

ЭВОЛЮЦИЯ УЧЕНИЯ О ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. И. Слуцкер, В. С. Рыскин

Сведения о прочности твердых тел, ставшие впоследствии основой целой науки, относятся к одним из самых древних в развитии человеческого знания. Под механической прочностью понимается способность материалов, изделий, конструкций сохранять свою целостность без разрушения при действии на них механических нагрузок или, кратко говоря, устойчивость объектов по отношению к любому механическому воздействию. Естественно, что уже в глубокой древности, когда люди начали создавать различные изделия, орудия труда, охоты, войны, позднее — строительные сооружения, корабли и др., вопросы обеспечения достаточной прочности всего изготавливаемого или строящегося становились предметом размышлений, поисков, изобретений. С развитием техники необходимость все большего внимания к прочности возрастала. Новейшие достижения техники и ее потребности не только не ослабили, но еще более подняли актуальность разработки проблемы прочности. Например, авиации стали совершенно необходимыми прочные и легкие материалы (сплавы, главным образом, на основе алюминия). В эпоху же космической техники необходимость материалов с высокой удельной прочностью (большая прочность при низкой плотности материала) стала еще более острой, так как каждый килограмм веса объекта, выводимого на космические орбиты, требует многих килограммов ракетного топлива. Поэтому только одновременным обеспечением большой мощности ракет-носителей и высокой удельной прочности материалов в космических аппаратах можно решить задачу надежной работы людей и конструкций в космосе. Борьба за прочность имеет и огромное экономическое значение. Так, в масштабах техники нашей страны увеличение прочности материалов ведет к экономии миллионов тонн металлов, бетона, пластмасс, что в настоящее время является одной из важнейших народнохозяйственных задач. Как выражение этого в решениях XXVI съезда КПСС записано: «Разрабатывать и внедрять высокоэффективные методы повышения прочностных свойств. . . металлов и сплавов».

Отметив историческую и современную актуальность проблемы прочности, рассмотрим основные этапы эволюции учения о прочности, обозначив некоторые философские и методологические вопросы в истории развития этой «механической» науки. Такое рассмотрение представляется уместным, поскольку эта древнейшая по возрасту, но жизненно необходимая и сейчас научная область в своем прошлом и настоящем содержит любопытные поворотные моменты, когда достижения физики приводили к существенному пе-

* Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Изд-во политлитературы, 1982, с. 145.

рестрому прежних представлений и давали новые стимулы для исследований и разработок по проблеме прочности. Заслуживает внимание и то обстоятельство, что начиная с 20-х годов нашего века ведущее положение в развитии физики прочности занял Ленинградский физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Академии наук СССР.

Вплоть до начала XX в. в разработках теории механических свойств твердые тела рассматривались как сплошные среды (упругие или вязкоупругие). В XVIII в. блестящее развитие получила математическая механика, описывающая деформационное поведение твердых тел под нагрузкой (Р. Гук, Ж. Д. Аламбер, Ж. Лагранж, Т. Юнг и др.). Однако подчеркнем, что значения соответствующих коэффициентов упругости или вязкости брались эмпирическими, из феноменологических измерений, без физического обоснования.

Что касается прочности на разрыв, то само явление разрыва выступало перед механиками как некое неожиданное событие. Действительно, образец, казалось бы, имеет возможность еще доформироваться и деформироваться (все коэффициенты допускают это), а он «вдруг» разрывается. Поэтому пришлось вводить эмпирически оправданные, но ни логически, ни физически не обоснованные теории «предельных состояний». В их формировании вслед за Г. Галилеем приняли участие крупнейшие ученые: Г. Лейбниц, Э. Мариотт, Ш. Кулон и др. В этих теориях, по сути, постулировалось то положение, что для каждого материала существуют предельные значения тех или иных напряжений (нормальных или касательных) или же деформаций, при превышении которых тело распадается на части. И с тех пор понятие «предела прочности» как основной прочностной характеристики материалов вошло в научный и инженерный обиход, сохранившись и до наших дней. То обстоятельство, что предел прочности для данного материала мог значительно меняться в зависимости от обработки (отжига, закалки, изменения состава примесей), температуры, скорости или длительности воздействия нагрузки, вызывало, конечно, вопросы, но не вело тогда к пересмотру предельных представлений.

Отметим два философско-методологических пробела в подходе к проблеме прочности, бытовавших до начала XX в.

1. Игнорирование представлений об атомности строения вещества, которые, начиная, вообще говоря, еще с Демокрита, через идеи передовых естествоиспытателей постепенно (хотя и медленно и в большинстве своем умозрительно) проникали в научное мировоззрение.

2. Носящее метафизический характер игнорирование каких-либо процессов, ведущих к разрыву нагруженного тела, и отношение к явлению разрыва как к критическому акту, что и привело к критерию разрушения в виде достижения «предела прочности». Иными словами, разрушение рассматривалось как критическое событие, а не как процесс.

Все эти обстоятельства, дав к началу XX в. неплохую инженерную основу для расчета прочности конструкций из известных материалов, не могли составить научную основу для повышения прочности, для прогнозирования поведения материалов во все усложнявшихся условиях эксплуатации и испы-

таний. Постепенное повышение прочности материалов, разумеется, осуществлялось (составление новых сплавов, различные режимыковки, закалки и т. д.), но это продвижение шло сугубо эмпирически, без выявления скольконибудь систематических и научно обоснованных закономерностей. Короче говоря, до начала XX в. наука о прочности оставалась разделом механики, без, казалось бы, естественной связи с физикой.

Поистине революционизирующие для науки о прочности события произошли в десятых годах XX в. К этому времени в физике появились не только прямые доказательства существования атомов (К. Максвелл, Ж. Перрен, Д. Менделеев, Л. Больцман, М. Лауэ и др.), но были непосредственно определены и многие их характеристики (размеры, масса, элементы внутреннего строения). И тогда на смену представления о твердом теле как о некоей сплошной среде, внутренние свойства которой не имели физического обоснования, пришло представление о телах как «конструкциях» из атомов. Сразу же наметилось совершенно очевидное положение о том, что прочность тела как конструкции из атомов должна определяться силами межатомного сцепления. Впервые началось проникновение физических идей и представлений в науку о прочности. Количественная разработка вопроса связи механической прочности тел со сцеплением составляющих их атомов дала буквально потрясший исследователей результат. В начале XX в. значения сил межатомного сцепления были определены на основе использования различных физических методов (оптических, калориметрических, акустических). Большую роль сыграла молекулярная химия, давшая оценку сил связи атомов в различных молекулах. Все эти данные позволили впервые рассчитать так называемую теоретическую прочность твердых тел: то действительно предельное значение нагрузки, которое может выдержать идеальная конструкция из атомов с известной уже прочностью связей элементов этой конструкции атомов. Расчеты (Ф. Цвикки, Дж. де Бура, М. Борна и др.) привели к значениям теоретической прочности, которые в десятки и сотни раз были выше значений, измеряемых на практике для реальных тел. Разрывную прочность принято измерять в единицах отношения силы к площади поперечного сечения (это можно назвать «отрицательным давлением»). Исторически наиболее распространенной была единица кГ/мм^2 . В настоящее время в единой международной системе СИ принята единица 1 Паскаль (Па) или 1 Мегапаскаль (МПа) = 10^6 Па, $1 \text{ МПа} = 0.1 \text{ кГ/мм}^2$. Обычная разрывная прочность материалов находится в диапазоне $10\text{—}10^3$ МПа. Теоретическая же прочность лежит в области $(1\div 4) \cdot 10^4$ МПа.

Таким образом, по расчетам, опирающимся на физические данные, природа заложила в твердые тела огромный ресурс прочности. Ввиду столь ответственного вывода некоторое время многие сомневались в его достоверности. Эти сомнения были рассеяны работами физиков Ленинградского физико-технического института. Главная гипотеза, выдвинутая для объяснения расхождения теоретической и практической прочности материалов, заключалась в том, что дефекты, неоднородности в строении реальных тел приводят

к неравномерности «загрузки» действительно очень прочных межатомных связей. В нагруженном реальном теле возникают локальные перенапряжения, где нагрузка на отдельных межатомных связях во много раз превышает среднюю по сечению тела, которой и измеряется обычная прочность тел. Там-то под действием теоретической, предельной нагрузки и начинается разрушение материала, распространяющееся затем на все сечение.

Если эта картина соответствует действительности, то можно постараться убрать дефекты или, по крайней мере, уменьшить их число или опасность, тем самым повысить совершенство структуры тела и в результате ожидать значительного повышения прочности. Так и поступил А. Ф. Иоффе в 1924 г., убирая растворением в воде самые опасные поверхностные трещины образцов из монокристаллов каменной соли. Прочность таких образцов возросла в 400 раз (!) и приблизилась к расчетной теоретической, отставая от нее всего в 2—3 раза. Затем в 1930 г. А. П. Александров и С. Н. Журков достигли при обработке поверхности стеклянных и кварцевых волокон огромной прочности: $0.6 \cdot 10^4 \div 1.3 \cdot 10^4$ МПа, что также было всего лишь в 2—3 раза ниже теоретической. Таким образом, теоретическая прочность стала реальностью. Это сыграло чрезвычайно большую стимулирующую роль для дальнейшего развития науки о прочности и прикладных работ. Раз физический ресурс прочности столь высок, то следует добиваться его сперва частичной, а затем и полной реализации. К настоящему времени для десятков материалов в лабораторных условиях путем направленного управления структурой и дефектностью достигнуты значения прочности, сравнимые с теоретической. Все время растет и уровень прочности технических материалов. Так, уже в массовых количествах выпускаются проволоки из различных сталей с прочностью $3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ МПа, полимерные волокна с прочностью $3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ МПа, стеклянные волокна и массивное стекло с прочностью $5 \cdot 10^3 \div 10 \cdot 10^3$ МПа и т. д.

Таким образом, привлечение в науку о прочности физических представлений и данных об атомах оказалось чрезвычайно плодотворным как в научном, так и в практическом отношениях.

Но исчерпалось ли этим этапом «офизичивания» науки о прочности новое в ее развитии и не оказалась ли она в основном завершенной? Отрицательный ответ дают и конкретные факты, и общие физические и методологические соображения.

Во-первых, достигаемые значения прочности в лабораториях, хотя только и в несколько раз, все же оставались ниже расчетных, теоретических значений.

Во-вторых, о чем уже упоминалось выше, складывалось гносеологически неудовлетворительное положение с представлением о пределе прочности. Действительно, вскрытие физических ресурсов прочности, т. е. получение высоких значений теоретического предела прочности, позволяло, вообще говоря, сохранить и старое понятие предела прочности тела. Однако теперь следовало бы говорить, что разрушение тела наступает тогда, когда в отдель-

ных местах достигается теоретический предел прочности при сравнительно низком среднем напряжении. Если же среднее напряжение не достигает такого значения, при котором концентраторы напряжения на дефектах создадут теоретическое, предельное напряжение на межатомных связях, то разрушение, казалось бы, не должно начинаться. Такой вывод входил в явное противоречие с фактами. На практике и в лабораториях многократно отмечалось, что нагруженные тела разрушаются под напряжением, значительно меньшим, чем предел прочности (не теоретический, а обычный, справочный), но только не сразу, а через то или иное время после приложения нагрузки. Кроме того, пределы прочности сильно зависят от температуры тела, снижаясь, как правило, с ростом температуры. Эти обстоятельства требовали научного объяснения и значительно осложняли, а иногда и заводили в тупик технические расчеты.

И, наконец, в-третьих, привлечение представлений только лишь об атомности строения вещества могло быть и недостаточным. Ведь атомы в твердом теле не находятся в покое. Они совершают колебания, интенсивность которых возрастает с температурой. Разумеется, сразу нельзя было сказать, насколько существенна роль теплового движения в определении прочностных свойств материалов, но постановка этого вопроса является уместной.

К 40—50-м годам накопился комплекс вопросов относительно прочности твердых тел, которые требовали решения. Разумеется, техника, в процессе развития которой повышались рабочие температуры, сложным образом менялись нагрузки на работающих деталях, строились крупные объекты многолетнего назначения, со своей стороны подталкивала к продолжению углубления науки о прочности, не позволяла считать ее завершенной.

Именно здесь целесообразно обратиться к уже названному выше методологическому недостатку в изучении природы прочности твердых тел — к фактическому отсутствию физических исследований подготовки нагружаемого тела к разрыву. Определенного типа исследования в данной области, разумеется, проводились. Так, много было собрано сведений по постепенному развитию трещин (правда, уже довольно крупных — от долей миллиметра и выше), по структурно-пластическим изменениям в нагружаемых объектах. Однако систематических исследований самого механизма разрушения на атомно-молекулярном уровне до 50-х годов не проводилось.

А ведь представляется очевидным, что до конца понять природу прочности нельзя без физического исследования «контрпрочности» — разрушения. Когда в полном соответствии с диалектической методологией было обращено внимание именно на подготовку разрыва тела, когда разрушение стали рассматривать как процесс, а прочность, т. е. устойчивость тела по отношению к разрушению, как характеристику процесса разрушения вплоть до его перехода к определенной стадии — разрыву тела, тогда и появилась возможность выяснения поставленных выше вопросов. При этом обнаружились неожиданные и новые аспекты в физике прочности. Изучение самого процесса раз-

рушения стало носить кинетический характер. Ясно, что переход к рассмотрению разрыва не как критического акта, наступающего внезапно и как бы неожиданно, а как результата развития процесса разрушения, как результата кинетики разрушения — есть переход от известной метафизичности в науке о прочности к диалектической форме ее изучения.

Кинетические исследования разрушения начались опять-таки в Ленинградском физико-техническом институте в конце 40-х—начале 50-х годов под руководством С. Н. Журкова. А уже в 60-х годах была создана Всемирная организация — Международный конгресс по разрушению (International Congress of Fracture). Характерно, что задачей этой организации было выяснение путей упрочнения материалов и повышения надежности работы конструкций, но названа она была не «Конгрессом по прочности», а «Конгрессом по разрушению». Еще раз подчеркнем, что интересы были не в том, как легче и эффективней разрушать (хотя, к сожалению, и подобные задачи технике приходится решать), а как лучше препятствовать разрушению. Думается, что приведенным примером с постановкой вопроса о прочности в международном масштабе также хорошо демонстрируется важнейшая роль исследования разрушения в решении задач прочности.

Что же дает изучение самого процесса разрушения? Прежде всего была тщательно изучена способность тел разрушаться и при малых нагрузках, когда требовалось то или иное время ждать разрыва (как отмечалось выше, досадный факт в концепции предельных критериев разрыва). Время ожидания разрыва стало важнейшей кинетической характеристикой разрушения — оно приобрело название «долговечность». Выяснилось, что это время при заданной нагрузке чрезвычайно резко зависит от температуры (снижаясь по показательному (!) закону с ростом температуры). Поскольку температура тела является мерой интенсивности теплового движения атомов, то обнаружившаяся температурная зависимость долговечности позволила решить вопрос о роли теплового движения в разрушении. Оказалось, что эта роль не только существенна, но в значительной мере — решающая. Особый интерес составило выяснение той формы, в которой тепловое движение атомов участвует в процессе разрушения. Дело в том, что отдельные соображения о возможном влиянии теплового движения атомов на прочность тела высказывались давно. Слишком уж очевидной была картина, когда воздействию внешней силы противостоит не статическая система (конструкция из неподвижных атомов), а система, в которой элементы колеблются, «дрожат», и это естественно должно менять степень устойчивости нагруженной системы. Однако оценки показали, что в привычной картине общего теплового состояния твердого тела, когда атомы совершают небольшие колебания около положений равновесия, влияние средних колебаний на прочность ^весьма мало. И здесь надо подчеркнуть то важнейшее положение, что тепловое поведение атомов в твердом теле не исчерпывается средними небольшими колебаниями. В силу хаотичности теплового движения и связи атомов друг с другом время от времени отдельные атомы приобретают резко повышенные значения энергии (до

десятков раз выше средних). Эти события называют флуктуациями энергии. Образно говоря, в твердом теле время от времени в разных точках (на разных атомах или межатомных связях) как бы вспыхивают микровзрывы. С увеличением температуры частота флуктуации резко (по показательному закону) возрастает. Такая картина теплового движения, в теоретическую разработку которой в 40-х годах решающий вклад внес Я. И. Френкель, явилась большим достижением физики твердого тела и жидкости, поскольку только на основе флуктуационных событий можно объяснить явления диффузии, испарения и т. п. Что же касается разрушения, то, как показал анализ зависимости долговечности от температуры, именно за счет флуктуации энергии осуществляются разрывы межатомных связей. Таким образом, в добавление к описанной выше структурно-дефектной гетерогенности реальных твердых тел важным фактором разрушения выступила динамическая гетерогенность: неравномерность, неоднородность распределения энергии тепловых колебаний (внутренней колебательной динамики) по объему твердого тела.

Какова же роль нагрузки в разрушении? Ведь ничего не казалось более очевидным, чем то, что внешняя нагрузка, распределившись по межатомным связям, их и разрывает. Оказалось, что такая очевидность, как уже не раз бывало в физике, не отвечает физической реальности. Внешняя нагрузка лишь напрягает межатомные связи, уменьшая величину энергии их разрыва. А далее, напряженные связи «ждут» прихода разрывных флуктуации. Отсюда и появляется «долговечность» тела — время ожидания достаточного количества последовательных флуктуации для разрыва достаточного числа межатомных связей и тем самым — разрыва всего тела, т. е. его разрушения.

Флуктуации могут разрывать связи и в ненагруженном теле, но такие разрывы быстро восстанавливаются. В нагруженном же теле восстановление разорванных связей (рекомбинация) резко затрудняется, и идет накопление разорванных связей во времени. Иначе говоря, внешняя нагрузка играет роль своеобразного «вентиля», облегчая флуктуационный разрыв связей и затрудняя их рекомбинацию. Еще раз подчеркнем: сам разрыв связей производит не внешняя сила, а порожденные тепловыми колебаниями флуктуации энергии.

Таким образом, произошел весьма радикальный пересмотр представлений о механизме разрушения твердых тел под нагрузкой. Оказалось, что в представлявшейся простой и очевидной картине механического разрушения обнаружили парадоксальные с позиций привычных понятий формы разрушения. И здесь уместно сказать о поразительном предвидении механизма разрушения, сделанном Ф. Энгельсом еще в 70-х годах прошлого века. В книге «Анти-Дюринг» он писал: «Если он (камень на веревке, — А. С., В. Р.) будет висеть достаточно долгое время, то веревка оборвется, как только она вследствие химического разложения окажется недостаточно крепкой, чтобы поддерживать камень»*.

Как нам кажется, это один из ярких примеров плодотворного влияния

* Энгельс Ф. Анти-Дюринг. — Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд., т. 20, с. 61.

прогрессивной диалектико-материалистической философии на предсказание путей развития наук, в данном случае — одной из естественных наук. Из цитаты видно, что Ф. Энгельс сформулировал самую суть разрушения как процесса не чисто механического, а связанного с внутренней динамикой тела. И опирался он не на конкретные факты, относящиеся к микроструктуре твердых тел (таких фактов тогда просто не было), а на общие физические и химические представления, сложившиеся к тому времени.

Изложенные новые, кинетические представления о механизме разрушения, как всякие более адекватные реальности, чем имевшиеся ранее, оказали большое плодотворное влияние на развитие науки о прочности. Эти представления объяснили многие загадки в области прочности. Появилась возможность вести расчеты работоспособности изделий и конструкций в сложных условиях изменяющихся температур и режимов нагружения.

Стали развиваться и прочностные исследования нового типа.

Когда скоро разрушение есть процесс, происходящий во времени, то, естественно, необходимо исследование конкретных форм и деталей этого процесса. Выводы о флуктуационном механизме разрыва напряженных межатомных связей носят самый общий характер, они составляют физическую основу процесса разрушения, но, разумеется, не исчерпывают всего содержания этого процесса. Последние десятилетия характеризуются небывалым до того размахом в использовании множества тонких физических и физико-химических методов для получения прямой информации о конкретных формах и деталях процесса разрушения. Так, выясняются структурные особенности материалов, создающие места повышенных напряжений, где наиболее интенсивно развивается термофлуктуационный процесс разрушения. Непосредственно регистрируются разрывы межатомных связей и измеряется накопление этих разрывов. Прослеживается очень важный этап разрушения — переход от одиночных разрывов связей к возникновению зародышевых разрывов сплошности — мельчайших трещин (с размерами в десятки — сотни размеров атомов). Далее выясняются закономерности укрупнения зародышевых трещин, которое может идти путем как индивидуального роста трещин, так и их слияния. После достаточной степени укрупнения трещин формируются магистральные трещины, прорастание которых через сечение образцов и приводит к разрушению. Очень важно подчеркнуть, что на всех отмеченных этапах разрушения выявляется единый атомно-молекулярный механизм — флуктуационный разрыв напряженных связей. Таким образом, представление о разрушении как о процессе, подводящем нагруженное тело к разрыву, наполняется конкретным и детальным содержанием. Именно эта информация открывает новые пути упрочнения материалов, увеличения их работоспособности, продления их долговечности. Эти же данные позволяют решать важные задачи прогнозирования работоспособности уже эксплуатируемых систем, выяснения степени исчерпания их прочностных ресурсов со временем.

Поэтому сейчас можно говорить о том, что исследования прочности вы-

шли на новый и плодотворный этап. Многообразие материалов и условий, в которых они работают, выдвигает широкий круг задач, связанных с кинетическими (как феноменологическими, так и микроскопическими) исследованиями. Для их решения потребуются еще многие годы. Но есть основания считать, что решающие методологические основы в подходе к разработке проблемы прочности уже найдены*.

Глубокое проникновение общих физических положений в науку о прочности (атомное строение твердых тел, тепловые колебания атомов, флуктуации на этих колебаниях) делает разработку этой науки очень интересной, позволяет говорить о «физике прочности». И поэтому вопросы, которые и сейчас решаются в науке о прочности, связаны с проблемами самой физики.

В качестве примера можно привести вопрос о механизме разрушения при низких температурах. Тепловые колебания с понижением температуры должны ослабляться вплоть до полного затухания. Тогда должны исчезнуть и флуктуации энергии тепловых колебаний, а следовательно, отпасть и термофлуктуационный механизм разрыва связей. Наконец-то, казалось бы, можно получить статический случай разрушения, т. е. взаимодействие внешней нагрузки и неподвижной конструкции из атомов и разрывы межатомных связей только за счет внешней механической силы. Однако фундаментальные квантовые законы физики утверждают, что в твердых телах колебания атомов не прекращаются и при абсолютном нуле температуры. Остаются так называемые нулевые квантовые колебания, существование которых является прямым следствием принципа неопределенности (этот принцип отражает неадекватность нашего представления об атоме как о частице с определенными координатами и импульсом). Нулевые колебания — вполне обоснованная (экспериментально и теоретически) реальность. Поскольку твердое тело «не замерзает» и при самых низких температурах, то и здесь возможны флуктуационные эффекты (так называемые туннельные переходы), а следовательно, и кинетика разрушения при самых низких температурах. Вопрос об участии квантовых флуктуации в процессах химического типа в твердых телах только недавно начал разрабатываться в физике. Тем не менее предположения о возможности квантово-флуктуационной кинетики разрушения уже высказаны, теоретические оценки произведены и эксперименты начаты. Первые результаты показали соответствие низкотемпературных закономерностей разрушения ряда твердых тел соображениям о квантовых флуктуациях. Этот пример показывает, что наука о прочности не только использует уже укрепившиеся фундаментальные положения физики, но и развивается непосредственно с развитием самой физики.

Подводя итоги, хочется еще раз подчеркнуть то сравнительно бурное развитие, которое прошла и проходит древняя наука о прочности. Есть все

* Анализ данных по кинетике разрушения, а также библиографию по этому вопросу можно найти в монографии: Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974.

основания говорить о том, что эта наука далеко еще не достигла «финиша». Особо требуется отметить то обстоятельство, что подход к разрушению именно как к процессу дал основание рассматривать механическую прочность тел как такое свойство, которое имеет не «чисто механическую» природу, определяемую только силовым взаимодействием атомов, а кинетическую природу, определяемую закономерностями внутренней атомной динамики в твердых телах. Поэтому кинетический подход к разработке проблем прочности является той основой, которая правильно отражает существенные стороны физической природы прочности и в настоящее время является необходимой для дальнейшего развития науки о прочности.

Источник: **Источник:** Физика: Проблемы. История. Люди: Сб. статей / Сост.: В.М. Тушкевич, Ред. колл.: В.Я. Френкель (пред.) и др. — М.: Наука, 1986.