

Исследование прочностных характеристик пищевых 3D-систем на основе плавленого сыра

Данила Сергеевич Архипов, аспирант

Сергей Владимирович Мотылев, инженер-исследователь

Евгения Юрьевна Агаркова, д-р техн. наук, заведующий лабораторией биотехнологии молока и молочных продуктов
E-mail: e_agarkova@vnimi.org

Владислав Константинович Семипятный, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

Дмитрий Михайлович Мяленко, д-р техн. наук, заведующий лабораторией технологий упаковки

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва

В последние годы все больше исследований посвящено применению 3D-печати именно к пищевым системам на основе молочного сырья. На данный момент не существует объективных критериев оценки прочностных свойств готовых пищевых 3D-продуктов, что создает определенные сложности при их изготовлении. Например, неизвестны предельные характеристики, при которых изделие будет сохранять форму и привлекательные потребительские свойства. В связи с этим целью работы являлось исследование прочностных характеристик 3D-молочных пищевых систем, изготовленных из плавленого сыра. Установлена прямая корреляционная связь между прочностными показателями и компонентным составом смеси. Объектами исследований служили 3D-печатные образцы молочных продуктов, изготовленные из плавленого сыра, представляющие из себя кубы с длиной ребра 20 мм, сформированные девятнадцатью гранями послойно выплавленных через сопло экструдера нитей круглой формы с площадью сечения 2 мм^2 . Подтверждена гипотеза о превалирующей роли белка при формировании структурно-механических свойств молочных печатных 3D-систем. Причем значение в данном случае имеет не только количественный, но и качественный состав белков молока, поскольку в рецептурах образцов варьировалось только содержание сухого обезжиренного молока и концентрата сывороточных белков. Был также констатирован факт, что с изменением содержания белка в сторону увеличения казеиновой фракции прочностные характеристики образцов ухудшались. В напечатанном образце, обладающем самыми высокими значениями напряжений сдвига, растяжения и сжатия – 1831, 5885 и 69068 Па соответственно, соотношение массовой доли сывороточных белков к казеиновым составило 1:1,8. С увеличением массовой доли казеиновых фракций прочностные характеристики ухудшались, что говорит о том, что сывороточные белки в большей степени пригодны для использования в 3D-печати. В условиях отсутствия стандартизованных справочных характеристик структурно-механических свойств пищевых 3D-систем на молочной основе полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования устойчивости данных систем.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, молочные продукты, устойчивость, прочностные характеристики

Для цитирования: Архипов Д. С. Исследование прочностных характеристик пищевых 3D-систем на основе плавленого сыра / Д. С. Архипов, С. В. Мотылев, Е. Ю. Агаркова [и др.] // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 4. С. 64–69.

<https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-4-38>

Введение

Аддитивное производство продуктов решает сразу несколько технологических задач, актуальных для пищевой промышленности. Во-первых, оно позволяет создавать структуры сложной формы с высокой точностью, улучшая внешний вид и потребительскую привлекательность пищевой продукции. Во-вторых, благодаря цифровому моделированию удается контролировать внутреннюю структуру (например, пористость, слоистость), что позволяет управлять органолептическим профилем в части текстуры. В-третьих, 3D-печать способствует сокращению пищевых отходов: ингредиенты депонируются только в необходимом количестве и месте, нивелируя проблему нереализованной продукции. Наконец, подобные технологии могут упростить логистику и цепочки поставок – концепция печати в месте потребления (в ресторанах, магазинах или дома) обеспечивает свежесть продукта и сокращение

затрат на транспортировку и хранение. В совокупности эти преимущества делают 3D-печать привлекательной для производства персонализированных специализированных продуктов питания, в частности для космической отрасли или лечебно-профилактического питания, где требуются компактность и длительный срок хранения [1].

В последние годы все больше исследований посвящено применению 3D-печати именно к пищевым системам на основе молочного сырья [2, 3]. Молочные продукты и их компоненты рассматриваются как перспективные пищевые композиции для печати благодаря способности образовывать гелеобразные структуры, обладающие высокой пищевой ценностью [4]. Например, концентраты сывороточного белка, казеинаты, лактоза и молочный жир широко используются в рецептурах смесей для печати, поскольку они

служат каркасом при формировании структуры геля и улучшают устойчивость формы напечатанного изделия, а также способствуют увеличению пищевой ценности продукта [5–8]. Добавление в рецептуры 3D-продуктов молочных белков, особенно сывороточных, повышает вязкоупругие свойства и способствует быстрому переходу напечатанного материала в гелеобразное состояние, обеспечивая сохранение заданной формы. Некоторые исследователи отмечают, что сами по себе большинство натуральных молочных продуктов не обладают оптимальной для печати реологией и нуждаются в модификации структуры [4]. Так, внесение сухого сывороточного белка в базовый гидрогель повысило вязкость пасты, облегчив ее выдавливание через сопло и обеспечив большую устойчивость слоев при наслоении [9, 10].

Реальные процессы деформации, в том числе возникающие в напечатанных 3D-изделиях, имеют значительно более сложную физическую природу, чем предложенный Гуком закон упругого деформирования. Важным теоретическим предложением, которое упрощает анализ поведения материалов при пластическом деформировании (при ограничении определенными условиями и типами материалов), является гипотеза П. Людвика [10]. Он предположил существование единой диаграммы деформирования, не зависящей от типа напряженного состояния, т. е. то, что при деформировании важно, не как именно приложены силы, а только величина суммарного напряжения, действующего на материал.

Для проверки существования единой диаграммы деформирования рядом специалистов были проведены экспериментальные исследования механических свойств материалов при испытаниях на простые и сложные нагрузления, в ходе которых выявлялись связи касательного и нормального напряжения с угловой и линейной деформацией^{1,2} [11, 12]. Анализ полученных ими данных свидетельствует о том, что как при простой, так и при сложной нагрузке (в отсутствии массовых сил) диаграмма деформирования не зависит от типа напряженного состояния, что соответствует положениям теории пластичности



Источник изображения: freepik.com

и ползучести Н. Н. Малинина³. Данные теоретические постулаты могут послужить основой оценки прочностных свойств пищевых 3D-продуктов.

На данный момент не существует объективных критериев оценки прочностных свойств пищевых 3D-продуктов, что создает определенные сложности при их изготовлении. Например, неизвестны предельные характеристики, при которых изделие будет сохранять форму. В этой связи целью работы являлось исследование прочностных характеристик 3D-молочных пищевых систем, изготовленных по технологии плавленого сыра.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования. В качестве объектов исследования выступали 3D-печатные образцы молочных продуктов, изготовленные из плавленого сыра, представляющие из себя кубы с длиной ребра 20 мм, сформированные девятнадцатью гранями послойно выплавленных через сопло экструдера нитей круглой формы с площадью сечения 2 мм². В качестве основы плавленого сыра служил прессованный до 41,0 % сухих веществ творожный сгусток. В процессе приготовления продуктов по рецептам варьировали количество сухого обезжиренного молока и концентраты сывороточных белков, фактически – массовую долю белка в 3D-печатных системах как один из основных факторов, влияющих на стабильность структуры пищевых аддитивных систем [2, 9].

Определение массовой доли белка осуществляли по методу Кельдаля согласно ГОСТ 23327-98 «Молоко и молочные продукты. Метод измерения массовой доли общего азота по Кельдалю и определение массовой доли белка».

¹ Гольдштейн, Ю. Б. Основы механики твердого деформируемого тела: учеб. пособие / Ю. Б. Гольдштейн. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. – 872 с.

² Гуль В. Е. Структура и механические свойства полимеров: учеб. для хим.-технол. вузов / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Лабиринт, 1994. – 367 с.

³ Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов / Н. Н. Малинин. – М.: Юрайт, 2025. – 402 с.

Печать 3D-образцов. Для печати исследуемых образцов был задействован пищевой 3D-принтер FELIX Food Switch Head (FELIXprinters, Голландия) с поршневой системой экструзии. Устройство обеспечивало формирование слоя толщиной 2,0 мм с выгрузкой на гибкую платформу из нержавеющей стали марки 301 с системой автоматического выравнивания.

Исследование прочностных характеристик напечатанных 3D-систем. На графике рисунка 1а представлена классическая диаграмма растяжения (сдвига). На участке АВ проиллюстрирован процесс упругой деформации, далее на участке ВС материал деформируется при постоянной силе, т. е. происходит течение или пластичная деформация, после точки С – процесс продолжающейся текучести. Значение напряжения, измеренное в точке В (σ_T), называют физическим пределом текучести материала.

При исследовании прочности на сжатие материала экспериментальные данные сжатия также можно интерпретировать в виде аналогичной диаграммы (рис. 1б).

Поскольку не во всех случаях пластичный материал можно довести до разрушения, он имеет тенденцию сплющиваться, диаграмма выглядит несколько иначе (рис. 1б). Тем не менее экспериментальное значение предела текучести σ_T может быть определено по принципу, как в случае сдвига (растяжения).

Прочностные показатели напечатанных 3D-форм на растяжение, сжатие и сдвиг исследовали на универсальной испытательной машине EZ Test мод. EZ-LX-1, Shimadzu Corporation (Япония)

с максимальной мощностью установленного детектора силы 2 кН, длиной хода траверсы 920 мм с использованием профессионального программного обеспечения TRAPEZIUM X.

Для адаптации данного оборудования к исследованию прочностных характеристик пищевых 3D-форм на сдвиг была сконструирована специальная камера (рис. 2). Размер отверстий подходит для исследования 3D-образцов с различной площадью поверхности на сдвиг. Для исследования силы материала 3D-образца на растяжение на принтере изготавливалась нить длиной 5 см и помещалась между зажимами с прорезиненными захватами.

Измерение разрушающего напряжения и относительного удлинения при разрыве проводили согласно ГОСТ 14236-81 «Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение». Для увеличения массива экспериментальных данных проводили испытания с увеличенной повторностью (20 повторов каждого образца в продольном и поперечном направлениях). За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение, округленное до двух значащих цифр.

Результаты и их обсуждение

Согласно изложенной выше методике, были исследованы прочностные характеристики шести 3D-печатных систем с массовой долей белка 24,4; 22,8; 21,0; 19,5; 17,9 и 15,9 % (номера образцов 0–5 соответственно).

В качестве основы для интерпретации наблюдаемых результатов использовалась теория упруго-пластических деформаций, которая описывает

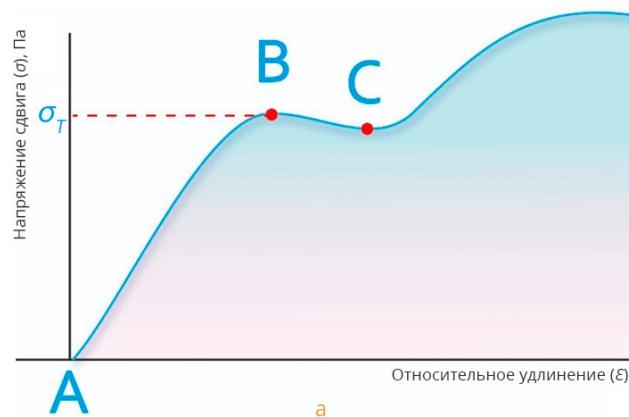
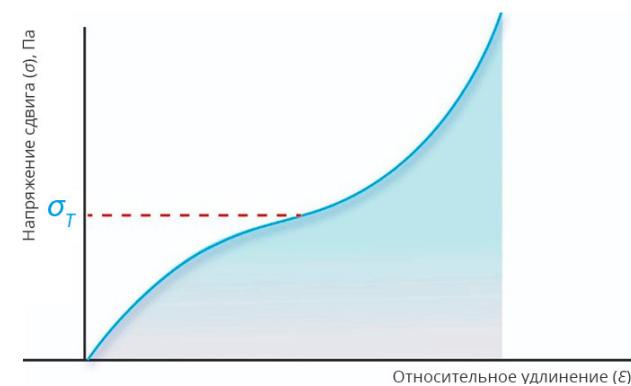


Рисунок 1. Диаграммы деформации: а) растяжение (сдвиг); б) сжатие



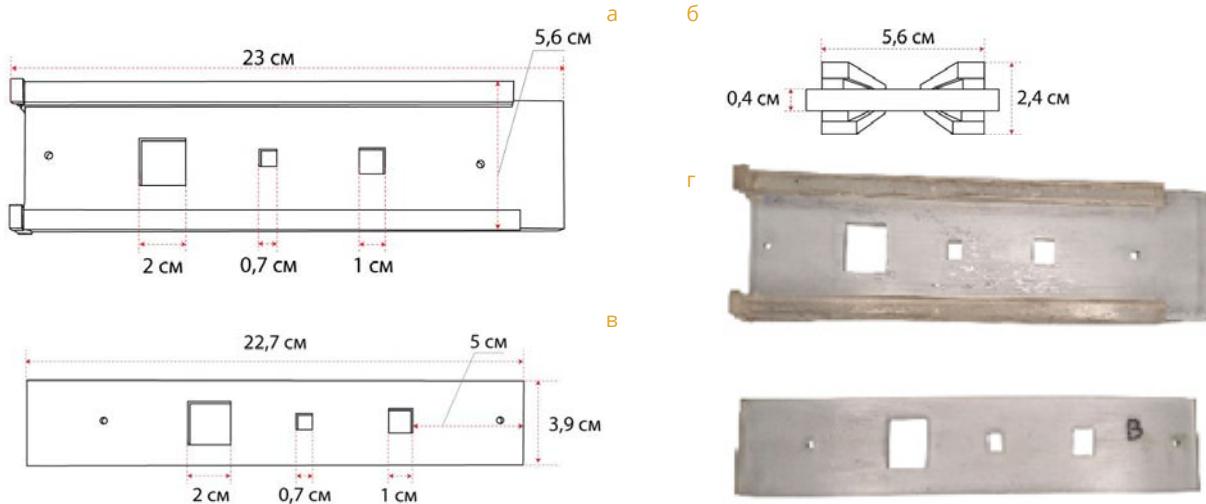


Рисунок 2. Камера для исследования прочностных характеристик 3D-печатных форм: а) корпус камеры; б) крышка камеры; в) вид камеры сверху; г) внешний вид камеры

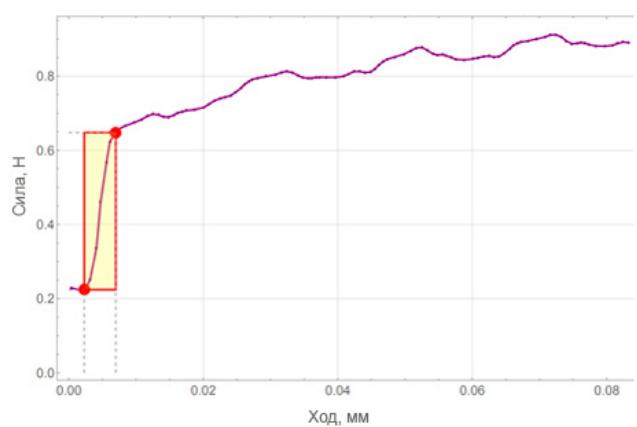
поведение материала в области пластических (необратимых) изменений.

Получены экспериментальные данные, диаграммы для каждого вида опыта, связывающие силы с деформациями образцов (рис. 3–5). На диаграммах выделены характерные участки, отвечающие области упругих деформаций, за которыми начинаются области пластических деформаций. Точка перехода определена как предел текучести (рис. 3–5), далее она используется как предельная характеристика прочности образцов.

В процессе проведения эксперимента было выявлено, что образец сохраняет свою первоначальную геометрическую форму и демонстрирует состояние статической стабильности до тех пор, пока уровень приложенных напряжений не станет превышать определенного критического порога. Его значение соответствует пределу упругости материала.

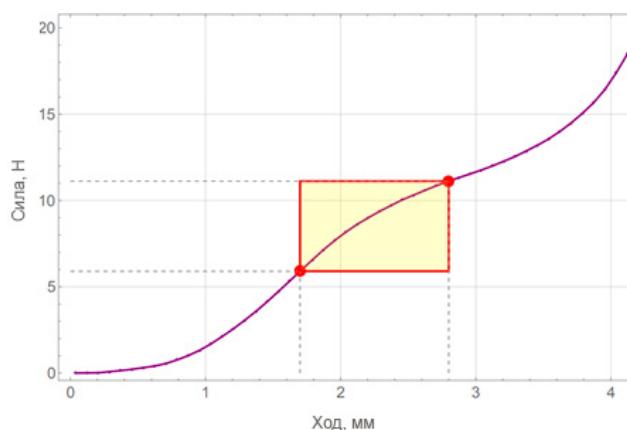
В таблице отображены усредненные значения сил, соответствующие предельным точкам, определенным на графиках. Далее в таблице пересчитаны соответственно значения напряжений в этих точках.

Из таблицы видно, что величины предельных напряжений существенно зависят от состава 3D-систем. По представленным экспериментальным данным можно отметить, что в образце № 2 наблюдались близкие к максимальным значения



Примечание: область упругих деформаций: от 0,0023 мм, 0,224192 Н до 0,007 мм, 0,647902 Н.

Рисунок 3. Диаграмма сдвига образцов



Примечание: область упругих деформаций: от 1,7 мм, 5,89885 Н до 2,8 мм, 11,1195 Н.

Рисунок 4. Диаграмма сжатия образцов



Примечание: область упругих деформаций: от 0 мм, -0,0296195 Н до 2,9 мм, 0,139196 Н

Рисунок 5. Диаграмма растяжения образцов

пределных напряжений для всех видов деформации. Это позволяет прогнозировать наилучшие прочностные характеристики данного образца. Значительное снижение величин предельных напряжений было отмечено при испытании образцов на растяжение и сжатие начиная с образца № 3. При исследовании сдвиговых предельных напряжений тенденция к снижению также наблюдалась, начиная с образца № 3. Анализируя полученные данные, можно подтвердить гипотезу, высказанную другими исследователями, о превалирующей роли белка при формировании структурно-механических свойств молочных печатных 3D-систем [1, 2]. Причем значение в данном случае имеет не только количественный, но и качественный состав белков молока, поскольку в рецептурах образцов варьировалось только содержание сухого обезжиренного молока и концентраты сывороточных

белков. Был также констатирован факт, что с увеличением относительной доли казеиновой фракции в общем содержании белка прочностные характеристики образцов ухудшались. В образце № 2, обладающем самыми высокими значениями напряжений деформации, соотношение массовой доли сывороточных белков к казеиновым составило 1:1,8. Ввиду отсутствия заданных справочных характеристик структурно-механических свойств пищевых 3D-систем на молочной основе полученные данные могут служить ориентиром при прогнозировании устойчивости таких систем.

Выводы

При проведении пищевой, в частности молочной, 3D-печати продуктов немаловажными являются прочностные свойства. В результате проведенного исследования были установлены критерии прочностных характеристик. Они позволяют создавать продукты сложной формы с высокой точностью, что способствует сокращению пищевых отходов и персонификации питания.

Были исследованы предельные напряжения для трех видов деформации – сдвиг, растяжение и сжатие. Показана взаимосвязь прочностных характеристик напечатанных систем с белковым составом образцов. Полученный спектр деформационных характеристик дает возможность потенциальному производителю 3D-печатных продуктов на молочной основе спрогнозировать их устойчивость, являющуюся неотъемлемой частью потребительской привлекательности продукта. ■

Таблица. Значения сил, соответствующие предельным точкам

№ образца	Сдвиг (площадь сечения 0,0004 м ²)		Растяжение (площадь сечения 0,00002 м ²)		Сжатие (площадь сечения 0,0004 м ²)	
	Сила, Н	σ , Па	Сила, Н	σ , Па	Сила, Н	σ , Па
0	0,6496	1624,00	0,1321	6605	20,9155	52288,75
1	0,6819	1704,75	0,1392	6960	25,1700	62925,00
2	0,7324	1831,00	0,1177	5885	27,6272	69068,00
3	0,6332	1583,00	0,0754	3770	14,4622	36155,50
4	0,5441	1360,25	0,0351	1755	8,3183	20795,75
5	0,5619	1404,75	0,0412	2510	11,1195	27798,75

Strength Profile of Food 3D-Systems: Processed Cheese Technology

Danila S. Arkhipov, Sergey V. Motylev, Evgeniya Yu. Agarkova, Vladislav K. Semipyatny, Dmitry M. Myalenko
All-Russian Dairy Research Institute, Moscow

3D-printing is gaining more and more popularity in the dairy industry. However, no objective criteria for strength properties have been developed so far. Dairy production needs the ultimate parameters at which a finished 3D-printed dairy product retains its shape and appealing consumer properties. This study tested the strength properties of 3D-systems made from processed cheese. It established a direct correlation between the strength properties and the component composition. Processed cheese cubes of 20 mm each side were obtained from nineteen faces of round filaments with a cross-sectional area of 2 mm², melted layer by layer through an extruder. Protein proved to be the most important component in maintaining the structural and mechanical properties of 3D-systems. The qualitative composition of dairy proteins was as important as its quantity because the samples varied only in the content of skim milk powder and whey protein concentrate. As the protein content increased, the strength properties of the samples deteriorated. The optimal sample had a 1:1.8 mass fraction ratio of whey to casein protein. It exhibited the highest shear (1,831 Pa), tensile (5,885 Pa), and compressive stress (69,068 Pa) values. With increasing casein mass fraction, the strength properties deteriorated. This phenomenon indicated that whey proteins were more suitable for 3D-printing. The obtained data can serve as guidelines in calculating the stability of dairy 3D-systems in the current lack of references and standards.

Keywords: additive technologies, 3D-printing, dairy products, sustainability, strength characteristics

Список литературы

1. Varvara, R. A. 3D Food Printing: Principles of obtaining digitally designed nourishment / R. A. Varvara, K. Szabo, D. C. Vodnar // Nutrients. 2021. Vol. 13(10). 3617. <https://doi.org/10.3390/nu13103617>
2. Dou, X. The application of dairy products and their derivatives as edible inks in 3D printing technology: A review / X. Dou, J. Ren // International Journal of Food Science and Technology. 2024. Vol. 59(11). P. 8630–8644. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17195>
3. Derossi, A. Personalized, digitally designed 3D printed food towards the reshaping of food manufacturing and consumption / A. Derossi [et al.] // npj Science of Food. 2024. Vol. 8(1). 54. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00296-5>
4. Joshi, S. Assessment of 3D printability of composite dairy matrix by correlating with its rheological properties / S. Joshi [et al.] // Food Research International. 2021. Vol. 141. 110111. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00296-5>
5. Барковская, И. А. Сывороточные белки – перспективные носители эссенциальных микроэлементов / И. А. Барковская // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: Материалы IX Международной научно-технической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2024. – С. 55–59. <https://elibrary.ru/vnkofy>
6. Юррова, Е. А. Деминерализованная молочная сыворотка как основное сырье для производства продуктов специализированного питания / Е. А. Юррова, Т. В. Кобзева, С. А. Фильчакова // Пищевая промышленность. 2022. № 3. С. 64–67. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.3.3.0>; <https://elibrary.ru/iqxsuo>
7. Зобкова, З. С. Выбор источников биологически активных веществ для функциональных кисломолочных продуктов / З. С. Зобкова [и др.] // Молочная промышленность. 2018. № 3. С. 59–62. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2018-3-59-62>; <https://elibrary.ru/yorrff>
8. Барковская, И. А. Комплексная модификация белкового профиля молочной сыворотки как подход к созданию обогащенных белковых ингредиентов / И. А. Барковская, А. Е. Рябова, И. В. Рожкова // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 2. С. 221–230. <https://doi.org/10.21323/26>; <https://elibrary.ru/jhloak>
9. Hewa Nadugala, B. The effect of casein genetic variants, glycosylation and phosphorylation on bovine milk protein structure, technological properties, nutrition and product manufacture / B. Hewa Nadugala [et al.] // International Dairy Journal. 2022. Vol. 133. 105440. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105440>
10. Людвик, П. Основы технологической механики / П. Людвик // Расчеты на прочность. 1971. № 15. С. 132–166.
11. Колесников, К. С. Машиностроение. Энциклопедия. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин / К. С. Колесников, В. С. Зарубин. Том 1–3. Книга 1. – М.: Машиностроение, 1994. – 534 с. <https://elibrary.ru/vwwjel>
12. Rabotnov, Yu. N. Application of the nonlinear theory of heredity to the description of time effects in polymeric materials / Yu. N. Rabotnov, L. Kh. Papernik, E. I. Stepanychev // Polymer Mechanics. 1971. Vol. 7(1). P. 63–73. <https://doi.org/10.1007/bf008>

