

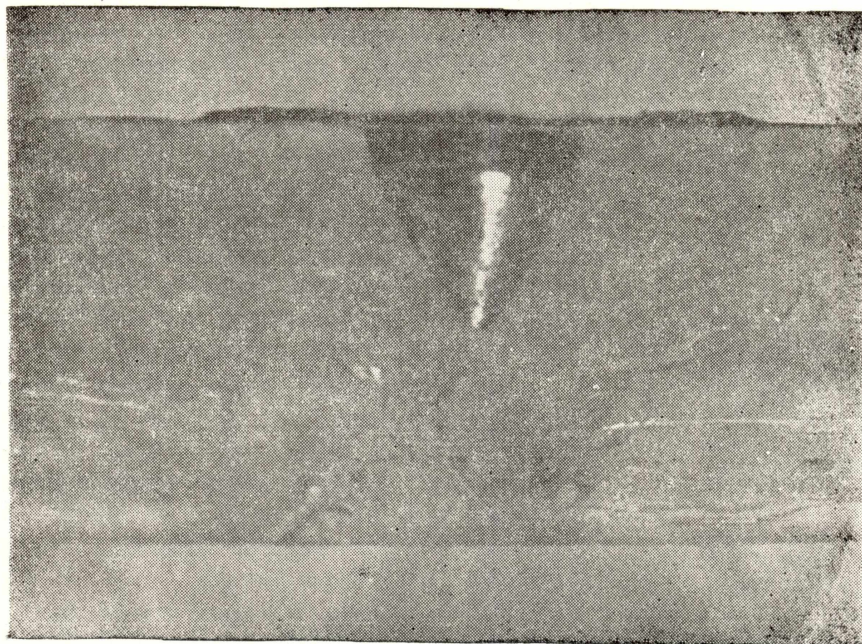
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ОБРАБАТЫВАЮТ МАТЕРИАЛЫ, РАЗРУШАЮТ ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

А. А. ВОРОБЬЕВ

Когда напряженность электрического поля у электрода достигает некоторого определенного значения, то происходят электрические разряды. Диэлектрик, окружающий электрод, теряет свою электрическую прочность и разрушается.

При нормальном давлении и температуре разряды в воздухе, который является хорошим диэлектриком, происходят при напряженности поля, равной 30 кВ/см . Эта величина равняется электрической прочности воздуха и многих газов. Электрическая прочность жидких диэлектриков технической очистки в десять или несколько больше раз превышает электрическую прочность воздуха и составляет примерно $200\text{—}400 \text{ кВ/см}$. Такую же величину прочности имеют полупроводники. Диэлектрики имеют электрическую прочность порядка $1000\text{—}2000 \text{ кВ/см}$.

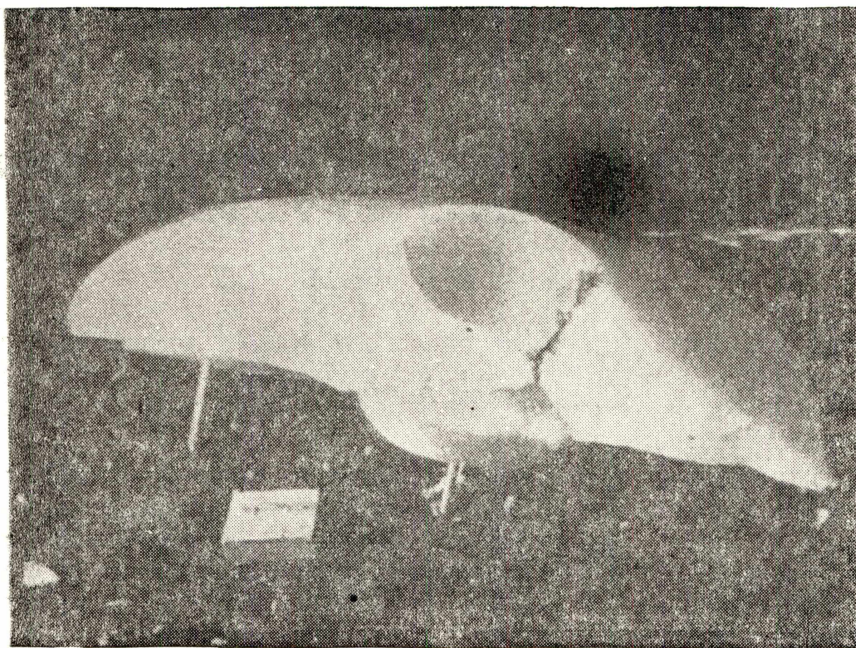
На фиг. 1 приведен вид канала пробоя в кристалле каменной соли.



Фиг. 1. Фотография канала пробоя в кристалле каменной соли

На фиг. 2. изображен канал пробоя в куске парафина толщиной 30 мм при импульсном напряжении 150 кВ с фронтом 2 микросекунды.

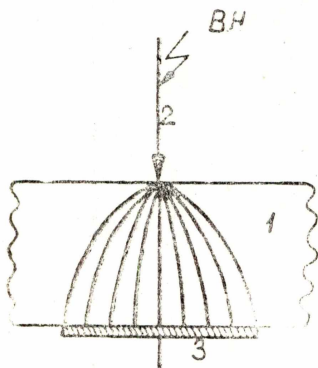
Если электрическое поле в диэлектрике неоднородное, то пробой начинается при достижении величины электрической прочности в месте, где напряженность электрического поля является наибольшей. После начала пробоя диэлектрика его разрушение распространяется дальше по объему. Разрушение диэлектрика в неоднородном поле происходит при



Фиг. 2. Пробой в куске парафина толщиной 30 мм импульсным напряжением 150 кВ

средней напряженности, которая в несколько раз меньше его электрической прочности, определяемой в однородном поле. Наиболее резкая концентрация силовых линий поля имеет место у вершины острия для электродов острие против плоскости, как это представлено на фиг. 3.

Наибольшее понижение пробивного напряжения диэлектриков и средней напряженности поля получается при положительной полярности острия. В этом случае образующиеся в диэлектрике объемные заряды усиливают местную неоднородность поля, а следовательно, и перегрузку диэлектрика, способствуют развитию разряда в нем и его разрушению.



Фиг. 3. Концентрация силовых линий в неоднородном поле.

Электрическое разрушение диэлектриков происходит с большой скоростью и завершается за время, измеряемое сотыми долями микросекунды. Быстрее всего пробой развивается в газе, где наблюдалась скорость разряда, равная 10^7 — 10^8 см/сек. Разряд в твердых диэлектриках развивается со скоростью 10^6 см/сек. Скорость разряда зависит от состава

и свойств диэлектрика и формы электрического поля, в котором происходит пробой. Наибольшая скорость разряда в диэлектрике наблюдается в однородном электрическом поле, когда разрушение диэлектрика на-

ступает одновременно по всей его длине между электродами, после того как достигается напряженность поля, равная электрической прочности диэлектрика. Наименьшая скорость развития разряда в диэлектрике наблюдается в неоднородном поле. В этом случае разряд, начавшись в точке, где напряженность поля достигла значения, равного электрической прочности, распространяется по объему диэлектрика со скоростью развития механического разрушения тела.

Установлено, что при больших толщинах диэлектриков наименьшее значение электрической прочности твердых диэлектриков наблюдается при положительном острие и времени воздействия напряжения порядка нескольких микросекунд.

Степень разрушения твердого диэлектрика при электрическом пробое зависит от количества энергии, выделившейся на путях разряда и времени разряда. Протекание в разряде большого количества энергии за малый промежуток времени сопровождается разрушением всего объема диэлектрика на отдельные куски. Размер кусков, на которые дробится глыба диэлектрика, уменьшается с увеличением мощности электрического разряда.

При недостаточном количестве энергии, вводимой в канал разряда, или недостаточном времени действия напряжения начавшийся пробой может прекратиться. Это показано на фиг. 4, где при увеличении в 5 раз дана фотография разряда (неполного пробоя) в стекле под действием импульса напряжения длительностью 0,1 мксек.

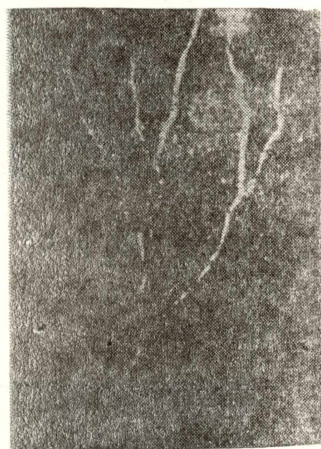
На фиг. 5 представлен кусок каменного угля, а на фиг. 6 видно, как разрушился этот кусок после подачи одного импульса электрического напряжения с амплитудой 600 кВ.

Явление электрического пробоя можно эффективно применять для малооперационных процессов по обработке твердых тел, добыче полезных ископаемых, вторичному дроблению, бурению скважин и прочих производственных процессов, технология которых связана с разрушением твердых тел.

В современных генераторах импульсных токов можно накапливать энергию сотни килоджоулей при напряжении порядка ста киловольт. Так как разряд продолжается одну стотысячную долю секунды, то мощность в разряде значительно превышает мощность Днепропетровской ГЭС.

При резании материалов, дроблении их большая часть подводимой энергии теряется в передающих звеньях механизмов; значительная энергия затрачивается на пластическую деформацию обрабатываемого материала и его нагревание. Собственно, на отделение одного куска материала от другого затрачивается меньшая часть энергии, подводимой к обрабатываемому агрегату. Было сделано много предложений использовать для обработки материалов и их дробления импульсные искровые разряды. Такие способы обработки материалов энергетически будут весьма экономны, так как большая часть подводимой энергии, за исключением малых потерь, будет затрачиваться на обработку материала.

В электрическом поле высокой напряженности в малом объеме может быть достигнута большая концентрация энергии. В течение короткого промежутка времени при конденсированном электрическом разряде в малом объеме выделяется большая мощность. Вследствие этого может быть получена высокая эффективность при обработке материалов. При-



Фиг. 4. Фотография неполного пробоя стекла. Длительность импульса 0,1 мксек.



Фиг. 5. Фотография куска каменного угля до разрушения.



Фиг. 6. Фотография куска каменного угля после подачи одного импульса электрического напряжения с амплитудой 600

менение для разрушения твердых тел электрического разряда, за время которого выделяется большая мощность, может быть экономически выгоднее, чем разрушение при действии взрывчатых веществ.

Предложения использовать электрические разряды для обработки твердых тел делались неоднократно. Некоторые виды электрических разрядов и электрического разрушения твердых тел под действием высокого напряжения нашли успешное и все развивающееся применение.

В 1938 г. в Всесоюзном электротехническом институте Б. Р. Лазаренко и Н. П. Лазаренко предложили электроискровой (электроэрозионный) способ обработки металлов и успешно внедрили его в практику.

При наложении высокого импульсного напряжения между электродами и достижении определенной напряженности поля происходит пробой и образование канала сквозной проводимости в межэлектродном промежутке. При пробое промежутка электроны, идущие из катода, достигают анода, которым служит обрабатываемое изделие, и бомбардируют его поверхность, распыляя металл. Авторы метода указывают, что на бомбардируемых участках анода наблюдаемая концентрация энергии при импульсном разряде в 10 раз превосходит концентрацию энергии при наиболее мощных взрывах. Электроискровой метод получил широкое распространение при обработке металлов, твердых сплавов и других материалов. Электроискровая обработка успешно применяется при шлифовании, резке, изготовлении фигурных штампов и пр. Разработаны и широко применяются в промышленности специализированные электроискровые установки для различной обработки материалов. Более простая, точная, дешевая и быстрая электроискровая обработка материалов в некоторых случаях вытесняет методы обработки материалов резанием.

В 1955 году Л. А. Юткин предложил оригинальный метод использования искрового электрического разряда высокого напряжения (до 70 кВ) в жидкости для бурения скважин в горных породах. Если электрический разряд происходит внутри жидкости, причем электрический импульс имеет очень короткий фронт, то вблизи разряда возникает зона разрушения диаметром до 100 мм, внутри которой разрушаются все твердые хрупкие тела, пластические тела сильно деформируются, т. е. изменяют свою форму, а металлы испытывают наклеп, т. е. сильное упрочнение поверхностного слоя. Причиной этих явлений является сильное давление в канале электрического разряда, которое, не ослабляясь, передается жидкости. Гидростатический удар ведет к разрушению или деформации окружающих твердых тел.

На фиг. 7 приведена фотография описанного Л. А. Юткиным электро-гидравлического бура и схема устройства (фиг. 8).

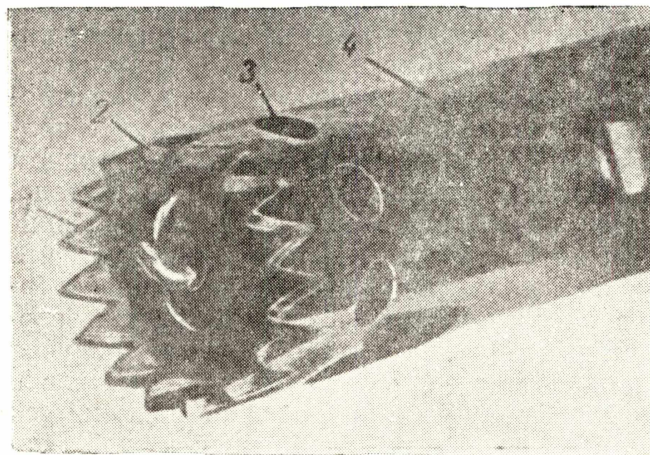
На фиг. 7 показано: 1) отогнутый конец центрального вращающегося электрода; 2) выступы колонки бура; 3) окна для выхода жидкости из бура; 4) коронка бура.

На фиг. 8 обозначено:

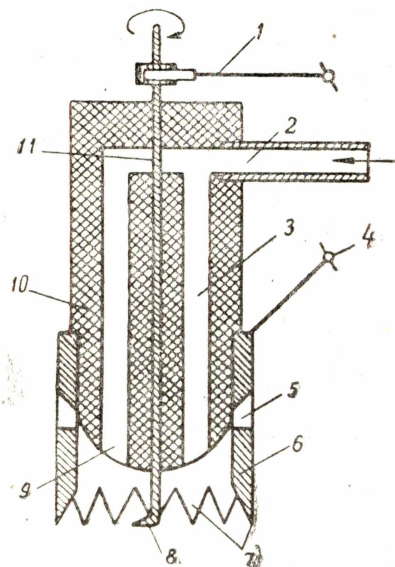
1. Подвод тока к центральному вращающемуся электроду. 2. Подача промывочной и рабочей жидкости. 3. Канал для подачи жидкости. 4. Подвод тока к коронке бура. 5. Окна в коронке бура для выхода газа и жидкости. 6. Коронка бура. 7. Выступы коронки бура. 8. Отогнутый конец центрального вращающегося электрода. 9. Канал для подачи жидкости. 10. Изолятор. 11. Центральный вращающийся электрод.

Разрушительное действие оказывают импульсные токи молнии, поражая наземные тела. Большой ток молнии, протекая по проводнику, может сплавить, расплавить и даже испарить его. Сильные магнитные поля, вызываемые большими токами, деформируют проводники. Сильное

электрическое поле, образующееся вокруг проводника, может вызвать изменения в окружающей среде, например, корону в воздухе. Разрушение диэлектриков под действием импульсного напряжения и тока молнии зависит от различных условий.



Фиг. 7. Фотография электро-гидравлического бура



Фиг. 8. Схема устройства электро-гидравлического бура

Молния, поражая предметы из материалов, не проводящих электрический ток, разрушает их. При ударе в дерево молния расщепляет его.

Это происходит потому, что сильный электрический ток молнии, текущий по волокнам дерева, вызывает испарение воды и большое паро- и газовыделение, вызывающее повышение давления внутри древесной массы и разрыв дерева. Однажды молния, ударив в старый тополь высотой в 30 м и обхватом в 3 м, разбила его на мелкие куски. Расщепление кусков дерева под действием импульсов электрического тока (фиг. 9) хорошо наблюдается и в лаборатории. Часто молния, поражая бетонные, железобетонные и кирпичные сооружения, разрушает их. Ударив в кирпичную трубу, молния полностью разрушила ее верхний конец длиной 30 м. Следующие 15 м трубы были разрушены частично, а в основании трубы образовалась трещина. Иногда молния, подобно пуле, пробивает стекло, оставляя в нем небольшое отверстие. Фарфоровые изоляторы линии электропередачи при ударе молнии часто разрушаются на мелкие куски.

Молния, поразившая замок Клермон в Боувази (Франция), выбила в каменной стене отверстие 65 см шириной и 60 см глубиной. Каменные осколки стены разлетелись более чем на 16 м.

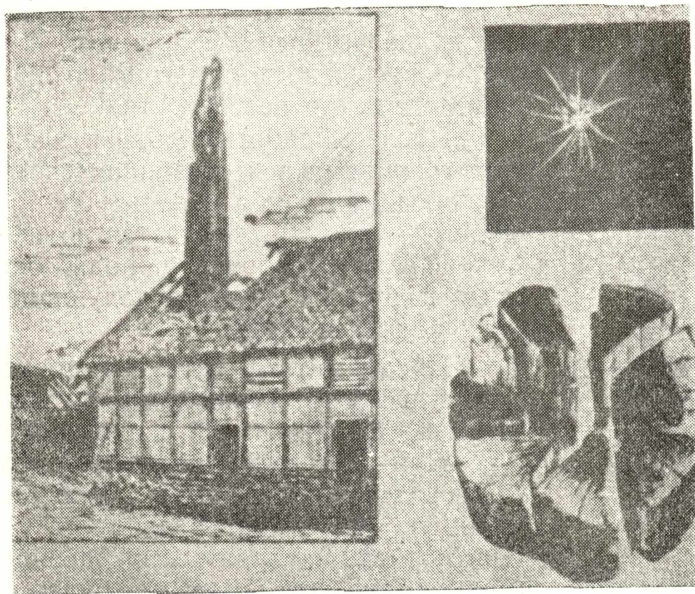
Весьма часты случаи обнаружения в горах камней, разбитых грозовыми разрядами. Существует предание, что большая гранитная глыба— Гром-камень, на котором Фальконет воздвиг свой великолепный памятник Петру Первому на берегу Невы в Ленинграде, откололся ударом молнии. Когда разряд молнии происходит в песок, имеющий высокое электрическое сопротивление, то происходит оплавление песка током молнии. Образуются фульгуриты, «чёртовы пальцы», длина которых достигает десятков сантиметров.

Следует заметить, что на разрушение предмета при таком поражении тратится только часть энергии, выделяющейся при разряде молнии. Часть общего запаса энергии молнии затрачивается на образование про-

водящего канала в воздухе, а часть энергии уносится током при растекании его по грунту.

Практически важными операциями являются дробление и разрушение твердых тел, которые могут производиться при их электрическом пробое.

Эффективность применения электрического разрушения твердых тел электрическими импульсами будет особенно велика при большой длине



Фиг. 9. Слева молния разрушила высокую дымовую трубу; наверху справа молния пробила оконное стекло, внизу справа молния расщепила пень

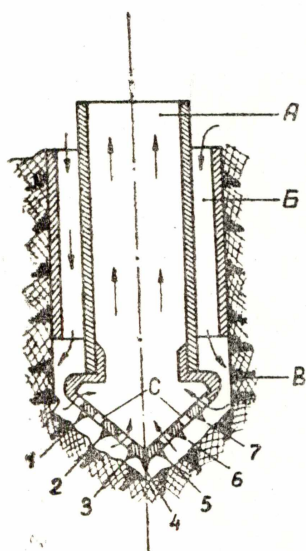
пути передачи энергии от источника к обрабатываемой детали. При глубококом бурении от приводного двигателя к режущему инструменту энергия передается с помощью трубы соответствующей длины. Свойства такой системы не позволяют производить бурение с большой скоростью и при большом усилии на режущем инструменте, не говоря уже о том, что для замены режущего инструмента требуется периодический подъем всей колонны. Эти операции занимают большую часть всего времени персонала.

Можно рассмотреть способ проходки глубоких разведочных скважин, с помощью электрических разрядов с применением для электрической изоляции токоведущего провода и выноса из скважины продуктов разрушения с помощью трансформаторного масла, которое доставляется в забой под давлением. Циркуляция потоков масла задается, как и циркуляция глинистого раствора, для выноса продуктов разрушения из скважины. В целях изоляции чистое масло подается между стенками труб внутренней и внешней и откачивается по центральной трубе.

Опыт конструирования и производства кабелей под давлением масла указывает на возможность изготовления концентрического кабеля на рабочем напряжении сотни тысяч киловольт.

На фиг. 10 представлена возможная схема установки для проходки глубоких скважин. А — медная токоведущая труба — заканчивается плоским или коническим наконечником, на поверхности которого имеются выступы — искровые электроды. Разряды с этих электродов разрушают породу под ним. После образования углубления под каким либо острием — выступом, например, 1, на конической поверхности заштрихованное уг-

лубление заполняется маслом. При подаче следующего импульса напряжения разряд произойдет, например, с острия 2, затем 3—4 и т. д. Объем выемки будет определяться свойствами грунта, формой электрода, напряжением и энергией импульса. Масло, поступающее из трубы в отверстия С, расположенные по конической поверхности, будет уносить продукты разрушения по трубе А и оставлять их в отстойнике. В случае необходимости масло перед его поступлением в трубу Б может подвергаться очистке. Предлагаемый способ сверления может быть особенно эффективным при проходке по крепким породам, когда обычный проходческий инструмент мало производителен вследствие его нестойкости.



Фиг. 10. Возможная схема установки для проходки глубоких скважин

После выработки вблизи электрода некоторого объема вся связанная система, а именно: обсадная труба и электрод — под действием силы тяжести опускается ниже. Оставшиеся неровности выработки породы остановят движение системы, пока последующие разряды не сообразят эти выступы.

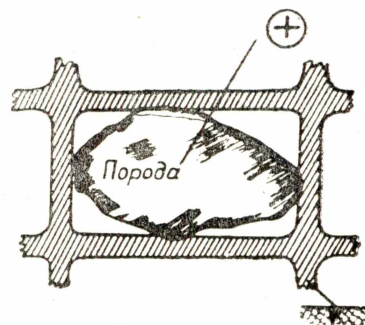
Предлагаемая методика проходки свободна от дефектов и неполадок применяемого вращательного бурения и с помощью турбобуров.

При заданной величине электрической прочности горной породы, выбирая соответствующую величину разрядного напряжения масла и скорость развития разряда, можно добиться того, что пробой будет происходить преимущественно или исключительно в разрабатываемой породе, а не на обсадную трубу.

Механическое дробление крепких горных пород представляет известные трудности. Электрическое разрушение твердых диэлектриков происходит с затратой малого количества энергии и за короткое время, порядка микросекунд. Можно предложить производить дробление крупных кусков породы электрическим путем, а образовавшиеся более мелкие куски в последующем — механическим путем. Размер куска определяется размером ячейки сита. Схема электрической дробилки для определенных кусков представлена на фиг. 11.

Материал подается на сито и проходит между гибкими электродами-остриями. Замыкание промежутка между электродами куском породы и увеличение электропроводности этого участка или давление куска на датчик схемы можно использовать для синхронной подачи импульса напряжения на электроды в момент поступления куска породы. Подбирая величину энергии импульса, можно менять степень дробления куска.

При дроблении кусков породы с помощью электрического разряда разрушаются диэлектрические материалы и освобождаются материалы, проводящие электрический ток, заключенные в диэлектрик. Таким образом, при электрическом дроблении кусков породы будет происходить петрографическое обогащение и отделение породы от руды. При последующем



Фиг. 11. Схема электрической дробилки.

перемещении материалы разделяются известным методом, например, магнитные материалы отделяются с помощью магнитного поля.

Добыча полезных ископаемых, их обогащение и обработка материалов с помощью электрических искровых разрядов позволят значительно облегчить многие трудоемкие операции и повысить производительность труда. Новая технология обработки дает возможность изготавливать многие детали из более прочных материалов, что, в свою очередь, позволит уменьшить размеры и вес машин и многих изделий, изменит их внешний вид. Все это вместе взятое улучшит и расширит возможности удовлетворения материальных потребностей людей и общества.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	11 стр.	10^{16}	10^{-6}
9	9 св.	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$5 \cdot 10^{-9}$ сек
11	1 св.	$2 \div 3 \cdot 10_8$ — сек	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек
29	6 стр.	10^{-6} см/сек	10^6 см/сек
29	2 стр.	большой	большин
30	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
32	6 стр.	спаянности	спайности
33	17 св.	10^{-} сек	10^{-8} сек
34	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
34	4,5 св.	$10^{-4} - 10^{-}$ сек	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек
34	19 св.	10^{-8} и 10^{-6} см/сек	10^{-8} сек и 10^6 см/сек
56	форм. 9	В конце фигурной скобки следует — 1.	
65	3 стр.	формулу	форму
91	5 св.	$= 1350$ ом и $R_T = 30$ ком	$R_T = 1350$ ом $R_T = 30$ ком
107	6 св.	$\tau = 10^{-}$ сек	$\tau = 10^{-6}$ сек
109	16 стр.	образцов	микротвердости образцов
111	4 стр.	Е	$E_{пр}$
112	фиг. 9, 5 св.	поле однородное	поле неоднородное
116	12 стр.	Винчелла	Винчелл
123	7 св.	спаянность	спайность
128	32 св.	40 мол %	90 мол %
170	1 стр.	ангенса	тангенса
217	15 стр.	При введении примесей типа внедрения	При введении примесей в твердые растворы типа внедрения
218	24 св.	Измерялась зависимость	Определялась зависимость
219	8 св.	хлористый рубидий	бромистый калий
219	22 стр.	хранения из монокристаллов	хранения монокристаллов
220	фиг. 2	В точке начала координат слева по оси $\lg \tau$ следует поставить — 12	
228	4 св.	ыражение	выражение
228	5 св.	огда	тогда
228	6 св.	арфора	фарфора
228	7 св.	каркасном	в каркасном
228	8 св.	етальной	детальной
228	16 св.	гатушек	катушек
228	форм. 3	C_g	C_g
242	2 стр.	Из фиг. 1	Из диаграммы плавкости
244	11—12 стр.	рентгенограммы смещены	рентгенограммы сплава смещены
251	24 св.	с ионизованном	с ионизированным
301	7 стр.	монизирующих	ионизирующих
302	18 стр.	-процентного	50-процентного
306	9 стр.	95% монокристалла	95% плотности монокристалла
325	24 стр.	группы	II группы
332	6 стр.	$10^7 - 10^8$ ом/сек	$10^7 - 10^8$ см/сек
343	1 стр.	„438—1“	„ИЗВ—1“
394	8 стр.	Со	Со