

**РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

(обзор работ А. В. Степанова)

Г. В. Курдюмов, М. В. Классен-Неклюдова

СОДЕРЖАНИЕ

1. Роль пластической деформации при разрушении кристаллических тел	525
2. Причина возникновения сдвигов в кристаллах	527
3. Зародыши сдвига. Искусственное сдвигообразование	528
4. Связь механических характеристик с другими физическими свойствами кристаллов	529
5. «Прозрачные металлы». Связь механических свойств со свойствами атомов. Фотоупругость. Фотопластичность	529
6. Разрушение периодически неоднородных анизотропных сред	530
7. Упругие свойства и их температурная зависимость	530
8. Механические свойства поликристаллов и монокристаллов при гелиевых температурах	531
9. Дислокационные представления	531
10. Нитевидные кристаллы	531
11. Изучение капиллярных и тепловых условий кристаллизации. Получение изделий непосредственно из расплава металлов	531
Цитированная литература	533

В этой статье мы хотим дать обзор работ и идей одного из основоположников учения о прочности и пластичности твердых тел — члена-корреспондента АН СССР Александра Васильевича Степанова. За период своей творческой жизни с 1930 по 1972 гг. своими экспериментальными и теоретическими исследованиями он внес большой вклад в развитие физики твердого тела.

Его работы и работы его школы охватывают широкий круг вопросов, начиная с изучения процессов разрушения кристаллов, механизма их пластической деформации, до вопросов управления процессами кристаллизации и получения металлических изделий сложного профиля непосредственно из расплава. В своих теоретических исследованиях он развивает представление не только о механических свойствах кристаллических материалов, он формулирует общие закономерности разрушения для кристаллов, ориентированных полимеров, волокнистых материалов (древесина, композиты), биологических и геологических структур.

**1. РОЛЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ**

Одним из особо существенных результатов, полученных А. В. Степановым, является установление общей природы дефектов, приводящих к разрушению кристаллических тел. Начало физического учения о разрушении твердых тел было положено английским ученым Гриффитсом

(1922 г.)¹ и выдающимся советским ученым академиком Абрамом Федоровичем Иоффе (1920—1925 гг.)². А. Ф. Иоффе выполнены первые систематические исследования в этой области, в значительной мере на долгие годы предопределившие пути ее развития. В дальнейшем эти исследования были продолжены его многочисленными последователями и учениками.

В известной работе, выполненной на кристаллах хлористого натрия, А. Ф. Иоффе в 1923 г. был установлен ряд фундаментальных фактов и выдвинуты основные представления о природе прочности твердых тел. К числу наиболее существенных результатов, относящихся к природе хрупкого разрушения, следует отнести:

а) установление взаимоотношения между хрупким и пластичным разрушением при изменении температуры (известное под названием схемы А. Ф. Иоффе хрупкого разрушения);

б) установление факта исключительного влияния состояния поверхности на характер разрушения (так называемого эффекта Иоффе);

в) экспериментальное доказательство того, что прочность кристаллов соответствует предсказываемой теоретически (при проведении испытаний в определенных условиях).

В период между 1923—1933 гг. господствовала точка зрения, что трещины, приводящие к хрупкому разрушению, возникают в результате развития зародышевых трещин, заранее до нагружения образца, существовавших на его поверхности, что природа хрупкого разрушения всех кристаллов, а следовательно, и металлов та же, что и стекла. Однако работы, выполненные в лаборатории А. Ф. Иоффе после 1923 г., показали, что первоначальные представления о хрупком разрушении не являются исчерпывающими.

К 1933 г. накопился ряд противоречий при попытке понять разрушение кристаллов только с точки зрения трещин, существующих на поверхности образцов до их испытания, что было показано подробными исследованиями эффекта Иоффе³.

Новый важный этап учения о разрушении кристаллов начался с работ А. В. Степанова⁴⁻⁷. Им была выдвинута новая точка зрения, которая давала выход из этих противоречий. Он предположил, что очаги хрупкого разрушения возникают в кристалле в процессе нагружения за счет пластической деформации, которая хотя бы в самой ничтожной степени всегда предшествует излому. Под пластической деформацией понимались всевозможные проявления пластического формоизменения кристаллов — скольжение, двойникование и др. При всех этих процессах в кристаллах образуются опасные дефекты, вызывающие разрушение, в том числе и микротрещины.

Далее А. В. Степанов поставил ряд остроумных, простых, но четких опытов с целью проверки и обоснования этой гипотезы, подтвердивших ее правильность⁸⁻¹⁰. Он показал также, что его точка зрения позволяет однозначно объяснить все известные случаи наблюдаемого изменения прочности. Дал объяснение ряду явлений, сопровождающих нагружение кристаллов, в том числе и эффекту А. Ф. Иоффе¹¹.

В этих опытах также наглядно демонстрируется связь появления трещины разрыва с пластической деформацией и с первичными дефектами на поверхности кристаллов.

Выдвинутая А. В. Степановым гипотеза в свое время не встретила сочувствия, а проведенные им исследования казались большинству недостаточно убедительными. Автору этой гипотезы пришлось выдержать большую борьбу, так как представление о том, что пластическая деформация, упругияющая кристаллические материалы, подготавливает условия

для хрупкого разрушения, противоречило установившимся тогда понятиям и воззрениям. Дальнейшее экспериментальное изучение условий хрупкого разрушения неизменно подтверждало его тесную связь с предшествовавшей микропластичностью^{12,13}.

По существу, каждое новое исследование, посвященное выяснению условий осуществления хрупкого и пластического разрушения, дает нам теперь новое подтверждение гипотезы А. В. Степанова (например, ^{14, 15}). Сейчас это в свое время революционное положение следует считать доказанным и принятым мировой наукой.

Следующим (третьим) важным этапом в учении о хрупкости было появление дислокационных теорий и их применение к проблеме разрушения кристаллов. Не вдаваясь в рассмотрение дислокационных теорий разрушения, отметим, что все они принимают выдвинутые А. В. Степановым общие представления о роли пластической деформации в разрушении кристаллов. Так, например, в обзоре В. Л. Инденбома и А. Н. Орлова¹⁶ сказано: «В теории дислокаций рассмотрен ряд атомных механизмов зарождения трещин, представляющих, по существу, коагрегацию общей идеи А. В. Степанова о возникновении очагов разрушения вследствие неоднородного протекания пластической деформации». В своем обзоре Гилман¹⁷ отмечает (ссылаясь только на работу А. В. Степанова в 1937 г.)¹⁸: «Степанов был первым, кто понял, что пластическая деформация может вызывать зарождение трещин в ионных кристаллах»; «его выводы были отчетливо подтверждены недавними работами» и т. д.^{19, 20}.

Далее в процессе исследований, поставленных с целью установления связи между первичными дефектами, имеющимися до опыта на поверхности кристалла, и вторичными, возникающими из-за пластической деформации, А. В. Степановым с помощью поляризационно-оптических методов (привлеченных к изучению пластичности кристаллов И. В. Обреимовым и Л. В. Шубниковым²¹) было открыто важное явление, имеющее отношение к природе пластичности и приобретшее самостоятельный интерес.

2. ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ СДВИГОВ В КРИСТАЛЛАХ

Обсуждая эти работы, надо постараться представить себе состояние наших знаний о природе пластичности кристаллов 35 лет назад. Тогда было известно, что пластическое формоизменение кристаллов возможно за счет явления скольжения, однако причина, вызывающая скольжение, была еще не ясна. Мы не умели управлять этим явлением. В это время А. В. Степанов обнаружил очень существенный факт. Оказалось, что если повредить поверхность кристалла так, чтобы повреждение было ориентировано по отношению к его кристаллографическим осям, то при последующем нагружении от такого повреждения при некоторой нагрузке (приблизительно совпадающей с пределом упругости) могут распространяться сдвиги²²⁻²³. Таким образом, была открыта пока в «макромасштабе» причина возникновения сдвигов в кристаллах. Исследования этого явления, выполненные в период 1937—1939 гг., привели к установлению следующих фундаментальных фактов:

Наличие двухстадийности процесса образования сдвигов. Первая стадия — образование «зародыша» сдвигов, которая согласно представлениям А. В. Степанова требовала больших (теоретических) локальных напряжений. Вторая стадия — разрастание «зародыша» сдвига. Было установлено, что рост зародыша начинается при напряжениях, совпадающих с реальным пределом упругости. Тем самым был выяснен физический смысл предела упругости как напряжений, при которых становится возможным рост зародышей сдвигов²⁷

3. ЗАРОДЫШИ СДВИГА. ИСКУССТВЕННОЕ СДВИГООБРАЗОВАНИЕ

Возможность роста сдвигов из «локально наклепанной» или «упрочненной» области была далеко не очевидна. Все эти явления были в то время новыми, неожиданными, и создавали основу для дальнейшего изучения процесса пластичности. Понятие зародыша на данной стадии исследования носило условный характер. Нужно было выяснить природу этой области кристалла. В этом направлении А. В. Степановым был проведен ряд опытов, в которых он стремился локализовать положение зародышей, а также определить условия их возникновения.

А. В. Степанов всесторонне исследовал обнаруженное им явление и нашел ряд важных закономерностей, относящихся к процессу сдвигов образования. Им был прослежен процесс роста зародышей сдвигов и их превращение в макросдвиги. Открыто существование «левых» и «правых» сдвигов, т. е. по современной терминологии — дислокаций разных знаков. Обнаружено явление интерференции сдвигов. Прослежено влияние растворения на условие сдвигообразования и др.^{28, 29}.

Лишь в 1956 г., т. е. 20 лет спустя после работ А. В. Степанова, появляются интересные работы Гилмана^{30, 31}. Они являются как бы естественным продолжением только что рассмотренных работ А. В. Степанова. Опыты Гилмана аналогичны опытам А. В. Степанова, но выполнены более тонким и более универсальным методом обнаружения локальных деформаций, чем поляризационно-оптический. Он применил избирательное травление³².

При этих исследованиях Гилманом был обнаружен ряд закономерностей, установленных ранее А. В. Степановым, которые относятся к возникновению и развитию сдвигов в кристаллах. С другой стороны, в этой работе содержатся существенно новые данные, позволяющие значительно продвинуться по пути познания явления пластичности. В частности, из работ Гилмана следует, что «зародыши сдвигов» А. В. Степанова являются группами петель дислокаций. Экспериментальное изучение механизма процесса пластичности сдвигообразованием, таким образом, идет по пути, намеченном Степановым еще в 30-е годы.

Метод изучения механизма процесса пластичности путем исследования областей локальных нарушений кристалла, введенный А. В. Степановым (областей вблизи царапин, уколов, вершин, трещин и т. п.), получил широкое распространение^{32, 33}. Несмотря на то, что ссылки на рассмотренные здесь работы А. В. Степанова не часто встречаются в литературе, в данном случае его приоритет был признан. Так, в обзоре Гилмана¹⁷ указывается: «Обработка поверхности влияет на наклон диаграммы «напряжения — деформация» в области деформационного упрочнения. Вероятно, это также не является основным эффектом в упрочнении. Скорее, это происходит из-за того, что распределение скольжения (и, следовательно, плотности дислокаций) в кристалле зависит от методики приготовления поверхности». Основные черты этого явления уже давно исследованы А. В. Степановым (ссылка на статьи А. В. Степанова^{11, 22, 23}). Он нашел, что от поверхностных дефектов возникают пары полос скольжения, которые он мог наблюдать по вызываемому ими двупреломлению. Однако чрезвычайная тонкость эффекта влияния поверхности была понята только тогда, когда обнаружили, что отдельная полупетля у поверхности может породить большую полосу скольжения, содержащую тысячи дислокаций. Таким образом, остаточные дислокационные петли или очень маленькие дефекты, способные зародить дислокационную петлю под действием напряжения, могут оказывать существенное влияние на ход диаграмм «напряжения — деформация».

Далее в процессе выяснения условий разрушения «хрупких ориентаций» кристаллов А. В. Степанов обнаружил в кристаллах хлористого натрия скольжение по плоскостям куба $\{100\}$ в направлениях $\langle 110 \rangle$ ^{25, 34}. Он изучил ряд особенностей скольжения по этой плоскости по сравнению со скольжением по плоскостям $\{110\}$ в направлениях $\langle 110 \rangle$. Было также изучено влияние поверхностных нарушений на условия сдвигообразования. Общность явления двустадийности процесса сдвигообразования оказалась справедливой и в этом случае. При этом было установлено чрезвычайно важное новое обстоятельство. Оказалось, что условиями роста зародыша являются достижение не только определенных напряжений, но и определенной температуры.

4. СВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ДРУГИМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ КРИСТАЛЛОВ

Среди результатов работ того времени следует отметить:

а) Установление правила, связующего теплоту плавления с работой деформации^{35, 36}. Это правило позволило А. В. Степанову предсказать в 1932 г. неизвестные тогда механические свойства бериллия.

б) Открытие эффекта электризации полос скольжения при пластической деформации ионных кристаллов⁴, в современной терминологии — заряженных дислокаций. За последнее время это явление привлекает большое внимание и получило в литературе название эффекта А. В. Степанова^{36, 37}.

в) Исследования влияния пластической деформации на электропроводность ионных кристаллов (это явление теперь носит название эффекта Дьюлай — Хартли³⁸), на основе которых А. В. Степанов доказал свою гипотезу деформации узких областей кристалла в процессе скольжения^{5, 36}.

5. «ПРОЗРАЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ». СВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СО СВОЙСТВАМИ АТОМОВ. ФОТОУПРУГОСТЬ. ФОТОПЛАСТИЧНОСТЬ

Пытаясь ответить на вопрос о связи характера разрушения и механических свойств кристаллов со свойствами атомов, их образующих³⁹, А. В. Степанов открыл, что определенная группа кристаллов (галогидные соединения серебра и таллия и сплавов на их основе) обладают необычными для ионных и атомных кристаллов механическими свойствами. В этом отношении они ведут себя подобно металлам, что дало повод назвать их «прозрачными металлами»⁴⁰⁻⁴⁵.

А. В. Степанов вырастил впервые крупные монокристаллы этих веществ; он подробно изучил их свойства и дал объяснение их особому поведению, установив связь механических свойств с поляризуемостью атомов, указав, что взаимная поляризация ионов, уменьшая их электрическое отталкивание, должна сильно влиять на пластичность ионных кристаллов. Эти результаты имели большое значение в разработке и понимании механизма процессов пластичности и разрушения кристаллов. Кроме того, оказалось, что особые свойства этих кристаллов имели ряд разнообразных практических приложений (например, ТlVg — TI = = KPC-5). Впоследствии А. В. Степановым на основе использования этих материалов был разработан ряд новых методов исследования напряженных состояний в кристаллических, поликристаллических и анизотропных средах^{29, 42-47}. В последующем разнообразные исследования и применения этих веществ получило очень широкий размах.

Как известно, общую теорию фотоупругости кристаллов дал Покельс. А. В. Степанов с сотрудниками развил теорию фотоупругого эффекта в кубических кристаллах при плоском нагруженном состоянии⁴³⁻⁴⁷. До работ А. В. Степанова для изучения напряженного состояния металлических конструкций применялись модели из аморфных материалов, стекла, пластмасс. А. В. Степановым предложен и разработан новый оптический метод изучения напряженного состояния металлов, используя в качестве моделей галоиды серебра и талия. «В моделях таких материалов можно судить не только о распределении напряжений, но и о структурных изменениях, происходящих при пластической деформации».

6. РАЗРУШЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Как уже упоминалось, до работ А. В. Степанова теория разрушения твердых тел основывалась на воззрениях Гриффитса — Иоффе. Согласно этим представлениям наличие трещин и пор, являющихся концентраторами напряжений, должно приводить к снижению прочности материалов, «однако дерево и кость, несмотря на свое неоднородное пористое строение, имеют высокие механические свойства», — отмечает А. В. Степанов (1950 г.). — «Высокие механические свойства дерева и кости обусловлены не только их составом, но как раз их своеобразной тончайшей структурой, порождающей анизотропию упругости и прочности. Анизотропия механических свойств может привести к затруднению развития разрушения в некоторых направлениях и тем самым создать условия для реализации более высоких прочностей»⁴⁸. В период 1948—1950 гг. А. В. Степановым заложены основы физического учения о разрушении периодически неоднородных и анизотропных сред. Показана возможность установления общих закономерностей разрушения для столь различных объектов, как кристаллы, ориентированные полимеры, волокна, биологические и геологические структуры, поскольку эти закономерности определяются лишь неоднородностями и их пространственным распределением⁴⁸⁻⁵³. Эти соображения А. В. Степанова приобретают в настоящее время особое практическое значение в связи с развитием промышленного применения композиционных материалов, являющихся макроскопически периодически-неоднородными средами⁵⁴. А. В. Степановым предсказано и обосновано существование особой группы явлений, названных им «механо-ориентационными явлениями», которые играют фундаментальную роль в различных структурных превращениях кристаллов под действием внешних механических сил. К таким явлениям, например, он относит механическое двойникование кристаллов и спайность^{55, 53}.

7. УПРУГИЕ СВОЙСТВА И ИХ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

А. В. Степанов один из первых подчеркнул необходимость изучения упругих свойств кристаллов как свойств, непосредственно определяемых силами связи и связанных со всеми свойствами кристаллов. Под его руководством разработаны новые методы измерения упругих констант кристаллов и проведены обширные исследования их температурной зависимости, особенно в области температур, близких к плавлению⁵⁷⁻⁶². Исследованы в основном кристаллы галоидных соединений щелочных металлов. Показано, в частности, что характер температурной зависимости определяется видом металлического иона. Определен вклад теплового расширения и колебаний решетки в температурные коэффициенты постоянных упругости⁶².

Установлен ряд расхождений между атомной теорией упругих свойств и данными опыта. Показано, что теория Лейпфрида и Гипа дает хорошие результаты только в случае расчета температурных влияний тех постоянных упругости твердых растворов, которые слабо зависят от температуры⁶². Лаборатория А. В. Степанова является одним из призванных центров в области физики упругости.

8. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛОВ И МОНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ ГЕЛИЕВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В этой же лаборатории впервые в мировой науке начаты (1955 г.) и проведены исследования механических свойств разных металлов при очень низких температурах (4,2 — 1,6 °К)⁶³⁻⁶⁹. Создан ряд оригинальных приборов для изучения механических свойств металлов при гелиевых температурах. Открыт ряд новых явлений (нестационарность диаграммы растяжения, изменение характера разрушения). Эти исследования приобретают теперь практическое значение в связи с освоением космического пространства. Для разработки теории пластичности кристаллов изучены механические свойства ионных кристаллов в области гелиевых температур. Обнаружено при этих температурах наличие пластичности и ряд особенностей сдвигообразования^{70, 71}. В настоящее время эти работы успешно развиваются в направлении получения сведений для развития дислокационной теории пластичности.

9. ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Школой А. В. Степанова внесен несомненный вклад в развитие дислокационных представлений⁷²⁻⁷⁴, которые развиваются по пути, намеченному еще в первых его работах. Нельзя умолчать о том, что А. В. Степанов в свое время выступал против легкого отношения к дислокационным представлениям⁷³ и в дальнейшем умело расширил экспериментальные основы этой теории. В его лаборатории начаты и успешно продолжены Э. М. Надгорным исследования динамики дислокаций в ионных кристаллах, позволяющие уяснить: механизмы процесса движения дислокаций в разных условиях, роль сопротивления кристаллической решетки, роль точечных дефектов, элементарных возбуждений, взаимодействия дислокаций друг с другом, и сопоставить основные динамические характеристики микропластичности с характеристиками макропластичности.

10. НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Руководимой А. В. Степановым лабораторией внесен существенный вклад в постановку широких исследований свойств нитевидных кристаллов⁷⁶. Лаборатория в этом направлении была своего рода школой для многих молодых работников других институтов. Сотрудниками⁷⁶ лаборатории проведены исследования прочности и упругости нитевидных кристаллов ряда веществ.

11. ИЗУЧЕНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ И ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ НЕПОСРЕДСТВЕННО ИЗ РАСПЛАВА МЕТАЛЛОВ

Невозможно переоценить инициативу, идеи и работы Александра Васильевича Степанова в науке и практике роста кристаллов.

Большинство материалов и сплавов перерабатывается в изделия (листы, трубы, прутки, проволоку и т. д.) обработкой давлением (прокаткой, прессованием, волочением) крупных слитков. А. В. Степанов осуще-

ствил получение разнообразных изделий из металлов непосредственно из металлического расплава⁷⁷⁻⁸⁴. Им создан для этой цели ряд оригинальных установок. Сущность способа А. В. Степанова следующая: «На горизонтальную поверхность расплавленного металла помещается пластинка из материала, маловзаимодействующего с расплавом. В пластинке имеется прорез — щель, вид и размеры которой находятся в соответствии с видом и размерами изделия. Пластинка называется — поплавок или формообразователь. Через щель формообразователя в расплав опускается заправка, форма которой соответствует профилю получаемого изделия. К заправке пристает расплав. При движении заправки вверх приставший расплав будет за ней тянуться. Попадая в область более низких температур, расплав будет застывать, превращаясь в изделие»⁸⁴.

Следует отметить, что попытки получать из расплава изделия требуемого профиля делались и раньше. Эти работы, однако, были посвящены частным технологическим разработкам, не обоснованным теоретически. Способ Степанова основан на особом, оригинальном принципе формообразования, состоящем в том, что жидкость можно заставить принимать определенную форму в свободном состоянии. Этот принцип А. В. Степанов формулирует так: «Форма или элемент формы, которую желают получить, создается в жидком состоянии за счет различных эффектов, позволяющих жидкости сохранить (нужную) форму, затем эта форма или ее элемент переводится в твердое состояние в результате подбора соответствующих условий кристаллизации»⁸³. Возможно много вариантов способа Степанова. Ряд вариантов уже с успехом опробован, другие ждут еще своего решения. Наиболее разработан вариант капиллярного формообразования, использующий поверхностные свойства жидкости — ее смачиваемость. В литературе способ Степанова поэтому часто называют капиллярным формообразованием. Способ Степанова был опробован на алюминии, меди, их сплавах, чугунах, щелочно-галогенидных солях, полупроводниковых материалах. А. В. Степановым с сотрудниками исследованы основные свойства таких изделий. Поверхность изделий приближается к полированной, допуски по размерам приближаются к ГОСТам по аналогичным изделиям, полученным протяжкой или прессованием. А. В. Степановым исследованы теоретически тепловые условия процесса, им экспериментально и теоретически существенно развиты учения о капиллярных явлениях^{82, 84}. Применение формообразователей при процессах кристаллизации открывает новые возможности для управления и контроля процессов кристаллизации. Оказалось возможным выращивать монокристаллы заданной формы⁸⁴. Это сокращает отходы материала, уменьшает трудоемкость обработки и открывает новые технологические возможности для конструкторов приборов, использующих монокристаллы. Получение монокристаллов полупроводников заданной формы способом А. В. Степанова в настоящее время осваивается отечественной промышленностью.

В самые последние годы за рубежом появилось много работ по получению профилированных изделий и монокристаллов. Имеется большое количество патентов и работ, посвященных решению этой проблемы. Однако, по сути дела, во всех предлагаемых приемах получения профилированной продукции лежат в основе фундаментальные исследования А. В. Степанова.

Александр Васильевич уделял много внимания и сил организации ежегодных совещаний, посвященных получению технически важных монокристаллов предложенными и разработанными им способами кристаллизации, а также перспективам применения монокристаллов в отечественном приборостроении⁸⁴.

Закрывая одно из совещаний по физике прочности кристаллов в Ленинграде, Александр Васильевич сказал: «Мы все думаем и обсуждаем, как подтянуть реальную прочность твердых тел до значений, даваемых теорий. Пора нам начать думать о создании новых материалов с прочностью, превышающей теоретическую прочность существующих веществ».

Александр Васильевич Степанов скончался 16 мая 1972 г., и многие из его идей и работ и работ его учеников не нашли еще своего завершения.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Griffith, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **A221**, 163 (1920).
2. A. F. Ioffe, *Phil. Mag.* **43**, 204 (1922); *Zs. Phys.* **22**, 286 (1924); *Тр. ЛФТЛ* **2**, 5 (1925).
3. М. В. Классен-Неклюдова, Диссертация (1936); *ЖЭТФ* **6**, 584 (1936).
4. А. В. Степанов, *Zs. Phys.* **81**, 560 (1933).
5. А. В. Степанов, *Phys. Zs. Sowjetunion* **4**, 609 (1933).
6. А. В. Степанов, *Zs. Phys.* **92**, 42 (1934).
7. А. В. Степанов, *ЖТФ* **5**, 349 (1935).
8. А. В. Степанов, *Phys. Zs. Sowjetunion* **12**, 182 (1937).
9. А. В. Степанов, *ibid.*, стр. 191.
10. А. В. Степанов, *ibid.*, стр. 343; *ЖЭТФ* **7**, 1168 (1937).
11. А. В. Степанов, *ДАН СССР* **15**, 539 (1937).
12. А. В. Степанов, *Изв. АН СССР (Отд. матем. и естеств. наук)*, 797 (1937).
13. А. В. Степанов, Диссертация (1933).
14. *Fracture of Solids, Proc. of the Intern. Conference, Mape-Valley, Washington, August 1962* (см. перевод: *Разрушение твердых тел*, М., «Металлургия», 1967).
15. *Fracture, Proc. of the Intern. Conference held in Swampscott, Massachusetts, April 1959* (см. перевод: *Атомный механизм разрушения*, М., Изд-во черной и цветной металлургии, 1963).
16. В. Л. Инденбом, А. Н. Орлов, *УФН* **76**, 557 (1962).
17. Дж. Гилман, *УФН* **80**, 455 (1963).
18. А. V. Stepanov, *Nature (L.)* **140**, 64 (1937).
19. R. J. Stokes, T. L. Johnston, C. H. Li, *Phil. Mag.* **3**, 718 (1958).
20. I. Washburn, A. E. Gogun, E. R. Parker, *Trans. Am. Inst. Engrs.* **215**, 230 (1951).
21. И. В. Обреимов, Л. В. Шубников, *ЖРФХО* **58** (1926).
22. А. В. Степанов, *Физика СССР* **5**, 421 (1940).
23. А. В. Степанов, *ЖТФ* **17**, 713 (1947).
24. А. В. Степанов, *ЖЭТФ* **18**, 741 (1948).
25. А. В. Степанов, Е. А. Милькаманович, *ibid.*, стр. 773.
26. А. В. Степанов, *ibid.*, стр. 776.
27. А. В. Степанов, Е. А. Милькаманович, *ЖЭТФ* **21**, 401 (1951).
28. А. В. Степанов, Е. А. Милькаманович, *ibid.*, стр. 409.
29. А. В. Степанов, В. М. Краснов, *ЖТФ* **23**, 199 (1952).
30. J. Gilman, W. G. Johnston, *J. Appl. Phys.* **27**, 1018 (1956).
31. J. Gilman, W. G. Johnston, *Trans. ASME* **209**, 449 (1957); **206**, 1326 (1956).
32. Дж. Гилман, В. Джонстон, сборник «Дислокации и механические свойства кристаллов», М., ИЛ, 1960, стр. 82.
33. А. А. Урусовская, *Кристаллография* **3**, 726 (1958).
34. А. В. Степанов, Е. А. Милькаманович, *ЖТФ* **18**, 769 (1948).
35. А. В. Степанов, *Phys. Zs. Sowjetunion* **2**, 537 (1932).
36. А. В. Степанов, *ibid.* **5**, 706 (1934).
37. А. А. Урусовская, *УФН* **96**, 39 (1968).
38. Gyulai, D. Nagtli, *Zs. Phys.* **51**, 378 (1928).
39. А. В. Степанов, *ЖЭТФ* **34**, 1661 (1958).
40. А. В. Степанов, *Сов. физика* **3**, 312 (1934).
41. А. В. Степанов, *Phys. Zs. Sowjetunion* **8**, 25 (1935).
42. А. В. Степанов, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **8**, 213 (1944).
43. А. В. Степанов, *ЖТФ* **19**, 204 (1949).
44. А. В. Степанов, Р. А. Житников, *ЖТФ* **24**, 772, 779, 786, 795 (1956).
45. А. В. Степанов, Р. А. Житников, *ЖТФ* **28**, 2228, 2237 (1958).
46. А. В. Степанов, В. М. Краснов, *ЖЭТФ* **25**, 98 (1953).
47. А. В. Степанов, В. М. Краснов, Э. Ф. Шведко, *ЖЭТФ* **34**, 894 (1958).
48. А. В. Степанов, Юбилейный сборник к 70-летию акад. А. Ф. Иоффе, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950, стр. 341.
49. А. В. Степанов, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **14**, 122 (1950).

50. А. В. Степанов, ЖЭТФ 19, 937 (1949).
51. А. В. Степанов, ЖТФ 30, 1194, 1443 (1950).
52. А. В. Степанов, В. М. Гольдфарб, сборник «Вопросы динамики и прочности», т. 5, Рига, АН Латв. ССР, 1958, стр. 127.
53. А. В. Степанов, В. М. Гольдфарб, Уч. зап. Латв. гос. ун-та им. Стучки 20 (3), 223 (1958).
54. Г. В. Бережкова, Нитевидные кристаллы, М., «Наука», 1969.
55. А. В. Степанов, ЖТФ 19, 937 (1949).
56. А. В. Степанов, ЖЭТФ 20, 438 (1950).
57. А. В. Степанов, ЖТФ 25, 2203 (1955).
58. А. В. Степанов, С. П. Никаноров, ЖЭТФ 37, 6 (1959).
59. А. В. Степанов, С. П. Никаноров, ФТТ, 3, 3551 (1961).
60. А. В. Степанов, С. П. Никаноров, ФТТ 4, 571 (1962).
61. А. В. Степанов, С. П. Никаноров, ФТТ 6, 1997 (1964).
62. А. В. Степанов, С. П. Никаноров, А. А. Нраньян, ФТТ 6, 7 (1964).
63. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФММ 8, 274 (1959).
64. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФТТ 1, 955 (1959).
65. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФММ 8, 922 (1959).
66. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФТТ 1, 242 (1959).
67. А. В. Степанов, О. В. Клявин, сборник «Исследования по жаропрочным сплавам», т. 5, М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 317.
68. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФТТ 1, 1733 (1959).
69. А. В. Степанов, О. В. Клявин, ФТТ 17, 592 (1964).
70. А. В. Степанов, О. В. Клявин, И. С. Котоусова, ФТТ 9, 1631 (1967).
71. А. В. Степанов, О. В. Клявин, Ю. М. Чернов, *ibid.*, стр. 2490 и 2486.
72. А. В. Степанов, Э. М. Надгорный, Кристаллография 8, 641 (1963).
73. А. В. Степанов, Э. М. Надгорный, ФТТ 5, 998, 1006 (1963).
74. А. В. Степанов, Э. Ю. Гутманас, Э. М. Надгорный, *ibid.*, стр. 1021.
75. А. В. Степанов, Изв. АН СССР (Отд. техн. наук), № 9, 90 (1954).
76. А. В. Степанов, Э. М. Надгорный, ФТТ 3, 1068 (1961).
77. А. В. Степанов, ЖТФ 29, 381 (1959).
78. А. В. Степанов, А. Л. Шах-Будагов, *ibid.*, стр. 394.
79. А. В. Степанов, Б. М. Гольцман, Изв. АН СССР (Металлургия и топливо), № 5, 49 (1959).
80. А. В. Степанов, сборник «Автоматизация процессов машиностроения. Горячая обработка металлов», т. 2, М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 26.
81. А. В. Степанов, Будущее металлообработки, Л., Лениздат, 1963.
82. А. В. Степанов, и др., Уч. зап. ЛГПИ им. Герцена 265, 3, 12, 33, 42, 50, 61, 75, 90, 105, 118, 144, 151 (1956).
83. А. В. Степанов, Получение изделий непосредственно из расплава М., «Знание», 1966; В. А. Татарченко, А. В. Степанов, Изв. АН СССР, сер. физ. 33, 1960 (1969); В. А. Татарченко, Канд. диссертация (1960).
84. А. В. Степанов и др., сб. докладов совещаний по получению полупроводниковых монокристаллов способом Степанова и перспективам их применения в приборостроении. Л.: I совещание — ФТИ АН СССР (1968); II совещание — Изв. АН СССР, сер. физ. 33, 1946 (1968); IV совещание — *ibid.* 35, 442 (1971); V совещание — *ibid.* 36, 458 (1972).