Andrushevich, A.A., Vasilevskiy, P.N. & Chugaev, P.S. (2018). Foundry applications of extrusion 3D printing technology. *Casting and metallurgy*. 4(93), 139-144. (In Russ.). doi: 10.21122/1683-6065-2018-4-139-144.

7. Kogan, V.V. & Semenova, L.E. (2019). Engineering rheology in the food industry. *Proceedings of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. (4), 147-156 (In Russ.). doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.

8. Bredikhin, S.A., Andreev, V.N., Berezovskiy, Yu.M. & Martekha, A.N. (2021). Engineering rheology. Physical and mechanical properties and methods of processing food raw materials: Textbook. St. Petersburg: Lan. (In Russ.).

9. Ostrikov, A.N., Kleymenova, N.L., Bolgova, I.N. & Kopylov, M.V. (2021). The research of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 36-43. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.05.005.

Information about the authors

S. A. Bredikhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Processes and devices of processing industries of the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

V. N. Andreev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries of the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

A. N. Martekha – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries of the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

Yu. N. Berezovskiy – Doctor of Technical Sciences, Scientific Consultant of the Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.07.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021; принята к публикации 20.09.2021.

The article was received by the editorial board on 23 June 21; approved after reviewing on 14 Sep 21; accepted for publication on 20 Sep 21.