

OVERVIEW NO. 5. FRACTURE-MECHANISM MAPS FOR MATERIALS WHICH CLEAVE:
F.C.C., B.C.C. AND H.C.P. METALS AND CERAMICS

**КАРТЫ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ,
ПОДВЕРЖЕННЫЕ РАЗРУШЕНИЮ СКОЛОМ:
ОЦК-, ГЦК- И ГПУ-МЕТАЛЛЫ И КЕРАМИКИ**

К. Ганди и М.Ф. Эшби (С. GANDHI and M. F. ASHBY)

Аннотация. Это вторая из двух работ, посвященных картам механизмов разрушения. В ней объединен большой объем данных из различных источников с данными, полученными авторами этой статьи. В результате составлены карты механизмов разрушения ряда поликристаллических металлов и керамик: тугоплавких ОЦК-металлов (вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и хрома), ГПУ-металлов и сплавов (магния, бериллия, рения, сплавов Magnox-AL80, Magnox-ZR55), высокотемпературной керамики (MgO, Al₂O₃, BeO, UO₂, SiC, Si₃N₄), щелочно-галоидных соединений (NaCl, KCl, LiF, CaF₂), льда, воды, а также ГЦК-металла иридия. Сравнение карт позволяет сделать определенные обобщения, касающиеся характера разрушения различных материалов.

1. ВВЕДЕНИЕ: МЕХАНИЗМЫ И КАРТЫ РАЗРУШЕНИЯ

Кристаллические твердые тела при нагружении растяжением разрушаются по одному из ряда альтернативных механизмов. Твердые тела, рассматриваемые в данной работе, имеют одну общую черту: при низких температурах напряжение пластического течения в них настолько высоко, что они разрушаются только хрупко: сколом или путем хрупкого разрушения по границам зерен. С повышением температуры в таких материалах возникает скольжение, обеспечивая возникновение некоторой пластичности перед разрушением, которое, тем не менее, происходит сколом. При достаточно высоких температурах пластичность становится настолько высокой, что тип разрушения изменяется на полностью вязкое разрушение.

При температурах выше $0.3-0.5T_m$ важным механизмом деформации становится ползучесть. В этом случае твердое тело может разрушиться по типу транскристаллитного разрушения при ползучести или по одному из нескольких механизмов межкристаллитного разрушения при ползучести. И, наконец, около точки плавления во многих материалах происходит динамическая рекристаллизация, которая может вызвать разрушение по типу разрыв или путем возникновения области локального сужения до нулевого поперечного сечения.

В настоящей работе построены *карты механизмов разрушения* [1] на основе данных о разрушении 11 металлов и 11 видов керамик. На картах определены уровни напряжений и температур, выше которых доминирует каждый из механизмов разрушения. Некоторые данные являются новыми, многие взяты из ранее опубликованных в открытой печати работ или из отчетов об исследованиях.

1.1. Механизмы разрушения

В данной работе выделены 7 механизмов разрушения, некоторые из которых или все будут представлены на картах, приведенных в следующих разделах. На рис.1 показаны эти механизмы и их характеристики. Большая часть механизмов разрушения достаточно детально описана в более ранней работе [1], поэтому ниже они просто перечислены. Однако два механизма: разрушение сколом и хрупкое разрушение по границам зерен, требуют дальнейшего пояснения.

Скол и хрупкое разрушение по границам зерен. Металлы с гексагональной решеткой и большая часть керамик демонстрируют пластичность только в том случае, когда активированы две или более системы скольжения. Например, щелочно-галоидные соединения и оксиды со структурой хлорида натрия характеризуются легким скольжением по системе легкого скольжения $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$, но это не обеспечивает большой общей пластической деформации. Общая пластичность возможна только тогда, когда активирована еще и жесткая система скольжения $\{100\}\langle 0\bar{1}1\rangle$. Поэтому напряжение пластического течения таких поликристаллов тесно связано с напряжением пластического течения по жесткой системе. При напряжении ниже

необходимого для возникновения общего течения, поликристалл обладает общей микропластичностью, связанной со скольжением по легкой системе и, возможно, с двойникованием; любой из этих процессов может приводить к зарождению трещин и, таким образом, вызывать разрушение. В связи с этим выделим 3 разных режима разрушения сколом. Они показаны на рис.2 и будут рассмотрены ниже.

Трещина, содержащаяся в хрупком твердом теле, может распространяться, даже если величина напряжения ниже, чем напряжение, необходимое для скольжения по любой системе. При наличии трещин разрушение происходит при номинальном напряжении, определяемом по формуле:

$$\sigma_1 \approx \left(\frac{EG_c}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где $2c$ – длина первоначальной (имеющейся в твердом теле) трещины, E – модуль Юнга и G_c – вязкость разрушения. Пока напряжение меньше, чем напряжение пластического течения даже самой легкой системы скольжения, возникновение общей пластичности невозможно (хотя локальная пластичность может возникнуть в области кончика трещины). Назовем такой режим «скол 1». При сжатии уровень напряжения, необходимый для распространения трещины скола в 8-15 раз выше, чем при растяжении [2]. При использовании результатов испытаний на сжатие, соответствующих этому типу разрушения, величина разрушающего напряжения делится на 8, чтобы сделать ее сопоставимой с данными, полученными при испытаниях на растяжение и изгиб. Область, соответствующая режиму «скол 1» (рис.1 и 2), ограничена «сверху» возникновением текучести в легкой системе скольжения или двойникованием, а «справа» возникновением пластичности или ползучести. В пределах области, соответствующей режиму «скол 1», прочность твердого тела определяется величиной самой большой содержащейся в нем трещины и разрушение здесь является полностью хрупким без измеримой пластичности.

Если первоначальные трещины невелики или отсутствуют, напряжение может достичь уровня, необходимого для инициации скольжения или двойникования (рис.2). Скольжение в ограниченном количестве систем (< 5) или двойникование создает внутренние напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Назовем режим образования трещин в результате скольжения или двойникования «скол 2», чтобы отличить его от скола из-за наличия первоначальных дефектов. Трещины, образующиеся в данном случае, обычно имеют длину, пропорциональную размеру зерна, d , потому что он является характерным расстоянием, на котором действуют внутренние напряжения. Поэтому, если напряжение двойникования или напряжение пластического течения легкой системы (σ_y) превышает значение, описываемое следующим соотношением:

$$\sigma^* \approx \left(\frac{EG_c}{\pi c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

трещина начинает распространяться сразу после возникновения, и разрушение сколом будет происходить при напряжении микропластического течения, σ_y . Но если $\sigma^* > \sigma_y$, трещина, возникающая из-за скольжения или двойникования, не будет сразу же распространяться, и напряжение будет дальше возрастать, приводя к разрушению по типу «скола 2». Область, соответствующую этому типу скола, можно рассматривать как область общей микропластичности. На карте она ограничена «снизу» величиной напряжения пластического течения легкой системы или напряжения двойникования, а «сверху» и «справа» значением напряжения, необходимого для скольжения по жесткой системе (т.е. для обеспечения общей текучести или ползучести). Скол 2 представляет собой хрупкое разрушение с незначительной пластичностью ($< 1\%$).

При повышении температуры напряжение пластического течения снижается (рис.2), пока не возникнет общая пластичность или ползучесть, предшествующая разрушению, которое, однако, осуществляется сколом. Назовем такой режим «скол 3», чтобы отличить его от режима хрупкого разрушения (скол 1 и 2). Этому типу разрушения предшествует заметная пластическая

деформация (1 – 10%), и этой пластичности достаточно для того, чтобы притуплять небольшие первоначальные трещины, эффективно повышая G_c . Общая пластичность или (часто) зернограничное проскальзывание затем приводит к возникновению больших трещин на границах зерен. В некоторых случаях эти явления вызывают стабильное распространение существовавшей ранее трещины до тех пор, пока ее рост, связанный с вызванным деформационным упрочнением повышением напряжения, не приведет к изменению режима распространения трещины от нестабильного к нестабильному по типу трещины скола. Область, соответствующая режиму «скол 3», ограничена «слева» областями, соответствующими другим типам скола, «снизу» – возникновением разрушения при ползучести, а «справа» (если этому не мешает плавление) появлением вязких видов разрушения.

Во многих металлах и керамиках наблюдается тонкое равновесие между величиной напряжения, необходимого для появления трещины, распространяющейся путем скола, и величиной напряжения, необходимого для появления хрупкого разрушения по границам зерен небольшие изменения величин содержания примесей, текстуры или температуры приводят к изменению одного на другое; иногда наблюдаются смешанные межкристаллитные и транскристаллитные разрушения. Оба механизма разрушения характеризуются низкой величиной поглощаемой энергии ($G_c = 1 - 100 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$). Если транскристаллитное разрушение происходит по плоскостям скола, будем рассматривать его как «скол (1, 2 или 3)». Когда оно идет по границам зерен, будем рассматривать его как *хрупкое разрушение по границам зерен* (1, 2 или 3)».

Низкотемпературное вязкое разрушение. Вязкое разрушение возникает, когда общая пластичность достаточна велика для возникновения значительной деформации (10-100%) без возникновения скола. Разрушение происходит вследствие зарождения, пластического роста и слияния пор – либо первоначальных, оставшихся, например, после процесса спекания при изготовлении керамики, либо пор, зарождающихся при деформации на частицах второй фазы или включениях в металлах. Поверхность разрушения имеет в этом случае конические ямки или бугорки и обычно является транскристаллитной поверхностью; иногда плотность первоначальных пор и включений на границах зерен настолько велика, что разрушение происходит по границам, создавая впечатление межкристаллитного разрушения.

Область, соответствующая этому типу разрушения, ограничена областями, соответствующими сколу и разрушению при ползучести или разрыве.

Транскристаллитное разрушение при ползучести. Ползучесть становится доминирующим механизмом деформации при температурах выше примерно $0.3T_M$ для металлов и $0.5T_M$ для большинства видов керамик. Затем материалы могут разрушаться по механизму, имеющему некоторое сходство с низкотемпературным вязким разрушением. Однако, в связи со сменой механизма деформации, процесс разрушения имеет свои особенности (например, возникает нестабильность, приводящая к слиянию пор, и, таким образом, к накоплению деформации, необходимой для разрушения) и зависит от времени.

В металлах наблюдается как низкотемпературное вязкое разрушение, так и транскристаллитное разрушение при ползучести. В керамике, как правило, возникает только последний вид разрушения, так как до температур, при которых начинается деформация ползучести, преобладает разрушение сколом (рис.1).

Межкристаллитное разрушение при ползучести. При высоких температурах и низких напряжениях разрушение всегда происходит по механизму межкристаллитного разрушения при ползучести. На границах зерен или фаз поры и клиновидные трещины возникают и растут либо только диффузионным путем, либо по механизму, включающему как диффузию, так и ползучесть [1]. Поры и трещины сливаются, приводя к разрушению при малой пластичности (хрупкое разрушение). Этот механизм существенно отличается от описанного выше низкотемпературного хрупкого межкристаллитного разрушения. Он связан с медленной деформацией ползучести и приводит к разрушению через достаточно длительное время (обычно $10^4 - 10^{10}$ с)

Разрыв. Разрыв имеет место, когда пластичность становится настолько велика, что происходит сужение шейки образца до «нулевого» поперечного сечения. В обеих системах, металлических и керамических, это связано с динамическим «возвратом» или рекристаллизацией. Будем считать, что разрушение образца произошло по механизму разрыв, если уменьшение площади превышает 90%.

Динамическое разрушение. На всех картах указана «граница», на которой значение напряжения пластического течения соответствует скорости деформации величиной примерно 10^6 с^{-1} . Область, лежащая выше этой границы, обозначена как область «динамического разрушения». При разрушении сколом динамические эффекты возможны при гораздо более низком уровне напряжения, чем указанный, но при превышении этого уровня даже первоначальная нагрузка должна описываться в терминах распространения упругой волны в материале.

1.2 Составление карт

Суть процедуры [1] состоит в следующем. Сначала для каждого эксперимента составляются таблицы, содержащие значения гомологической температуры (T/T_M) и нормированные значения напряжений при растяжении (σ_n/E), где σ_n – номинальное напряжение, а E – модуль Юнга), а также данные о времени до разрушения $[t_f(s)]$. Затем используются фрактографические данные, чтобы в тех случаях, когда это возможно, установить вид разрушения для каждого испытания. После этого данные наносятся на диаграмму, аналогичную представленным ниже, на которой в качестве осей взяты значения σ_n/E и T/T_M ; каждая точка данных наносится с помощью символа, соответствующего источнику, а где возможно, и виду разрушения; и соответствует величине логарифма от времени до разрушения $\log_{10} t_f$.

Затем добавляются границы, которые разделяют блоки данных, относящихся к разным видам разрушения. Некоторые границы, (например, разделяющие области, соответствующие сколу типов 2 и 3, и ограничивающие область, соответствующую вязкому разрушению) определяются только по экспериментальным данным. При построении остальных границ используются не только экспериментальные данные, но и дополнительная информация о скольжении и разрушении в материале. Верхняя граница области, соответствующей сколу 2, отвечает возникновению общей пластичности: она строится с использованием результатов испытаний на твердость, испытаний на растяжение и сжатие, проведенных при всестороннем сжатии, или, в некоторых случаях, на данных по определению напряжения пластического течения в монокристаллах по «жесткой» системе скольжения (например, $\{100\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ в MgO). В зависимости от того, какое значение выше, граница между областями, отвечающими сколу 1 и сколу 2, соответствует *либо* величине напряжения пластического течения по легкой системе скольжения (преобразованной при помощи соответствующего коэффициента Тейлора из величины допустимого напряжения при сдвиге в эквивалентное напряжение пластического течения для поликристалла), *либо* величине напряжения, необходимого для того, чтобы трещина, длина которой равна размеру зерна (уравнение 2), росла. Наконец, граница между областями, соответствующими сколу 1 и транскристаллитному разрушению при ползучести, это линия, на которой скорость ползучести превышает 10^{-10} с^{-1} ; она построена с помощью анализа данных по деформации ползучести для исследуемых металлов и керамик [3].

В процессе построения карт возникают трудности и неясности. На характеристики разрушения керамик влияет чистота материала, его пористость, размер зерна и способ изготовления. Строго говоря, каждая диаграмма описывает лишь конкретный материал с определенным значением чистоты, размера зерна, способом изготовления. Важен и тип испытаний: не всегда возможно найти полное соответствие между результатами испытаний на растяжение, сжатие и изгиб, т.к. размер, форма и характеристики поверхности разных образцов отличаются, а эти переменные особенно важны при проведении испытаний хрупких твердых тел. Частично по этой причине на всех приведенных ниже рисунках вдоль границ областей имеются заштрихованные участки. Существует и еще одна причина наличия этих заштрихованных областей: переход от одного механизма к другому не всегда резкий, и существует диапазон

условий, в котором наблюдаются смешанные виды разрушений. Штриховка напоминает, что границы не являются четкими, и что они не определены точно.

Несмотря на эти трудности, установлено, что описанная выше общая форма карт достаточно воспроизводима.

2. ТУГОПЛАВКИЕ ОЦК-МЕТАЛЛЫ: W, Mo, Ta, Nb и Cr

На рис.3 – 7 показаны карты механизмов разрушения пяти тугоплавких металлов. В таблице 1 приведены значения нормирующих параметров (E и T_M).

2.1. Общие характеристики карт механизмов разрушения тугоплавких металлов с ОЦК решеткой.

На рис.3 приведена карта механизмов разрушения вольфрама технической чистоты, являющаяся типичной для большинства тугоплавких металлов. Если материалы имеют первоначальные трещины или дефекты, они разрушаются при низких температурах по типу скола 1 без возникновения какой-либо измеряемой общей пластичности (хотя, конечно, на кончике трещины всегда есть некоторая пластичность). Чаще двойникование или скольжение приводит к образованию трещин, которые распространяются либо сколом, либо вдоль границ зёрен, приводя к разрушению типа скола 2 или хрупкого разрушения по границам зерен 2.

При повышении температуры величина напряжения пластического течения быстро уменьшается, и разрушению предшествует возникновение общей текучести. Трещиностойкость в этих условиях имеет тенденцию повышаться, и для возникновения трещин скола требуются более высокие напряжения. Все ОЦК металлы имеют «горб» на графике напряжения разрушения (или предела прочности при растяжении) в этом температурном диапазоне и разрушаются по типу скола 3 или обнаруживают хрупкое разрушение по границам зерен 3 при вполне измеряемой пластичности (1-10%). Размеры соответствующей области зависят от размера зерна и содержания примесей.

При дальнейшем повышении температуры происходит переход к полностью вязкому разрушению; в ОЦК металлах при рекристаллизации это происходит при температуре около $0.3T_m$. При несколько более высоких температурах деформация ползучести становится существенной, и при высоких напряжениях разрушение происходит по типу транскристаллитного разрушения при ползучести.

При низких напряжениях и высоких температурах механизм разрушения меняется на межкристаллитное разрушение при ползучести. На границах зерен образуются клиновидные трещины и поры, размеры и количество которых растет при деформации ползучести, в итоге трещины сливаются и образуют траекторию разрушения по границам зерен. Образование клиновидных трещин типично для того этапа межкристаллитного разрушения при ползучести, который характеризуется низкими температурами ($0.5T_m$) и высокими напряжениями ($\sigma_n/E \approx 10^{-4}$). При более высоких температурах и более низких напряжениях образуются поры. В идеале хотелось бы разделить эти подобласти, чтобы подчеркнуть различие между этими микромеханизмами, но экспериментальные данные редко бывают достаточно полными, чтобы это осуществить.

При температурах выше $0.8T_m$ разрушение происходит в результате разрыва, очевидно являющегося следствием динамического возврата, рекристаллизации и роста зерен.

Между пятью рассмотренными в этой работе металлами существуют различия. Например, тантал меньше других склонен к возникновению разрушения сколом, хром – напротив, больше всех; остальные находятся где-то «между»*. Однако на картах с нормированными шкалами значений это отличие выглядит незначительным, и пять металлов образуют вполне определенный класс с поразительно схожими картами.

* Более подробно это обсуждается далее в разделе 7.

2.2. Источники данных о разрушении в ОЦК-металлах

Рекристаллизованный вольфрам (рис.3). При температуре ниже $0.15T_m$ (250°C) вольфрам разрушается по типу скола 2 или хрупкого разрушения по границам зерен 2 [26, 29, 30]. Двойникование или первичное скольжение приводит к образованию трещин, которые затем распространяются, часто вдоль границ зерен. Вольфрам, спеченный из порошка, всегда обладает некоторой остаточной пористостью и при очень низких температурах может разрушиться по механизму скола 1 или по аналогичному межкристаллитному механизму. Вольфрам при таких температурах – материал полностью хрупкий и характеризуется малой величиной деформации до разрушения.

При температуре выше $0.15T_m$ вольфрам имеет умеренную пластичность, но все-таки разрушается сколом или разделением по границам зерен. Этот механизм был назван сколом 3 или хрупким разрушением по границам зерен 3. Границы между этой областью и областями, соответствующими другим видам скола, определены с помощью данных из источников, перечисленных на рисунке. Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, отвечающей разрушению при ползучести, установлена в соответствии со значением напряжения, необходимого для обеспечения скорости деформации 10^{-10}c^{-1} для вольфрама с размером зерна 100 мкм [3].

При температуре $0.3T_m$ (800°C) происходит постепенный переход от разрушения сколом к вязкому разрушению (заштрихованная полоса). Образуется шейка, и появляются поверхности разрушения типа чашка и конус. Данные для этой части карты получены с использованием результатов испытаний на растяжение [26, 29, 30]. Разброс данных отражает различие в чистоте материала и способах производства образцов вольфрама.

При температурах немного выше $0.3T_m$ в вольфраме начинается деформация ползучести. В зависимости от уровня напряжения начинается транскристаллитное или межкристаллитное разрушение при ползучести. При температуре в диапазоне от 0.3 до $0.8T_m$ ($800^\circ - 2700^\circ\text{C}$) и скоростях деформации или нагрузках, которые приводят к разрушению менее, чем за 10^4c , имеет место транскристаллитное разрушение. Оно имеет сходство с вязким разрушением (хотя степень сужения при разрушении может отличаться), но материал ведет себя как твердое тело, демонстрирующее зависимость механического поведения от скорости деформирования (ползучесть) [18, 20-25, 29]. При нагрузках, которые приводят к разрушению более, чем за 10^4c , разрушение имеет преимущественно межкристаллитный характер [14-16, 20, 28, 31]. Существует достаточно экспериментальных данных, чтобы разделить эти области на карте. При самых низких нагрузках повреждения, накапливающиеся при ползучести, имеют вид пор [31], но при более высоких напряжениях, при температуре около $0.5T_m$ (1600°C) наблюдается возникновение клиновидных трещин, размер которых зависит от чистоты материала [14-16, 31].

Рост зерен и микроструктурная нестабильность начинаются при температуре около $0.7T_m$ и материалы демонстрируют более высокую пластичность при более высоких напряжениях. Вольфрам разрушается по типу разрыва, что отражено на карте на рис.3. При более низкой скорости деформации разрыв «подавляется» и материал разрушается по типу межкристаллитного разрушения при ползучести. Границы соответствующей области определены с помощью результатов испытаний на растяжение, полученных Глесиером и др. Glasier et al. [27] и Бродриком и Фритчем Brodrick and Fritch [20] и простираются вплоть до температур $0.998T_m$.

Молибден (рис.4). При низких температурах ($< 0.1T_m$, 20°C) молибден разрушается по типу скола 2 или хрупкого разрушения по границам зерен 2 при напряжениях, которые значительно ниже напряжения, необходимого для возникновения общей текучести, и демонстрирует незначительную пластичность [34, 42]. Верхняя граница соответствующей области определяется по данным о сжатии и твердости поликристаллов, а также текучести монокристаллов [3]. Граница между областью, соответствующей разрушению сколом 1, и областью, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, построена исходя из

величины напряжения [3], необходимого для обеспечения скорости деформации 10^{-10}с^{-1} для молибдена, имеющего размер зерна 100 мкм.

При температурах от 0.1 до $0.3T_m$ ($20^0 - 600^0\text{C}$) молибден имеет умеренную пластичность, и разрушающее напряжение в нем всегда больше, чем напряжение, необходимое для возникновения общей текучести. Для зарождения и распространения трещин скола, приводящих к разрушению сколом 3 или хрупкому разрушению по границам зерен 3, требуется значительное предварительное скольжение. При температуре $0.3T_m$ режим разрушения постепенно меняется на полностью вязкое разрушение [42].

При температуре выше $0.3T_m$ (800^0C) в молибдене возникает ползучесть, и при высоких напряжениях он разрушается по типу транскристаллитного разрушения при ползучести [16, 33, 35, 38-41]. Испытания на ползучесть при температурах от 0.5 до $0.8T_m$ ($1000 - 2000^0\text{C}$) при нагрузках, которые приводят к разрушению более чем через 10^4 с, заканчиваются преимущественно межкристаллитным разрушением [16, 37], причем при высоких напряжениях образуются клиновидные трещины, а при низких – поры.

При температуре выше $0.8T_m$ (2000^0C) в молибдене технической чистоты во время деформации наблюдается рост зерен и другие микроструктурные изменения. Разрушение в области, показанной на рис.4, происходит по типу разрыва [27, 36]. Существует множество свидетельств о разрушениях при ползучести [32] в диапазоне температур до $0.93T_m$, но подробных данных о режимах разрушения нет.

Тантал (рис.5). При самых низких температурах – ниже $0.08T_m$ (0^0C) тантал разрушается вызванным скольжением сколом 2 при незначительной пластичности. При температурах выше этого значения перед разрушением наблюдается значительная пластическая деформация (10% и более), хотя разрушение идет по типу скола (скола 3) или хрупкого разрушения по границам зерен 3. Напряжение разрушения в этой области приравнивается к пределу прочности при растяжении [43]. Границы областей на карте были определены по изменениям деформации до разрушения в зависимости от температуры. При $0.27T_m$ (600^0C) возникновение скола подавляется и происходит переход к вязкому разрушению. Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, установлена исходя из величины напряжения, обеспечивающего скорость деформации 10^{-10}с^{-1} [3].

При температуре выше $0.3T_m$ (700^0C) в молибдене начинается процесс ползучести, и материал разрушается по различным механизмам разрушения при ползучести. При более высоких напряжениях для тантала характерно транскристаллитное разрушение, и особенности поверхности разрушения имеют сходство с аналогичными характеристиками при вязком разрушении. Данные, использованные для построения соответствующей части карты, получены как по результатам испытаний на растяжение, так и по результатам испытаний на ползучесть при постоянной нагрузке [27, 38, 43, 46, 47, 49]. Существование области межкристаллитного разрушения при ползучести было определено теоретически по данным о пластичности при ползучести: результатов непосредственных наблюдений нет. Граница между областями транскристаллитного и межкристаллитного разрушения на карте построена исходя из величины напряжения, которое приводит к разрушению примерно через 10^6 с.

Область разрушения по типу разрыва построена на карте по аналогии с картами других тугоплавких ОЦК-металлов, хотя никаких экспериментальных данных об этом виде разрушения пока получено не было.

Ниобий. (рис.6). При температуре ниже $0.07T_m$ (-70^0C) ниобий разрушается по типу скола 2 [34, 52] при незначительной пластичности. Верхняя граница этой области на карте соответствует величине напряжения течения при сжатии поликристалла [3]. Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, отвечающей межкристаллитному разрушению при ползучести, установлена исходя из величины напряжения, обеспечивающего скорость деформации 10^{-10}с^{-1} [3].

С повышением температуры напряжение пластического течения снижается, и образец разрушается при умеренной пластичности [52, 57] сколом 3. Дальнейшее повышение температуры приводит к постепенному переходу к вязкому разрушению.

При температуре выше $0.3T_m$ (550°C) в ниобии возникает ползучесть. Данные, использованные для построения области, соответствующей транскристаллитному разрушению при ползучести, получены по результатам испытаний на растяжение и ползучесть [52, 55, 56, 58]. Область, соответствующая межкристаллитному разрушению при ползучести, построена на карте (рис.6) в области низкого напряжения, но в настоящее время фрактографическая информация отсутствует.

Область, соответствующая разрыву, построена на карте по аналогии с картами других тугоплавких ОЦК-металлов, так как экспериментальных данных для температур выше $0.6T_m$ (1400°C) для ниобия нет.

Хром (рис.7) У хрома более ощутимая склонность к разрушению сколом, чем у других металлов с ОЦК решеткой. Заштрихованные символы в области, соответствующей сколу, показывают, что пластичность незначительна [59-62]. При температуре ниже $0.13T_m$ (0°C) двойникование вызывает возникновение трещин скола, образование и распространение которых происходит при очень низкой пластичности (сколом 2). При температуре выше комнатной в хrome перед разрушением возникает пластическая деформация, но разрушение все равно происходит по типу скола (скола 3). Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, построена при значениях напряжения, при которых скорость деформации достигает величины 10^{-10}c^{-1} [3].

При повышении температуры до $0.36T_m$ (500°C) разрушение хрома становится вязким. При немного более высоких температурах в нем возникает ползучесть и происходит транскристаллитное разрушение при ползучести. Данные, использованные для построения двух соответствующих областей на карте, получены по результатам испытаний на растяжение и на ползучесть [4, 61-63]. Имеется весьма небольшой объем фрактографических данных.

3. ГПУ-МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ: Mg, MAGNOX-AL80, MAGNOX-ZR55, Be и Re

На рис.8–15 представлены карты механизмов разрушений пяти металлов и сплавов, имеющих ГПУ решетку. Нормирующие значения параметров перечислены в табл. I

3.1. Общие особенности карт механизмов разрушения ГПУ-металлов и сплавов

На рис.8 построена карта механизмов разрушения технически чистого магния. Она является типичной для металлов с ГПУ-структурой. Если такие материалы имеют исходные трещины и дефекты, они разрушаются при низких температурах по типу скола 1. Чаше базисное скольжение или двойникование приводит к образованию небольших трещин, которые распространяются путем скола или хрупкого разрушения по границам зерен или в результате действия того и другого, при этом вид разрушения смешанный. На карте соответствующие области обозначены «скол 2» или «хрупкое разрушение по границам зерен 2». С повышением температуры напряжение разрушения становится выше, чем предел текучести, и разрушению предшествует состояние общей пластичности, хотя разрушение по-прежнему происходит по типу скола или хрупкого разрушения по границам зерен (скол 3 или хрупкое разрушение по границам зерен 3).

Все металлы, имеющие гексагональную структуру, которые были исследованы авторами этой статьи, демонстрировали переход к полностью вязкому разрушению при большой пластичности при температурах выше $0.3T_m$. При достаточно высоких температурах (около $0.35T_m$) в материалах начинается процесс ползучести, и наблюдается транскристаллитное разрушение при ползучести при высоких значениях напряжения и межкристаллитное разрушение при ползучести при низких. Материалы технической чистоты разрушаются по типу разрыва при температурах выше $0.8T_m$. В сплавах также наблюдается этот тип разрушения, хотя и при несколько более высоких температурах.

При низких температурах процессы разрушения ГПУ-металлов имеют сходство с процессами разрушения керамики (см. разделы 4, 5 и 6). При более высоких температурах возникает большее количество систем скольжения, и металлы с гексагональной структурой ведут себя как ГЦК-металлы. При сравнении свойств этих металлов с помощью карт в нормированных шкалах, становится очевидно, что ГПУ-металлы значительно прочнее, чем ОЦК металлы как при низких, так и при высоких температурах. Важно отметить, однако, что ГПУ-металлы и сплавы особенно склонны к межкристаллитному разрушению при ползучести, возможно, потому, что из-за сложности небазисного скольжения межзеренное проскальзывание не так легко компенсируется общей пластичностью, как в ОЦК- или ГЦК-металлах.

3.2. Источники данных о разрушении в ГПУ-металлах и сплавах

Магний (рис.8 и 9). Авторами этой статьи были проведены испытания магния на растяжение при температурах в диапазоне от 77 до 723 К. На рис 9. представлена итоговая серия микрофотографий, полученных на оптическом и сканирующем электронном микроскопах. Карта механизмов разрушения, представленная на рис.8, построена с использованием результатов этих наблюдений и данных из источников, перечисленных на рисунках.

При температуре ниже $0.1T_m$ (-180°C) происходит хрупкое разрушение по границам зерен 2-го типа (рис.9) [65-67]. Образцы с надрезами разрушаются, конечно, при гораздо меньших напряжениях, и механизм разрушения может быть транскристаллитным (скол 1).

При более высоких температурах проявляется достаточно большое количество систем скольжения для обеспечения общей пластичности, и образцы разрушаются сколом, но после умеренной (1-7%) пластической деформации [65-67] (скол 3). При температуре выше комнатной магний становится полностью пластичным [65].

При температуре выше $0.4T_m$ (100°C) в магнии начинается процесс ползучести, разрушение сколом полностью подавляется, и материал разрушается путем транскристаллитного разрушения при ползучести. Данные, использованные для построения этой области на карте, получены по результатам испытаний на растяжение, проведенных авторами (рис.9), а также аналогичных испытаний Тоаза и Рипли (Тоаз и Ripley) [65]. Испытания на ползучесть при температурах в диапазоне от 0.4 до $0.7T_m$ ($100-400^\circ\text{C}$) при величине нагружения, которое вызывает разрушение примерно через 10^5с , приводят к разрушению по границам зерен (рис.9) [64, 65, 68, 70-73]. Область на карте, соответствующую транскристаллитному разрушению при ползучести, необходимо разделить на две подобласти. При самых низких нагрузках на границах зерен возникают и растут поры, при более высоких нагрузках в местах тройных стыков формируются клиновидные трещины [72].

При температуре около $0.7T_m$ начинается рост зерен и возникает микроструктурная нестабильность, хотя величина этой переходной температуры может варьироваться в зависимости от чистоты материала. Разрушение по типу разрыва (рис.9) происходит при температуре выше $0.8T_m$ (450°C).

Magnox-AL80. (рис.10 и 11). Поведение Magnox-AL80 при разрушении имеет большое сходство с поведением магния. Результаты наблюдений объединены на рис.11. При низких температурах происходит хрупкое разрушение по границам зерен 2. При комнатной температуре – разрушение по типу скола 3; данные, используемые для построения этой области, соответствуют пределу прочности материала при растяжении [74, 75].

С повышением температуры механизм разрушения изменяется, и последовательно наблюдаются вязкое разрушение, транскристаллитное разрушение при ползучести, межкристаллитное разрушение при ползучести и разрыв; характеристики этих режимов приведены на рис.11. Испытания на медленную ползучесть приводят преимущественно к разрушению по границам зерен. В процессе службы в материале развивается именно этот тип деформации ползучести, при этом пластичность при ползучести находится в сильной зависимости от размера зерна. Металлографические исследования образцов, которые проходили испытания на длительную прочность, свидетельствовали об интенсивном образовании пор на

границах перпендикулярных оси напряжения [76-82]. Заштрихованный символ на рис.10 показывает, что разрушение было идентифицировано как разрушение по границам зерен.

При температурах выше $0.7T_m$ (350°C) в Magnox-AL80 наблюдается аномальный рост зерен. Размер зерна увеличивается, и пластичность падает, иногда катастрофически. При еще более высоких температурах вид разрушения меняется на разрушение по типу разрыва (рис.11). Из-за роста зерен область на карте, соответствующая разрыву, для этого материала немного больше, чем для чистого магния.

Magnox-ZR55 (Рис.12 и 13). Результаты экспериментов авторов этой статьи объединены на рис.13. При температуре -196°C ($0.1T_m$) Magnox-ZR55 разрушается путем хрупкого разрушения по границам зерен 2. При комнатной температуре механизм разрушения меняется на скол 3, и деформация до разрушения становится измеряемой. На рис. 13 приведены фрактограммы, характеризующие эти две области.

При температуре выше $0.36T_m$ материал разрушается по типу вязкого разрушения, процесс разрушения сколом подавляется. При некотором повышении температуры ($0.4T_m$) становится ощутимым процесс ползучести, и материал разрушается вследствие действия механизмов транскристаллитного и межкристаллитного разрушения при ползучести (рис.13). Экспериментальные данные, использованные для построения двух соответствующих областей на карте механизмов разрушения, получены в результате испытаний на растяжение и испытаний на ползучесть [69, 83-86]. Заштрихованный символ на карте на рис.10 показывает, что разрушение было идентифицировано как разрушение по границам зерен.

Если Magnox-ZR55 подвергается термообработке на воздухе, он содержит частицы гидридов. Влага взаимодействует с цирконием в сплаве и образует мелкодисперсный гидрид циркония, который повышает прочность, стабилизирует размер зерна и препятствует динамическому возврату и рекристаллизации [83, 84]. Из-за этого область на карте механизмов разрушения, соответствующая разрыву, несколько меньше, чем у магния и сплава Magnox-AL80.

Бериллий (рис.14). При температуре ниже $0.17T_m$ (около 0°C) бериллий разрушается по типу скола 2 [91]. Базисное скольжение инициирует возникновение трещин скола, которые распространяются при незначительной пластичности. С повышением температуры материал разрушается по типу скола 3; деформация до разрушения умеренна и напряжение разрушения становится выше, чем напряжение пластического течения [88, 90, 93, 94]. Границы областей на карте определены с использованием результатов вышеперечисленных исследований.

При дальнейшем повышении температуры процесс разрушения сколом подавляется, и наблюдается вязкое разрушение [12]. Граница между областью, соответствующей сколу 3, и областью, соответствующей вязкому разрушению, построена исходя данных о значительном увеличении пластичности [88, 90, 93]. При температуре выше $0.4T_m$ (350°C) в бериллии начинается процесс ползучести, и разрушение происходит путем транскристаллитного и межкристаллитного разрушения при ползучести. Данные, использованные для построения двух соответствующих областей на карте, получены в результате испытаний как на растяжение, так и на ползучесть [12, 88-90, 92-94].

При температурах выше $0.8T_m$ (1000°C) в материале может начаться рост зерен и другие микроструктурные изменения, хотя никаких экспериментальных данных об этом нет. Область, соответствующая разрыву, построена на карте по аналогии с другими ГПУ-металлами.

Рений (рис.15). Большая часть данных, использованных для построения карты, приведенной на рис. 15, – это данные из технических отчетов, некоторые разделы которых приведены в книгах Конвея и Флагелла (Conway и Flagella) [99] и Тьетза и Вилсона (Tietz и Wilson) [100]. При температуре ниже $0.1T_m$ (70°C) двойникование приводит к зарождению трещин, и металл разрушается по типу скола 2 при незначительной пластичности [96, 98]. При повышении температуры возникает достаточно большое количество доступных систем скольжения, и в материале перед разрушением наблюдается некоторая пластичность. Данные, использованные

для построения области, соответствующей сколу 3, основаны на измерениях предела прочности материала при растяжении [96-98].

При температурах выше $0.3T_m$ (800°C) рений становится полностью вязким [97, 98]. При немного более высоких температурах в нем начинается процесс ползучести и происходит транскристаллитное или межкристаллитное разрушение при ползучести. Данные, использованные для построения соответствующих областей на карте, получены в результате испытаний на растяжение и ползучесть [95,96, 98], хотя имеющиеся данные фрактографических исследований очень скудны. Граница между областями, соответствующими транскристаллитному и межкристаллитному разрушению, построена исходя из величины напряжения, при котором разрушение происходит примерно через 10^4 с.

Область, соответствующая разрыву, как показано на карте, расположена в диапазоне температур выше $0.8T_m$, хотя экспериментальные данные, позволяющие это подтвердить, отсутствуют.

4.ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ: NaCl, KCl, LiF, CaF₂

На рис.16–19 представлены карты механизмов разрушения четырех щелочно-галоидных соединений. Значения нормирующих параметров перечислены таблице 2, системы скольжения – в таблице 3.

4.1 Общие характеристики карт механизмов разрушения щелочно-галоидных соединений.

Карта механизмов разрушения хлорида натрия приведена на рис.16. Она весьма типична для щелочно-галоидных соединений. Трещины в этом материале образуются легко – во время изготовления, в результате коррозии (например, во влажной воздушной среде) или при абразивном износе в ходе эксплуатации. При наличии первоначальных трещин такие материалы разрушаются по типу хрупкого разрушения, сколом 1 при температуре до $0.4T_m$. Если принимаются специальные меры для предотвращения образования или для устранения трещин, монокристаллы становятся вязкими, но поликристаллы остаются полностью хрупкими и разрушаются сколом 2 при напряжениях значительно ниже величины напряжения, необходимого для возникновения общей текучести.

Рис.2 и 16 иллюстрируют это. Величина напряжения, необходимая для возникновения скольжения по легким системам (обычно $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$), мала. В поликристалле это скольжение создает напряжения, величину которых можно снизить дальнейшим скольжением по жестким системам (обычно $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ – см.табл.3), но при температурах ниже $0.4T_m$ это настолько трудно, что вместо этого в поликристаллах образуются трещины. Длина этих трещин пропорциональна размеру зерна (поскольку это типичная «длина волны» внутренних напряжений), и они растут только тогда, когда удовлетворяются условия их распространения – т.е. когда прикладываются напряжения, превышающие значение σ^* в уравнении 2. Если принять значение G_c равным $2 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ для всех щелочно-галоидных соединений, величина напряжения распространения трещин σ^* в некоторых случаях будет больше значения напряжения пластического течения по легким системам. Таким образом, нижняя граница области, соответствующей сколу 2, определяется величиной напряжения пластического течения по легкой системе, σ_y , или величиной напряжения, необходимого для распространения трещины, σ^* , в зависимости от того, какое напряжение выше. Существует большое количество данных о разрушении щелочно-галоидных соединений, исследованных при температуре до $0.4T_m$, которые подтверждают правомерность использования этого двойного критерия (см. рис.16–19).

При температуре выше $0.5T_m$ наблюдается процесс ползучести и пластичность увеличивается. В образцах, испытываемых на растяжение, происходит поперечное сужение, и окончательное разрушение происходит по типу полностью вязкого транскристаллитного разрушения. При еще более высоких температурах и при более высокой скорости деформации в

щелочно-галлоидных соединениях происходит динамическая рекристаллизация. В образцах, испытываемых на растяжение, сужение поперечного сечения достигает «нулевых» размеров, и они разрушаются разрывом. Поэтому щелочно-галлоидные соединения могут проходить термообработку, которая является важным методом производства мелкозернистых материалов.

При малых нагрузках и высоких температурах в этих материалах наблюдается диффузионная ползучесть. Хотя существует ограниченное количество экспериментальных данных, было установлено, что в этих условиях на границах зерен образуются поры, увеличивающиеся в размере и количестве, которые объединяются, приводя к разрушению при низкой пластичности.

Таким образом, разрушение щелочно-галлоидных соединений может происходить по шести сценариям: скол 1 и 2, которые являются полностью хрупкими видами разрушения; скол 3 (или хрупкое разрушение по границам зерен 3), при котором наблюдается ограниченная пластичность; транскристаллитное разрушение при ползучести и разрыв – оба механизма вязкого типа; и межкристаллитное разрушение при ползучести, которое является хрупким.

4.2. Источники информации о разрушении щелочно-галлоидных соединений

Хлорид натрия, $NaCl$ и хлорид калия, KCl (рис.16 и 17). $NaCl$ и KCl очень похожи с точки зрения механизмов разрушения. В связи с этим при определении границ областей на картах механизмов разрушения были использованы данные по обоим веществам. Однако в остальном, для построения каждой карты были использованы только данные, относящиеся к конкретному материалу.

Большинство опубликованных данных о разрушении этих материалов при низких температурах ($<0.4T_m$ или $180^\circ C$) свидетельствуют о возникновении разрушения вследствие первоначальных дефектов (скол 1). Если принимаются меры, чтобы предотвратить их возникновение, наблюдается разрушение сколом, вызванное микроскольжением (скол 2). ($NaCl$ [120, 121, KCl [122-125]). По этой причине нижняя граница области, соответствующей сколу 2, построена, исходя из величины напряжения, необходимого для распространения трещины, длина которой равна размеру зерна (100 мкм). Это напряжение существенно больше, чем напряжение пластического течения по легкой системе скольжения $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ ($NaCl$ [126-128], KCl [129]).

Верхняя граница области, соответствующей сколу 2, построена исходя из величины напряжения, необходимого для возникновения общей текучести. Это значение было определено по экспериментальным данным о твердости [128] и пределе текучести [121].

При температуре выше $0.4T_m$ в обеих солях до разрушения наблюдается пластическая деформация [121, 125]. Разрушение по смешанному типу скола и хрупкого разрушения по границам зерен происходит при напряжении, которое выше напряжения пластического течения: до начала распространения трещин происходит некоторое упрочнение. На карте область, соответствующая такому поведению материала, обозначена как «скол 3» или «хрупкое разрушение по границам зерен 3».

Удлинение до разрушения при растяжении как в $NaCl$, так и в KCl возникает строго при температурах выше $0.45T_m$. Образцы KCl с размером зерна 350 мкм были испытаны при температурах 0.45 ; 0.47 и $0.50T_m$ и разрушение происходило при удлинении на 7,5%, 23% и 60% соответственно [125]; кроме того, в испытываемых образцах наблюдалось значительное поперечное сужение при 0.47 и $0.50T_m$. В этом узком температурном диапазоне вид разрушения в обоих поликристаллических материалах $NaCl$ [121] и KCl [125] меняется с разрушения сколом 3 на вязкое разрушение. При еще более высоких температурах в KCl наблюдается динамическая рекристаллизация, и именно это вызывает разрушение во время испытаний на растяжение [123, 124].

При низких напряжениях и высоких температурах KCl деформируется в процессе медленной ползучести. На границах зерен [125] образуются и растут поры, что приводит к межкристаллитному разрушению при ползучести. На карте механизмов разрушения граница между областью, соответствующей этому типу разрушения, и областью, соответствующей сколу,

была построена исходя из значения напряжения, при котором скорость ползучести превышает 10^{10} с^{-1} [128].

Фторид лития LiF (рис.18). На рис.18 отражены весьма немногочисленные данные для поликристаллического фторида лития. При комнатной температуре LiF разрушается сколом [131]. Нижняя граница области, соответствующей сколу 2, была построена с помощью величины напряжения, рассчитанной по аналогии с NaCl, с использованием значения $G_c = 2 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$. Напряжение пластического течения по легкой системе $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ показано на карте в виде пунктирной линии, построенной на основании данных Джонстона [132]. Верхняя граница области, соответствующей сколу 2, была построена на основании экспериментальных данных о твердости, полученных Верраллом и др. [128].

При температурах выше $0.5T_m$ (300°C) во фториде лития наблюдается степенная ползучесть [133]. В монокристаллах наблюдается высокая пластичность при высоких температурах, а поликристаллы разрушаются по типу скола 3 или транскристаллитного разрушения при ползучести с высокой пластичностью [132]. При высоких температурах и высоких напряжениях в материале может происходить динамическая рекристаллизация, после чего образцы разрушаются по типу разрыва при испытаниях на растяжение [132].

Межзеренное разрушение при ползучести должно появляться при низких напряжениях и высоких температурах. Граница между областью, соответствующей этому типу разрушения, и областью, соответствующей разрушению сколом, построена с помощью значения напряжения, необходимого для обеспечения скорости деформации 10^{-10} с^{-1} на основе данных о ползучести, полученных Верраллом и др. [128].

Фторид кальция, CaF₂ (рис.19). При температуре ниже $0.4T_m$ фторид кальция разрушается сколом [112,133, 135] без удлинения и уменьшения площади поперечного сечения при напряжениях значительно ниже необходимых для возникновения общей текучести. Если материал обладает высокой чистотой и не содержит первоначальных трещин, разрушение происходит путем образования трещин вследствие микроскольжения по легкой системе $\{100\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$. Если удовлетворятся критерий Гриффитса (уравнение 2), трещины распространяются. При построении карты на рис.19 были использованы значения $G_c = 2 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ и $d = 100 \text{ мкм}$. С помощью этих величин и на основе данных о $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ скольжении [112] вышеописанным способом была построена нижняя граница области, соответствующей сколу 2. Верхняя граница этой области была построена на основании измерения напряжения, вызывающего $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ скольжение, и соответствующего возникновению общей текучести [112].

При температуре выше $0.4T_m$ ($\sim 400^\circ\text{C}$) фторид кальция обладает общей пластичностью. Напряжение разрушения превышает напряжение общей текучести, но уменьшение площади при разрушении весьма невелико, и разрушение происходит по типу хрупкого разрушения по границам зерен 3. Переход от транскристаллитного скола к хрупкому разрушению по границам зерен происходит постепенно и зависит от размера зерна, пористости и вида испытания [112, 135].

При высоких температурах и низком напряжении было бы справедливо ожидать возникновения межкристаллитного разрушения при ползучести, как показано на рис.19, однако авторам не удалось найти подтверждающих это экспериментальных данных.

5. ТУГОПЛАВКИЕ ОКСИДЫ: MgO, Al₂O₃, BeO, UO₂.

На рис.20-23 приведены карты механизмов разрушения четырех тугоплавких оксидов. В табл.2 перечислены величины нормирующие параметры, а в табл.3 – системы скольжения.

5.1 Общие особенности карт механизмов разрушения тугоплавких оксидов

Карта механизмов разрушения технически чистого оксида магния, представленная на рис. 20, является типичной для многих оксидов. В технических материалах часто имеются дефекты, и

они разрушаются при низких температурах сколом 1. Если дефектов нет, разрушение происходит, когда образуются трещины при двойниковании или микроскольжении по легким системам $\{110\}$ $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. Такие трещины распространяются сколом или путем разрушения по границам зерен (скол 2 или хрупкое разрушение по границам зерен 2) при незначительной пластичности.

При температуре выше $0.45T_m$ появляются дополнительные системы скольжения (табл.3) и становится возможной общая пластичность или ползучесть. В широком диапазоне температур и напряжений разрушение происходит по типу хрупкого разрушения по границам зерен 3 или, редко, скола 3. При дальнейшем повышении температуры при испытаниях на ползучесть наблюдается рост зерен, вызванный деформацией, и динамическая рекристаллизация. Это обеспечивает дополнительную пластичность и становится причиной перехода к транскристаллитному разрушению при ползучести или, в крайних случаях, к разрыву. При высоких температурах и низких напряжениях тугоплавкие оксиды разрушаются по типу межкристаллитного разрушения при ползучести. Как и в металлах, в этих видах керамики при более высоких значениях напряжений происходит образование клиновидных трещин, а при более низких – рост пор.

Границы областей на картах на рис.20-23 имеют конечную ширину. Их точное положение меняется в зависимости от скорости деформации, чистоты материала, размера зерен и способа изготовления материала. В связи с этим на карте, которая демонстрирует типичное поведение материала, необходимо строить границы таким образом, чтобы их ширина отражала этот разброс. Кроме того, переход от одного механизма разрушения к другому может быть постепенным и включать смешанный вид разрушения. Штриховка на границах областей карт отражает обе эти особенности.

Для оксидов характерны те же механизмы, которые реализуются в ОЦК- и ГПУ-металлах, а также в щелочно-галоидных соединениях. Однако механизмы, характеризующиеся полной хрупкостью, которые исчезают в металлах с ОЦК-решеткой при температуре выше $0.1T_m$, в ГПУ-металлах – при температуре выше $0.2T_m$, а в щелочно-галоидных – при температуре выше $0.4T_m$, в оксидах сохраняются до температуры $0.5T_m$ и выше; соответственно размеры областей на картах, где доминируют другие виды разрушений (в которых имеется хотя бы ограниченная пластичность), оказываются меньше.

5.2. Источники информации о разрушении тугоплавких оксидов

Оксид магния, MgO (магнезия) (рис.20). При температурах ниже $0.3T_m$ (800°C) MgO разрушается сколом 1-го или 2-го типа. Разрушение полностью хрупкое и происходит при напряжении, которое гораздо ниже напряжения, необходимого для возникновения общей текучести [136, 138-142]. Точки на соответствующей части карты характеризуют значения пределов прочности при растяжении или изгибе, как показано на рисунке; в случае, когда использовались данные о разрушении при сжатии, величину напряжения разрушения делили на 8. Местоположение нижней границы области, соответствующей сколу 2, определено на основе измерений величины критического сдвигового напряжения при скольжении по системам $\{110\}$ $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ [143], преобразованного в эквивалентный предел текучести поликристалла с использованием коэффициента Тейлора равного 3. Верхняя граница этой области построена на основе данных по измерению общего предела текучести поликристаллического MgO при всестороннем сжатии 5 кбар. Эти данные хорошо согласуются как с величиной предела текучести, вычисленной по данным о твердости (по формуле $\sigma_y = H/3$), так и рассчитанной по величине критического допустимого сдвигового напряжения при скольжении по системам $\{110\}$ $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, полученной Хулсе и др. Hulse et al.[142] с использованием коэффициента Тейлора равного 1.63 [144]. Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, была построена исходя из

величины напряжения, необходимого для обеспечения скорости деформации 10^{-10}с^{-1} для MgO с размером зерна 10 мкм [3].

При температуре выше $0.4T_m$ (900°C) оксид магния демонстрирует общую пластичность и деформируется по механизму степенной ползучести. В широком диапазоне напряжений и температур разрушение происходит по типу хрупкого разрушения по границам зерен 3 [138-140]. Материал здесь имеет ограниченную пластичность, но скольжение или зернограничное проскальзывание, которое может ей сопутствовать при более высоких температурах, в конце концов, приводит к образованию трещин, одна из которых, распространяясь, вызывает быстрое разрушение [138-141].

При более низких напряжениях наблюдается межкристаллитное разрушение при ползучести (рис.20); испытания на ползучесть при температуре выше $0.5T_m$ (1200°C) приводят к этому виду разрушения [137, 139]. Очевидно, что область, соответствующая этому типу разрушения, для оксида магния должна быть разделена на части. При самых низких нагрузках поры растут на границах зерен, объединяясь и приводя к межзеренному разрушению. Но при более высоких напряжениях и температурах около $0.6T_m$ (1600°C) наблюдается образование клиновидных трещин, характер распространения которых зависит от чистоты металла [138-140].

При температурах выше $0.65T_m$ (1700°C) в оксиде магния наблюдается заметная пластичность ($>40\%$), и разрушение происходит без признаков образования пор на границах зерен. [139]. Этот режим на рис.20 соответствует области транскристаллитного разрушения при ползучести. В монокристаллах, когда деформация происходит при температуре выше 1700°C , наблюдается поперечное сужение, и в области шейки появляются рекристаллизованные зерна [139]. Это позволяет предположить, что при очень высоких температурах ($>0.8T_m$) в поликристаллах также может происходить динамическая рекристаллизация и возникать разрушение типа разрыв. Экспериментальные данные для MgO отсутствуют, но справедливо предположить, что область, соответствующая разрыву, может быть расположена на карте, как это показано на рис.20.

Оксид алюминия, Al_2O_3 (глинозем, сапфир) (Рис.21). Технически чистый (99,9%) оксид алюминия разрушается сколом 1 или 2 при температуре ниже $0.5T_m$ ($\sim 1000^\circ\text{C}$) и напряжениях значительно ниже величины, необходимой для возникновения общей текучести [145, 148, 152-154]. Точки на соответствующей части карты описывают напряжение разрушения при растяжении или изгибе; при построении карты измеренные значения напряжения при испытаниях на разрушение при сжатии делили на 8.

Область, соответствующая разрушению сколом 2 на карте, построена на основании данных о критических допустимых напряжениях при базисном скольжении [155, 156] с использованием коэффициента Тейлора равного 3. Верхняя граница этой области построена с использованием данных о текучести поликристалла, полученных Хойером и др. Neuer et al. [157], данных о пирамидальном скольжении [158, 159] с использованием коэффициента Тейлора равного 1.6, а при низких температурах по данным о твердости [160] с использованием $\sigma_y = H/3$. Граница между областью, соответствующей сколу 1, и областью, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, построена исходя из величины напряжения, обеспечивающего скорость деформации 10^{-10}с^{-1} для зерна размером 10 мкм [3].

При температуре выше $0.5T_m$ (1000°C) в оксиде алюминия начинается процесс ползучести, и с повышением температуры деформация до разрушения постепенно увеличивается. Материал приобретает общую пластичность; скольжение или зернограничное проскальзывание приводят к концентрации напряжений, приводящих к зарождению трещин на границах зерен, пока распространение одной из них не приводит к хрупкому разрушению по границам зерен 3. При дальнейшем повышении температуры (но все еще в области хрупкого разрушения по границам зерен) материал разрушается при напряжении выше напряжения пластического течения, при этом возрастает величина деформации до разрушения. Скорость деформации или скорость нагружения в этом диапазоне имеет важное значение. Фрактографические исследования

свидетельствуют о появлении нескольких острых трещин и о том, что разрушение носит полностью межкристаллитный характер [146, 147, 149, 152].

При температурах около $0.8T_m$ ($\sim 1600^\circ\text{C}$) и низких напряжениях материал может деформироваться путем диффузионной ползучести [147, 149, 159, 161], при этом происходит межзеренное разрушение при ползучести (рис.21). Кросби и Эванс Crosby и Evans [149] и Дэвис Davies [147] наблюдали отдельные поры, и Дэвис установил, что время до наступления разрушения обратно пропорционально величине прикладываемого напряжения, что позволяет предположить, что причиной роста пор является диффузия. Величина деформации, вызывающей разрушения в целом больше, чем в случае разрушения сколом, хотя она все еще очень мала.

Экспериментальные данные при температурах выше $0.9T_m$ отсутствуют. Но если последовательность режимов разрушения, которая была выделена для других видов керамики, справедлива и для оксида алюминия, то можно предположить наличие областей, соответствующих высокой пластичности при транскристаллитном разрушении, как это показано на рис.21 .

Оксид бериллия, BeO (рис.22). При температуре ниже $0.4T_m$ ($\sim 800^\circ\text{C}$) оксид бериллия разрушается по типу скола 1 или 2 [163-167]. Положение нижней границы области, соответствующей сколу 2, на карте определено с помощью данных о базисном скольжении в монокристаллах [162] с использованием коэффициента Тейлора, равного 3. Верхняя граница построена с использованием данных о твердости [160] и данных о пирамидальном скольжении в монокристаллах [162] с использованием коэффициента Тейлора равного 1.6.

При температуре выше $0.4T_m$ оксид бериллия обладает пластичностью при растяжении, и перед разрушением наблюдается измеримая пластическая деформация. Разрушение происходит по типу скола 3 или хрупкого разрушения по границам зерен 3; на распространение хрупкого разрушения по границам зерен влияют такие факторы как чистота, способ изготовления, размер зерен и пористость материала [164, 165].

При температуре выше $0.5T_m$ ($\sim 1075^\circ\text{C}$) в материале начинается ползучесть: это либо ползучесть, описываемая степенным законом, либо диффузионная ползучесть [164, 165, 168]. При низких напряжениях наблюдаются образование пор на границах зерен, что приводит к хрупкому зернограничному разрушению. Соответствующая область отмечена на карте на рис.22. Граница, отделяющая эту область от области, соответствующей сколу, построена исходя из величины напряжения, при котором скорость деформации при размере зерна 10 мкм составляет 10^{-10}c^{-1} [3].

На рис.22 мы обозначили область, соответствующую высокой пластичности, по аналогии с картой оксида алюминия. На разрушение в бериллии может оказывать влияние фазовый переход, происходящий при $0.86T_m$ ($\sim 2050^\circ\text{C}$). Если скорость ползучести в тетрагональной высокотемпературной фазе выше, чем в низкотемпературной гексагональной, может возникнуть область разрыва, как и в щелочно-галогидных соединениях.

Диоксид урана, UO₂ (рис.23). При температуре ниже $0.5T_m$ (1300°C) UO₂ разрушается по типу скола 1 или скола 2 при величине напряжения значительно ниже необходимого для возникновения общей текучести, образцы не обладают пластичностью [170-174]. Скорость деформации оказывает небольшое влияние на такое разрушение [171]. Верхняя граница области, соответствующей сколу 2, определена с помощью данных по твердости [175] и данных о пределе текучести [169]; нижняя граница области построена исходя из теоретических предпосылок.

При температуре выше $0.5T_m$ перед разрушением наблюдается общая пластичность. В материале происходит быстрое деформационное упрочнение, и концентрация напряжений, вызванных скольжением или зернограничным проскальзыванием, приводит к образованию трещин, соизмеримых с размером зерен, одна из которых в итоге приводит к разрушению аналогично хрупкому межзеренному разрушению. В этом режиме хрупкое разрушение происходит при напряжении, равном напряжению пластического течения [170-173].

Испытания при низких напряжениях при температуре выше $0.5T_m$ (1300°C) приводят к межкристаллитному разрушению при ползучести [170-173], хотя при более высоких напряжениях UO_2 деформируется путем степенной ползучести и может обладать большей пластичностью ($>5\%$) [171]. Рост зерен и миграция границ зерен могут происходить быстро при температурах выше $0.8T_m$; интенсивность обоих процессов зависит от чистоты и пористости материала. Данные о полностью вязком разрушении в UO_2 отсутствуют.

6. КЕРАМИКА С КОВАЛЕНТНЫМИ И ВОДОРОДНЫМИ СВЯЗЯМИ: SiC, Si_3N_4 , И ЛЕД.

Карты механизмов разрушения SiC, Si_3N_4 и H_2O приведены на рис.24-26. Значения нормирующих параметров приведены в табл.2. В таблице 3 помещен перечень систем скольжения.

6.1. Общие характеристики карт механизмов разрушения керамики с ковалентными и водородными связями

Карбид и нитрид кремния являются материалами, которые предположительно можно использовать при изготовлении высокотемпературной керамики, выдерживающей высокие нагрузки, которая в настоящее время находит применение при изготовлении элементов турбин, теплообменников и высокотемпературных подшипников. Свойства этих материалов сильно зависят от их чистоты и способа изготовления. В данной работе представлены карты механизмов разрушения материалов с низкой пористостью, полученных путем горячего прессования.

Эти два вида керамики, как и лед, имеют общее свойство сохранять высокую прочность до очень высоких гомологических температур. Деформация ползучести становится в них значительной только при температурах выше $0.6-0.7T_m$, что превышает соответствующее значение для какого-либо другого класса твердых тел. Однако, прямым следствием этого является то, что хрупкое разрушение проявляется в таких керамиках даже вблизи точки плавления: ни в одном из этих материалов не было обнаружено режимов деформации с измеряемой пластичностью.

На рис. 24-26 приведены карты механизмов разрушения. На них видно, что полностью хрупкое разрушение (скол 1 и 2) доминирует до температур, равных половине температуры плавления или выше, а разрушение сколом (скол 3) наблюдается вплоть до точки плавления.

6.2. Источники данных о разрушении керамики с ковалентными и водородными связями

Горячепрессованный карбид кремния, SiC (рис.24) При температуре ниже $0.35T_m$ ($<800^\circ\text{C}$) в карбиде кремния наблюдается полностью хрупкое разрушение по типу скола 1, при напряжениях, величина которых гораздо ниже необходимой для возникновения общей текучести [176, 178, 179, 182]. Точки в этой части карты соответствуют величине напряжения разрушения при растяжении и изгибе.

При температуре выше $0.35T_m$ и скорости деформации или нагружения, при которых материал деформируется при ползучести по степенному закону, разрушение происходит по типу хрупкого разрушения по границам зерен 3. В этой области материал обладает небольшой пластичностью [150, 176, 178, 181, 182]. Фрактографические исследования показывают, что трещины на границах зерен образуются либо при внутризеренном скольжении, либо при зернограницном проскальзывании; они растут и распространяются вдоль границ зерен, приводя к окончательному быстрому разрушению [185].

Испытания на медленную ползучесть при температурах выше $0.6T_m$ (1600°C) приводят к межкристаллитному разрушению при ползучести. На рис 24. приведены данные о деформации ползучести, полученные Фарнворфом и Коблом Farnworth и Coble [183], которые свидетельствуют о том, что в данном диапазоне напряжений и температур карбид кремния медленно деформируется путем диффузионной ползучести. Граница, разделяющую область, соответствующую хрупкому разрушению по границам зерен 3, и область, соответствующую межкристаллитному разрушению при ползучести, построена частично исходя из результатов их

наблюдений. Кроме того, был использован тот факт, что график зависимости времени до разрушения от напряжения, построенный в двойных логарифмических осях, имеет изломы, связанные с изменением механизма разрушения [150].

При температуре выше $0.8T_m$ (2200°C) в карбиде кремния может происходить рост зерен и динамическая рекристаллизация. Существует очень немного экспериментальных данных об этом материале при температурах выше $0.8T_m$. В связи с этим неизвестно, возникают ли при таких температурах режимы разрушения с высокой пластичностью. Однако, принимая во внимание тенденции в режимах разрушения, наблюдавшиеся в других подобных керамиках, можно предположить, что это маловероятно.

Горячепрессованный нитрид кремния, Si_3N_4 (рис.25). При температуре ниже $0.5T_m$ (800°C) происходит полностью хрупкое разрушение по типу скол (скол 1) при напряжениях, величина которых гораздо ниже необходимой для возникновения общей текучести [176, 181, 186, 189, 191, 192]. Точки на карте в этой области соответствуют значениям напряжения разрушения при растяжении или изгибе или величинам напряжения разрушения при сжатии, деленным на 8, как указано на рисунке.

При температуре выше $0.5T_m$ нитрид кремния обладает некоторой пластичностью. При более высоких скоростях деформации, при которых материал деформируется при ползучести по степенному закону, разрушение происходит по типу хрупкого разрушения по границам зерен 3. В этой области материал обладает измеримой пластичностью при ползучести [176, 181, 186, 187, 189, 190, 194]. Также как и в случае SiC, разрушение происходит из-за трещин на границах зерен, возникающих при внутризеренном скольжении или межзеренном проскальзывании и распространяющихся вдоль границ зерен, приводя к окончательному быстрому разрушению.

Испытания на медленную ползучесть в диапазоне температур от 0.5 до $0.9T_m$ ($800\text{-}1700^\circ\text{C}$) при нагрузках, которые приводят к разрушению через более длительное время, приводят к межкристаллитному разрушению при ползучести, включающему рост пор на границах зерен [187, 190].

Лед, H_2O (рис.26). При температуре около $0.6T_m$ (-110°C) поликристаллический лед разрушается по полностью хрупкому механизму сколом 2. Опыты Парамесварана и Джонса Parameswaran и Jones [195], для льда со столбчатыми кристаллами показали, что первые трещины появляются при низких напряжениях ($\sim 0.3 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-2}$), и вызваны, вероятно, базисным скольжением. Однако величина разрушающего напряжения равна примерно $50 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-2}$, что гораздо ниже напряжения, необходимого для возникновения общей пластичности. Нижняя граница области, соответствующей сколу 2, была построена исходя из величины напряжения, необходимого для распространения трещины длиной, равной размеру зерна, с использованием значений $G_c = 1 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ и $d = 100 \text{ мкм}$. Верхняя граница этой области была построена с использованием данных о твердости [201, 202].

При температуре выше $0.6T_m$ лед обладает некоторой общей пластичностью. Большая часть данных о разрушении льда лежит в пределах от -31 до -1°C ($0.89 - 0.996T_m$) [196-199]. Режим разрушения меняется от разрушения сколом при высоких напряжениях на межкристаллитное разрушение при низких напряжениях [196-198]. Вакахара Wakahara [203], изучавший разрушение льда при -5°C , выделял три типа разрушения: транскристаллитное разрушение сколом, вызванное скольжением (скол 3); смешанное разрушение: скол и межкристаллитное, подразделяющееся в зависимости от плоскости базисного скольжения на призматическое или пирамидальное; а также вызванное скольжением межкристаллитное разрушение при ползучести, которое особенно часто встречается при сжатии поликристаллического льда.

Подробные исследования льда со столбчатой структурой примерно при $0.9T_m$, проведенные Голдом Gold [197, 198], показали, что при напряжениях ниже $0.6 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-2}$ разрушение вызвано образованием пор, и что количество пор уменьшается с увеличением напряжения. При напряжениях выше $1 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-2}$ в материале происходит хрупкое разрушение. Граница, отделяющая

область, соответствующую сколу 3, от области, соответствующей межкристаллитному разрушению при ползучести, была построена по результатам этих исследований и «окружена» заштрихованной полосой конечной ширины, соответствующей смешанному типу разрушения, которое наблюдал Голд.

При высоких температурах деформация сопровождается ростом зерен и рекристаллизацией. Фредеркинг и Голд Frederking и Gold [108] документально зафиксировали наличие динамической рекристаллизации внутри льда при индентировании. Однако процесс происходил недостаточно быстро для того, чтобы обеспечить переход к вязкому разрушению.

7. ГЦК МЕТАЛЛЫ, В КОТОРЫХ ПРОИСХОДИТ РАЗРУШЕНИЕ СКОЛОМ: Ir

Карты механизмов разрушения металлов и сплавов, которые не разрушаются сколом, были представлены в более ранней работе [1]. Однако в двух ГЦК-металлах – иридии и родии – наблюдается скол [209-211] и хрупкое разрушение по границам зерен [211] (важно отметить, что эти механизмы разрушения работают даже в очень чистом материале). На рис. 27 приведена карта механизмов разрушения иридия. При ее построении были использованы следующие значения нормирующих параметров [207, 209]:

$$E = 5.43 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.82 \times 10^{-4}] \text{ МН} \cdot \text{м}^{-2}$$

$$T_m = 2716 \text{ К}$$

Скольжение в иридии происходит по плоскости $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$, а скол по плоскости $\{100\}$.

7.1. Общие характеристики карт механизмов разрушения металлов с ГЦК решеткой, в которых происходит разрушение сколом

Прочность Ir и Rh при низких температурах сравнима с прочностью ОЦК-металлов W, Mo, Ta и др. В диапазоне температур $0 - 0.5T_m$ в монокристаллах Ir и Rh происходит скол, в то время как в поликристаллах возникает хрупкое разрушение по границам зерен [211]. Карта механизмов разрушения иридия при низких температурах имеет сходство с картами ГПУ- и ОЦК-металлов. При высоких температурах иридий отличается высокой устойчивостью к разрушению при ползучести, что характерно для металлов с ГЦК и ГПУ решеткой.

7.2. Источники данных о разрушении иридия (рис.27)

Ниже примерно $0.3T_m$ (500°C) монокристаллы иридия разрушаются по механизму скола, а поликристаллы – по механизму хрупкого разрушения по границам зерен. Оба механизма реализуются при низкой ($\sim 3\%$), но не ничтожно малой пластичности [206, 207, 211]. Соответствующая область на карте была определена как область скола или хрупкого разрушения по границам зерен 1 и 2 типа, хотя возможно правильно рассматривать этот механизм разрушения как разновидность скола 3 или хрупкого разрушения по границам зерен 3 при низкой пластичности. В широком диапазоне температур: от 0.3 до $0.5T_m$ ($500-1000^\circ\text{C}$) пластичность превышает 10% [206, 207], но разрушение происходит сколом или путем хрупкого разрушения по границам зерен. Этот режим разрушения был назван сколом 3 или хрупким разрушением по границам зерен 3.

При более высоких температурах разрушение становится полностью вязким [206]. При температурах выше $0.5T_m$ скорость деформации при ползучести становится существенной. При высокой скорости деформации материал разрушается по механизму транскристаллитного разрушения при ползучести [206], характеризующегося высокой пластичностью. Однако, при скорости деформации, приводящей к разрушению более, чем через 10^4с режим разрушения меняется на межкристаллитное разрушение при ползучести [206, 208].

Экспериментальные данные по разрушению при температурах выше $0.8T_m$ отсутствуют. Небольшая область, соответствующая механизму разрыва построена на карте по аналогии с другими ГЦК- и ОЦК-металлами.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

8.1. Классификация и упорядочение механизмов разрушения

Поведение материала при разрушении можно представить в виде карты механизмов разрушения, на которой показаны диапазоны напряжений, температур и времени, в пределах которых доминирует конкретный механизм разрушения. Такие карты могут иметь до семи отдельных областей, соответствующих различным видам скола или хрупкого разрушения по границам зерен, вязкого разрушения, разным режимам разрушения при ползучести и при разрыве. В данной работе (как и в предыдущей [1]) были обобщены данные о разрушении 35 металлов, сплавов и керамик и построены соответствующие карты механизмов разрушения. Можно выделить некоторые общие особенности карт.

Во-первых, материалы с одинаковой кристаллической структурой и типом связей, а также сравнимой чистотой имеют схожие карты разрушения. Например, никель является типичным представителем ГЦК-металлов, только иридий и родий несколько отклоняются от этого правила. Вольфрам является типичным представителем класса тугоплавких ОЦК-металлов; хлорид натрия – щелочно-галогенидных соединений; оксид алюминия – тугоплавких оксидов и т.д. Каждая совокупность образует класс, включающий схожие материалы, отличающиеся от материалов другого класса.

Во-вторых, легирование явно влияет на процесс разрушения. Легирование меняет расположение и размер областей на карте; уровни общего напряжения повышаются; наблюдается тенденция к сдерживанию процесса разрушения при разрыве, и часто усиливается межкристаллитное разрушение при ползучести.

8.2. Классификация кристаллических материалов по поведению при разрушении

По мере изменения связей от металлических к ионным и ковалентным наблюдается стабильный процесс изменения режимов разрушения. Это показано на рис.28, где схематично изображены типичные карты механизмов разрушения 5 классов твердых тел: ГЦК-металлов, ОЦК-металлов, щелочно-галогенидных соединений, оксидов тугоплавких металлов и твердых веществ с ковалентными связями (Si_3N_4 , SiC, Si, Ge, лёд). На первой карте механизмы скола отсутствуют (ГЦК металлы), но появляются на второй (ОЦК-металлы); область доминирования этих механизмов разрушения постепенно растет, и на последней карте занимает более половины общей площади (Si_3N_4 и др.). Область, соответствующая вязкому разрушению, явно доминирующая на первых картах, уменьшается и исчезает в дальнейшем. Область, соответствующая механизму «разрыв», аналогичным образом постепенно уменьшается и исчезает. Можно предположить, что приведенный набор карт охватывает весь диапазон возможного поведения материалов, и что любое кристаллическое твердое вещество может найти свое место на этой схеме.

Зависимость размера области, соответствующей сколу от типа связи в материале представляется настолько явной, что на наш взгляд заслуживает более внимательного исследования.

8.3. Критерии возникновения разрушения сколом

Разрушение сколом при заданном напряжении происходит в кристаллах, когда сопротивление пластическому сдвигу оказывается настолько велико, что в некоторой точке внутри кристалла локально достигается уровень теоретической прочности до того, как достигаются условия необходимые для возникновения скольжения [212]. В большинстве ГЦК-металлов сдвиг происходит легко. Эти металлы обладают пластичностью при всех обычных напряженных состояниях. Величины напряжения, необходимого для скола достичь в них не удается, т.к. напряжения ограничены «включением» скольжения. С другой стороны, ОЦК- и ГПУ- металлы при температуре ниже $0.3T_m$ разрушаются сколом при большинстве обычных напряженных состояний, потому что (при этих низких температурах) *сопротивление кристаллической решетки* затрудняет скольжение. В керамике разрушение сколом происходит в более широком диапазоне температур, потому что ионные и ковалентные связи в них еще больше затрудняют скольжение.

Предпринимался ряд попыток сформулировать критерии возникновения хрупкого разрушения в твердых телах [212-215]. Теоретическая идея в этих моделях заключается в том, что разрушение сколом или хрупкое разрушение по границам происходит, если для пластического сдвига необходимо очень большое напряжение. Этот теоретический базис кажется обоснованным; и различие в критериях появления скола состоит лишь в методах оценки величины сопротивления пластическому сдвигу и величины силы связей.

На простейшем уровне в работе Пью Pugh [214] показано, что предел прочности при сдвиге следует «измерять» в G (где G – это модуль сдвига), в то время как сопротивление разрушению «измеряется» в K (где K – это объемный модуль). Большие значения G/K характерны для состояния хрупкости, а малые – для состояния пластичности. Оценка величин этого критерия дана в таблице 4[†]. Хотя в принципе подход верен, этот критерий не является удовлетворительной мерой хрупкости.

Альтернативный подход [213], базирующийся на тех же физических основах, состоит в исследовании величины Gb/γ , где b – это размер атома, а γ – поверхностная энергия. Большая величина Gb/γ говорит о хрупкости. Оценка значений этого критерия также дана в таблице 4. И вновь, несмотря на то, что, в общем, подход верен, совпадение значений этого критерия для вязких ГЦК-металлов и хрупких ОЦК-металлов снижает реальную ценность этого критерия, также как и первого.

Основная проблема рассмотренных критериев может заключаться в использовании Gb как величины, характеризующей сопротивление сдвигу. Медь и германий имеют схожие модули сдвига; однако значения пределов текучести этих металлов при низких температурах отличаются более чем в 10 раз. Критерии основаны на том, что легкость *зарождения дислокаций* определяет величину локального сопротивления сдвигу; эта величина обозначается как Gb . Мы считаем, что эта идея достаточно спорна: даже в области, соответствующей «сколу 2», перед разрушением отмечается наличие некоторой микропластичности; а в характерной для всех кристаллических материалов большой области, соответствующей хрупкому разрушению, которые мы называем «скол 3 или хрупкое разрушение по границам зерен 3», пластичность перед разрушением значительна. В этом случае Gb не может быть надежной мерой сопротивления пластическому сдвигу.

Мы исследовали еще два критерия. Данные о пределе текучести или твердости как функции температуры имеются для большинства чистых металлов и многих видов керамик. Экстраполяция имеющихся данных до абсолютного нуля позволяет получить величину интенсивности течения при 0 К, которую мы обозначим σ_y^0 . Величина $\sigma_y^0 \Omega$ (где Ω – атомный или молекулярный объем) имеет размерность энергии на атом. Эта величина работы, необходимой для сдвига одного атома или молекулы относительно другого атома или молекулы. Хотелось бы сравнить это значение с какой-нибудь величиной, которую можно считать мерой сил связи в твердом теле. Температура плавления T_m является одной из таких величин; в таблице показаны безразмерные значения $\sigma_y^0 \Omega / kT_m$, где k – постоянная Больцмана. Второй величиной (которая использовалась в рассмотренном ранее критерии) является объемный модуль, K ; в таблице приведены безразмерные значения σ_y^0 / K .

Классификация материалов в соответствии с этими критериями (Табл. 4, последние две колонки) четко разделяет материалы на те, которые разрушаются и те, которые не разрушаются сколом. Кроме того, полученный критерий хорошо коррелирует с относительными величинами областей, соответствующих сколу, на картах на рис.3–27. Подробное сравнение наводит на мысль о том, что из четырех критериев, рассмотренных здесь, использование четвертого

[†] Данные, использованные в табл.4, более подробно описаны в Приложении.

критерия (классификация по σ_y^0/K) дает наиболее точную корреляцию с размером областей, соответствующих хрупкому разрушению в вышеперечисленных твердых телах.

Необходимо заметить, что использование величины σ_y^0 вместо G не совсем удобно: G является внутренним, не чувствительным к структуре свойством, которое легко связать с природой и прочностью связи; σ_y^0 зависит от примесей и дефектов, поэтому обеспечить его измерение с достаточно высокой воспроизводимостью труднее. Но величина G «измеряет» устойчивость кристалла к бесконечно малому сдвигу, и, очевидно, не может рассматриваться как адекватная мера сопротивления пластическому сдвигу; в то время как σ_y^0 является внутренним свойством чистого отожженного кристалла и «измеряет» устойчивость большим сдвигам, а также выявляет природу и прочность связей, также как и модули.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Источники данных для таблицы 4

Значения модуля сдвига G и объемного модуля K представляют собой среднее арифметическое значений, полученных Хашином и Штрикманом Hashin и Shtrikman [216] с помощью данных, собранных Симмонсом и Ваном Simmons и Wang [217]. Можно сказать (как в работе Хеклера и др. Nekler et al. [211]), что лучше всего в качестве значения G брать модуль сдвига в плоскости скольжения и в направлении скольжения. Однако, этот тезис основан на особенностях предполагаемого механизма возникновения скольжения, выбор которого является дискуссионным. Тем не менее, сделанные в этой работе выводы не изменятся при таком альтернативном значении G .

Величина Ω – это атомный объем элементов, молекулярный объем для двухатомного соединения (NaCl) и «объем на ион» для наибольшего по величине иона в смеси; например Ω для Al_2O_3 – 1/3 объема, соответствующего двум ионам алюминия и трем ионам кислорода (ион кислорода больше). Этот расчет был сделан по стандартным кристаллографическим данным.

Поверхностная энергия получена по данным Джонса [218]; Jones Келли и Гровеса Kelly и Groves [219], а также Хьюмана и Джоханниссона Neumann и Johannisson [220] (Pb), Гилмана Gilman [221] (LiF), Гатшелла и Грасса Gutshall и Gross [222] (NaCl), Вествуда и Хитча Westwood и Hitch [223] (KCl) и Флетчера Fletcher [224] (лёд).

Значения σ_y^0 для вязких твердых тел получены по данным испытаний на растяжение, экстраполированным к 0 К. Для ГЦК металлов использовалось значение σ_y^0 , соответствующее стадии упрочнения; значения для чистых отожженных образцов ниже и, могут (если будут использоваться) еще понизить значения $\sigma_y^0\Omega/T_m$ и σ_y^0/K для этих металлов. Значения σ_y^0 для хрупких металлов были получены экстраполяцией данных по твердости в 0 К (для получения H^0) с использованием формулы:

$$\sigma_y^0 = \frac{H^0}{3}$$

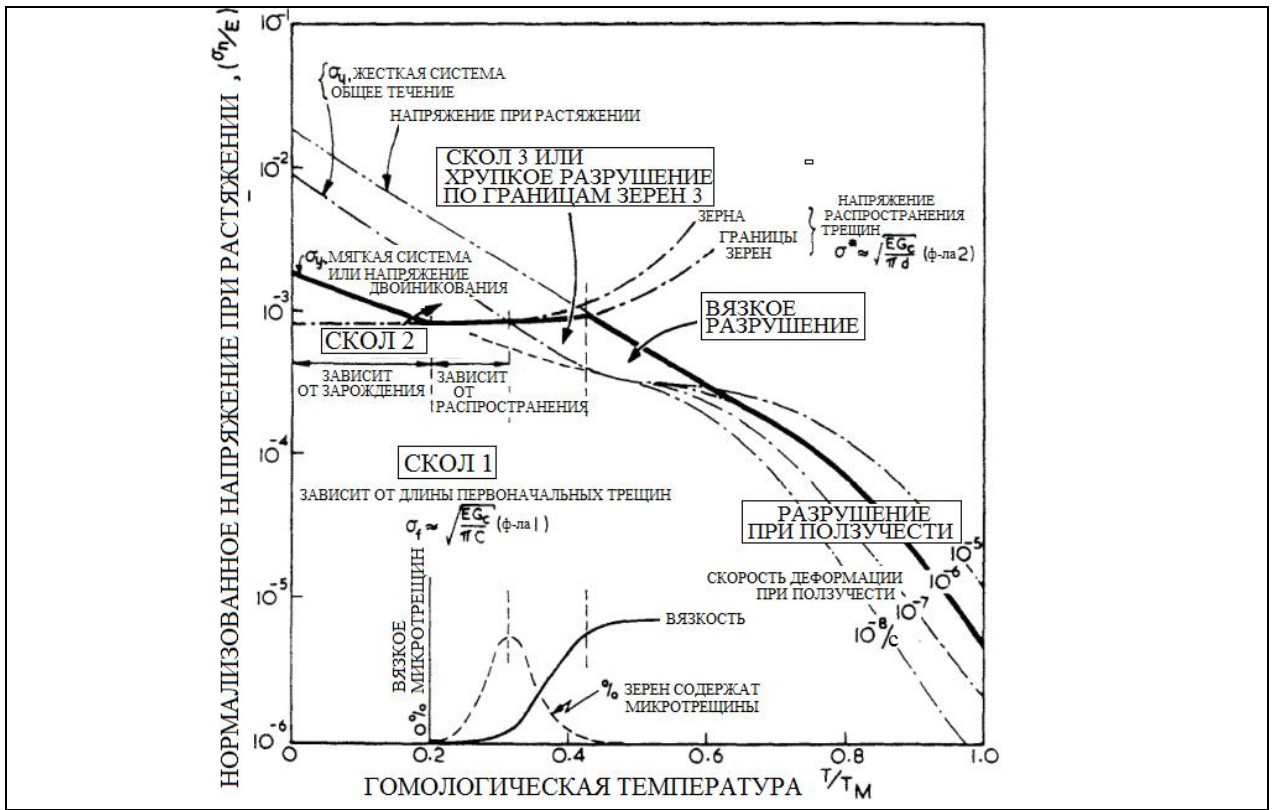


Рис. 2 Определение полей трех типов скола или хрупкого межкристаллитного разрушения. Область, соответствующая полностью хрупкому разрушению, возникающая из-за первоначальных дефектов, находится на карте гораздо «ниже» области, соответствующей общей текучести. Такой режим разрушения называется скол 1 или хрупкое разрушение по границам зерен 1. Почти полностью хрупкое разрушение, возникающее из-за трещин, образовавшихся при скольжении или в процессе двойникования, называется скол 2 или хрупкое межкристаллитное разрушение 2. Соответствующая область на карте также находится ниже области, соответствующей общей текучести. Скол или хрупкое зернограничное разрушение, возникающее после появления общей текучести и при умеренной деформации до разрушения, называется скол 3 или хрупкое разрушение по границам зерен 3.

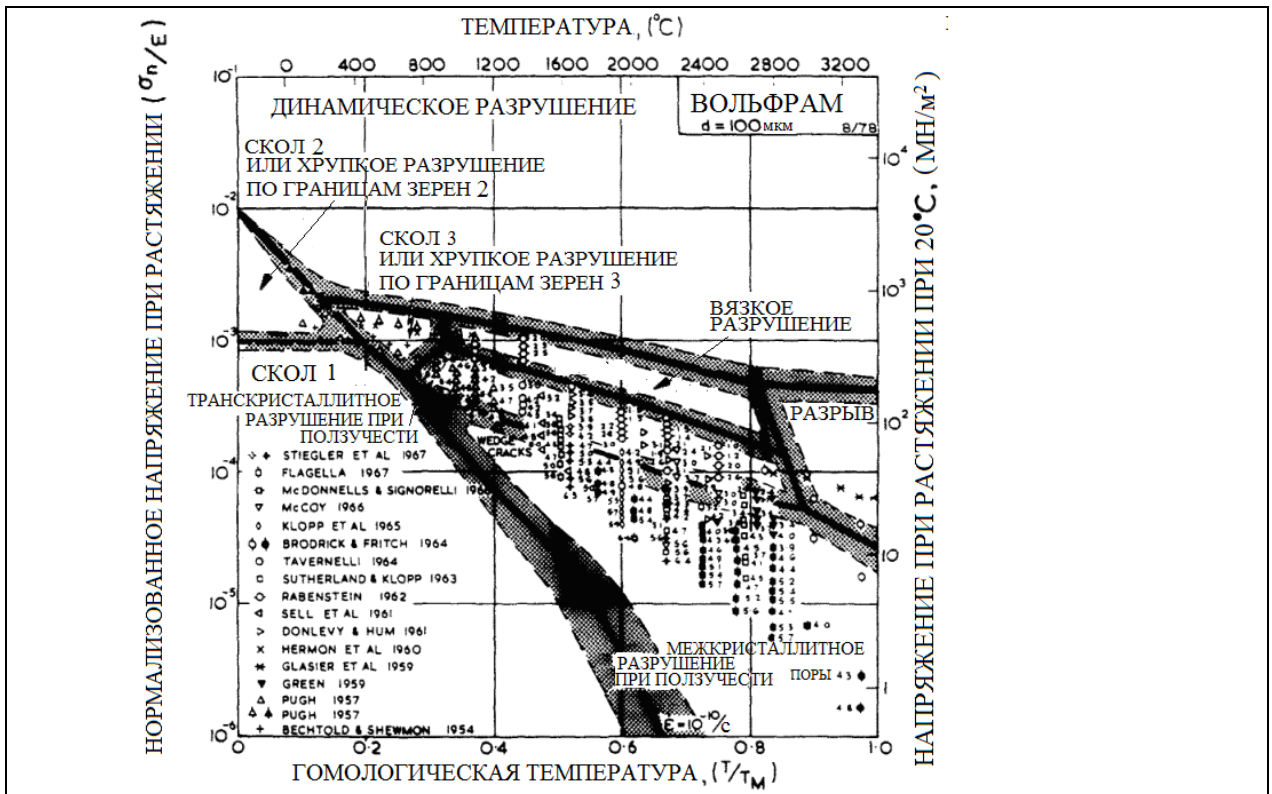


Рис.3. Карта механизмов разрушения вольфрама при растяжении. На карте построены три области, соответствующие различным типам разрушения при низких температурах; другие области похожи на соответствующие области на картах ГЦК металлов [1]. ([14-30]).

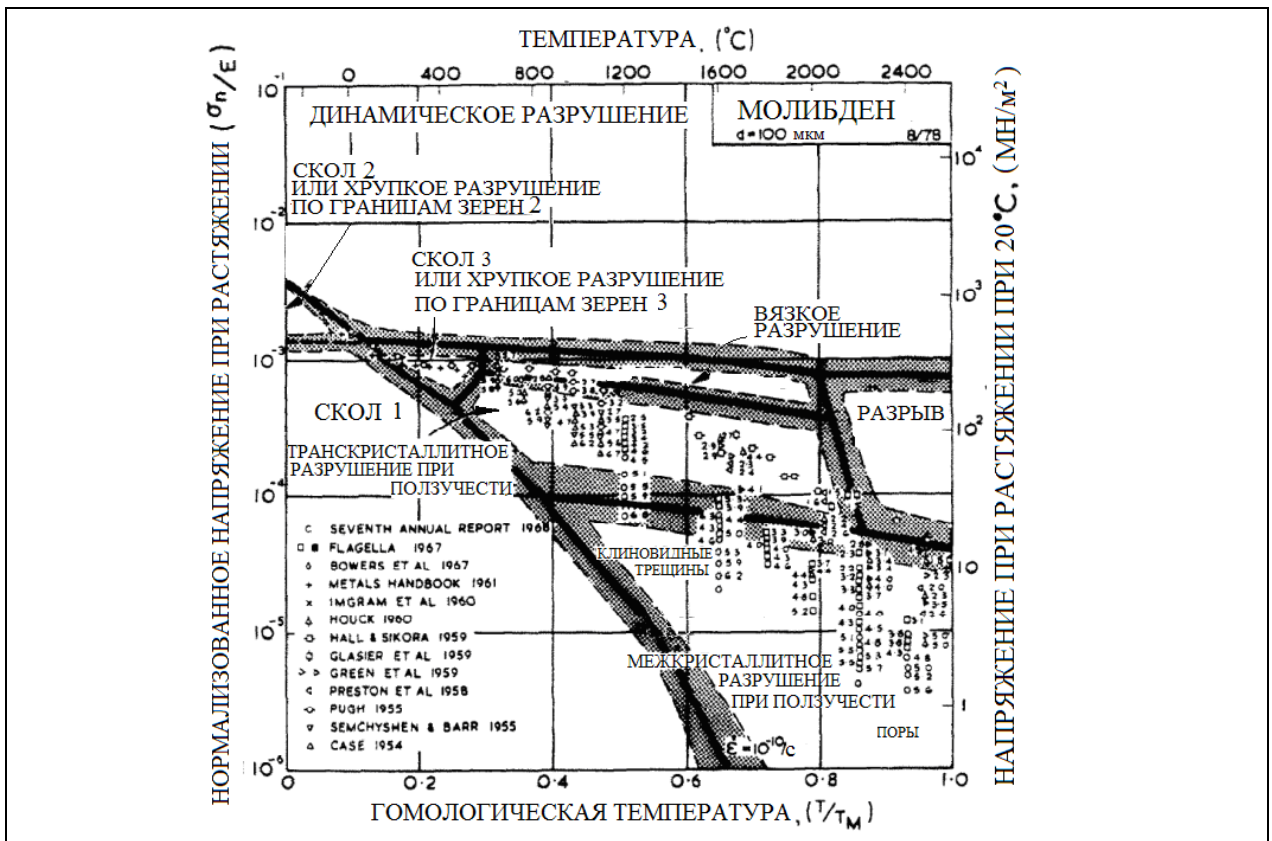


Рис.4. Карта механизмов разрушения молибдена. Она похожа карту разрушения вольфрама при растяжении. [32, 15, 16, 32, 4, 34-36, 27, 37-41].

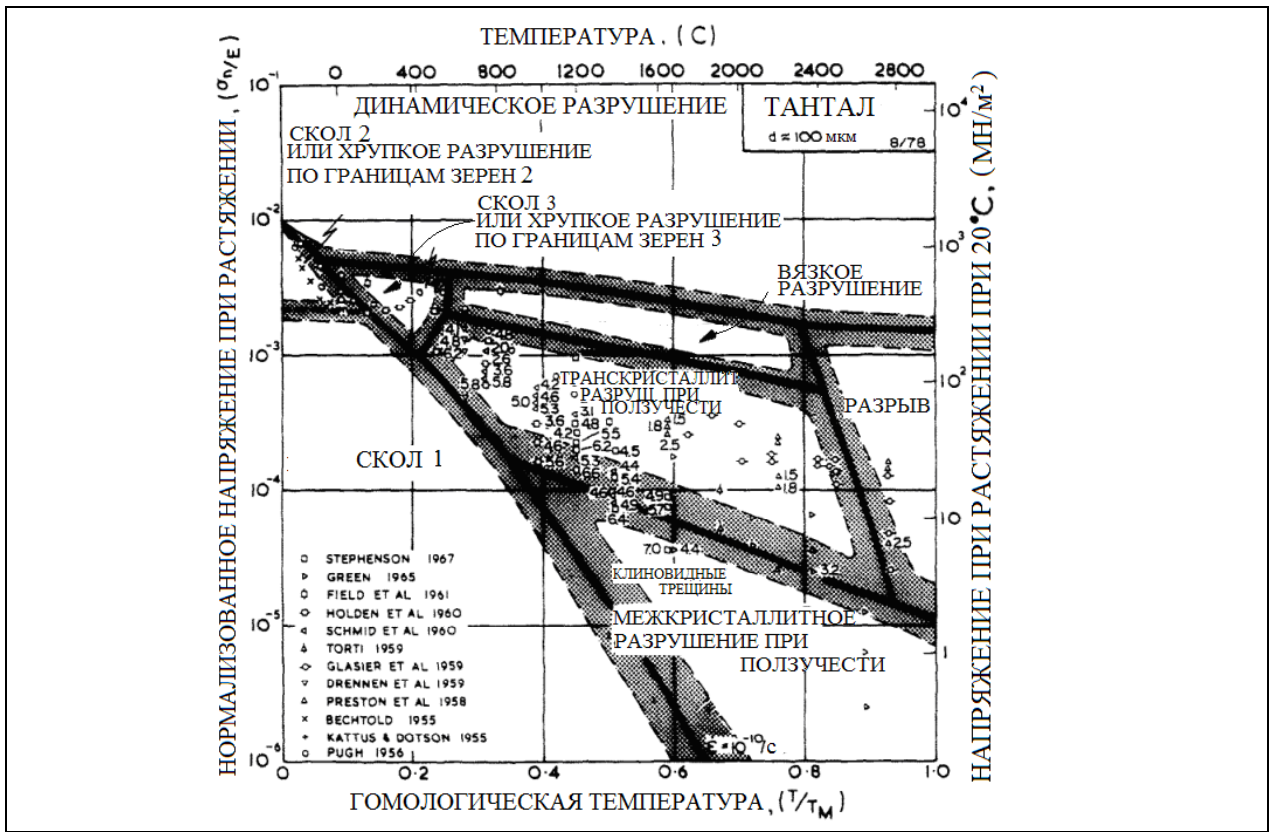


Рис.5. Карта механизмов разрушения тантала. (Ссылки по порядку [43-48, 27, 49, 38, 42, 50, 51]).

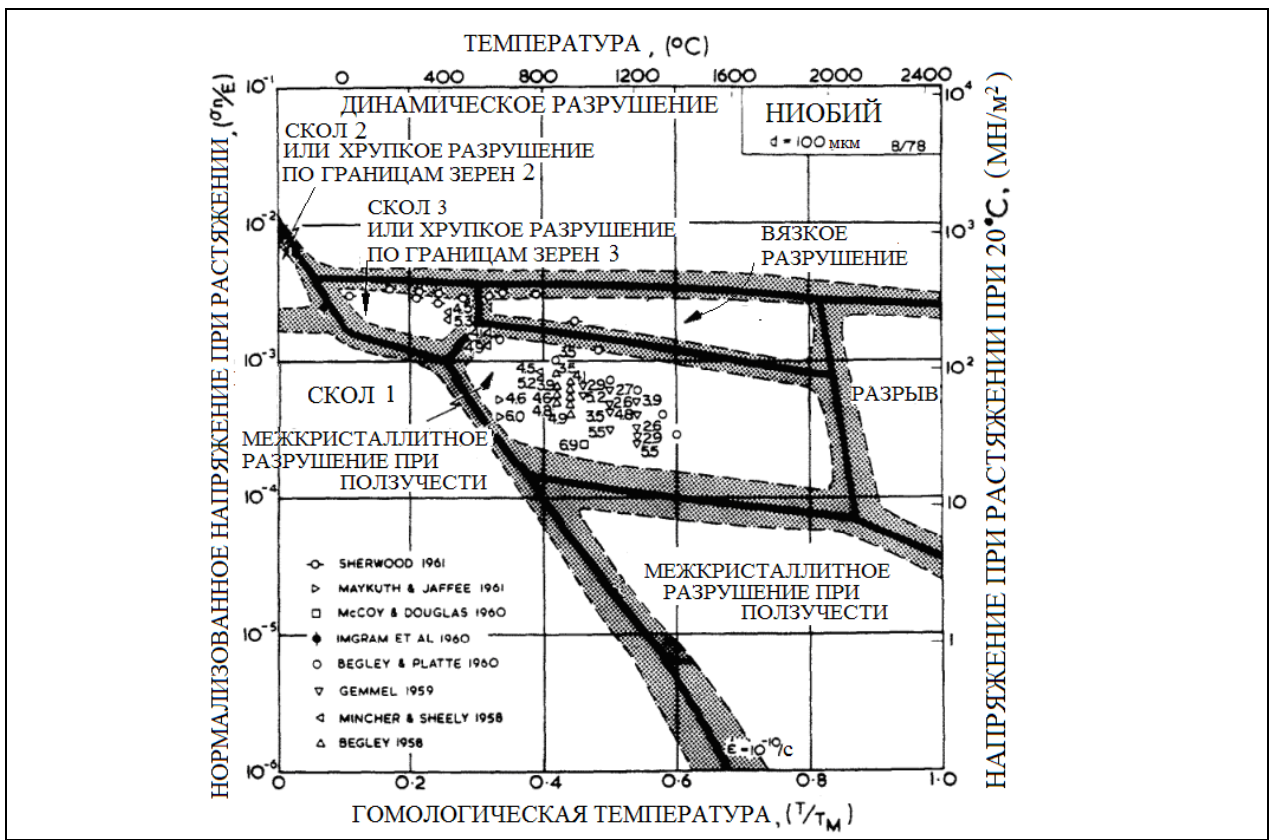


Рис.6. Карта механизмов разрушения ниобия. (Ссылки по порядку [52-54, 34, 55-58]).

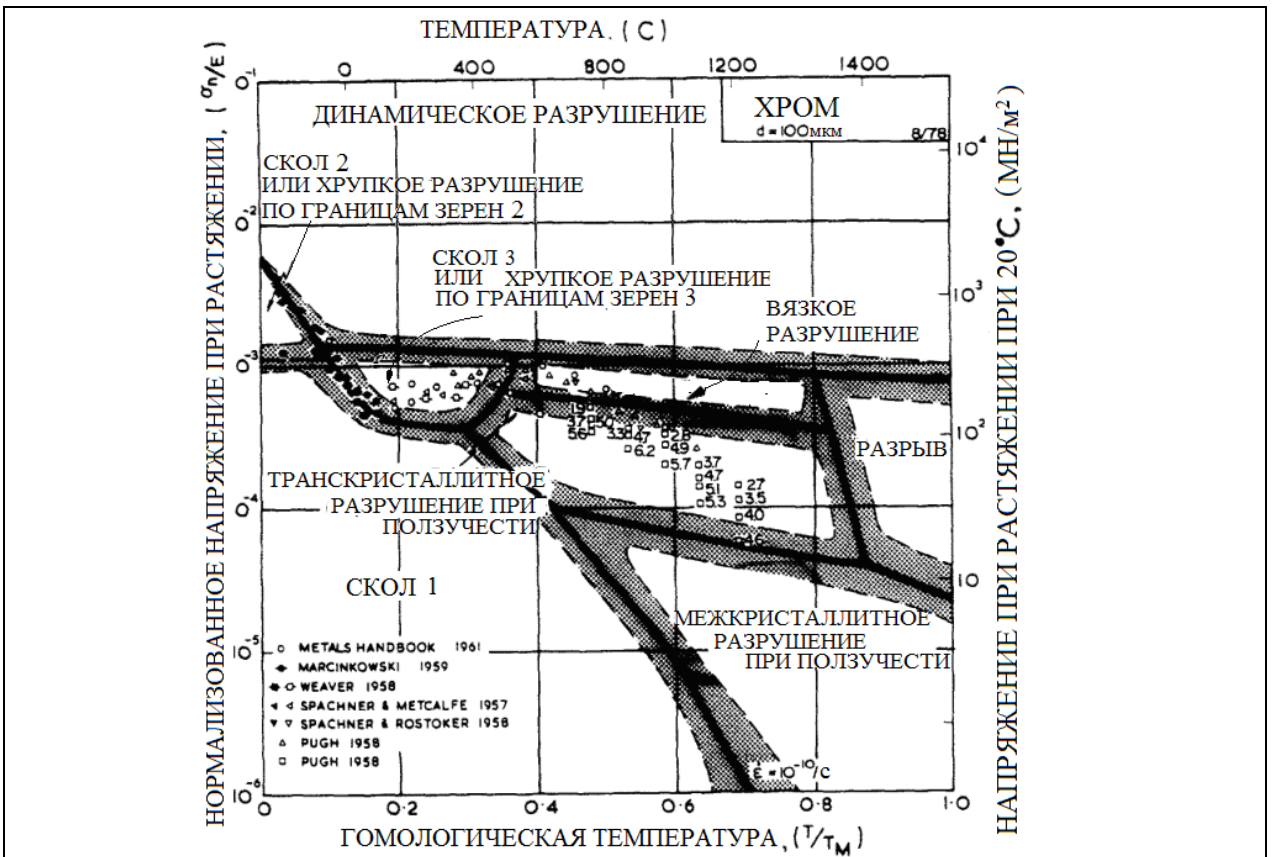


Рис.7. Карта механизмов разрушения хрома. (Ссылки по порядку [4, 59-63]).

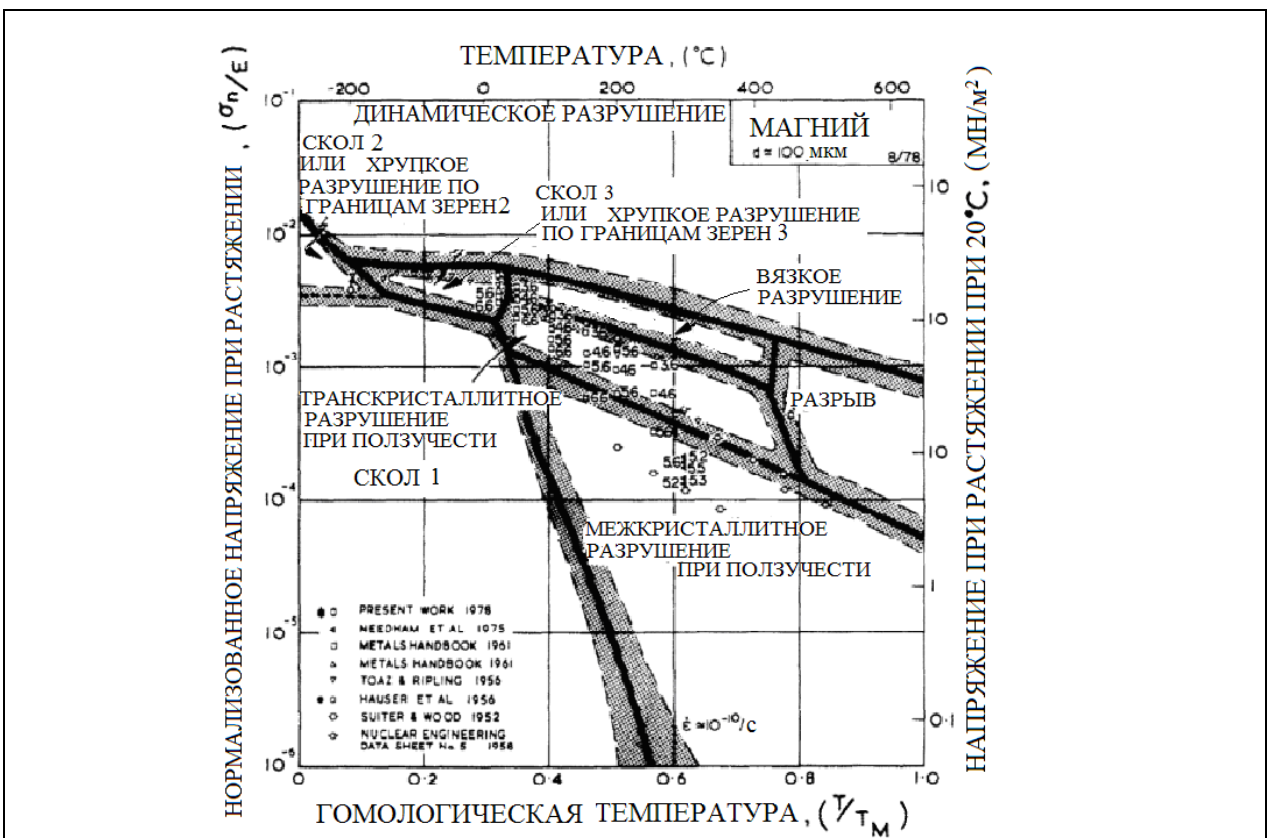


Рис.8. Карта механизмов разрушения магния технической чистоты. (Ссылки по порядку [64, 4, 65-69]).

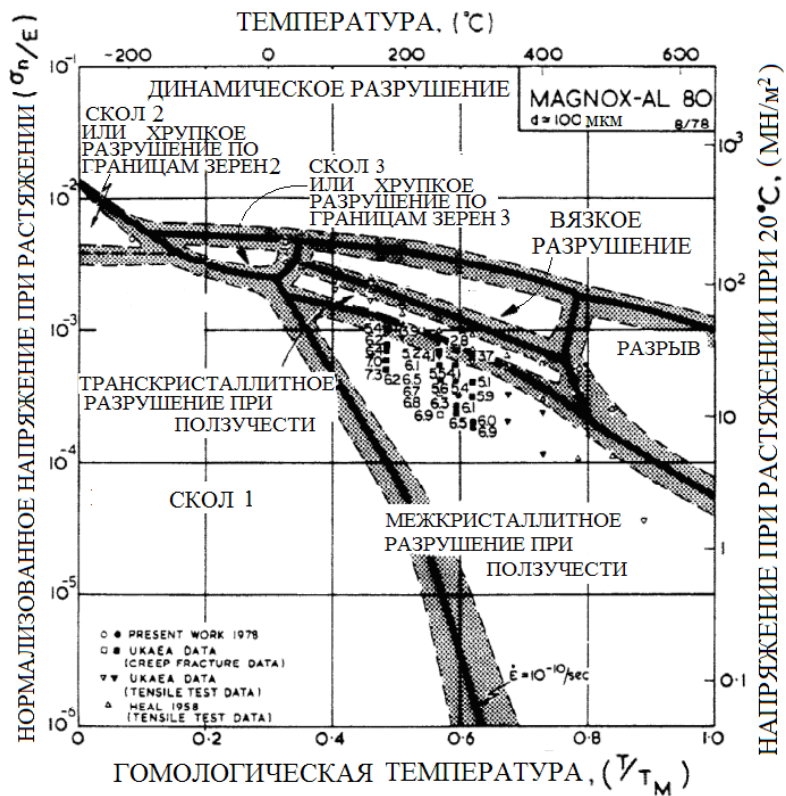


Рис.10. Карта механизмов разрушения Magnox-AL80 – сплава для покрытий с содержанием 0,8% Al и 0,005% Ве. Карта имеет большое сходство с картой магния.(Ссылки по порядку [74, 75]).

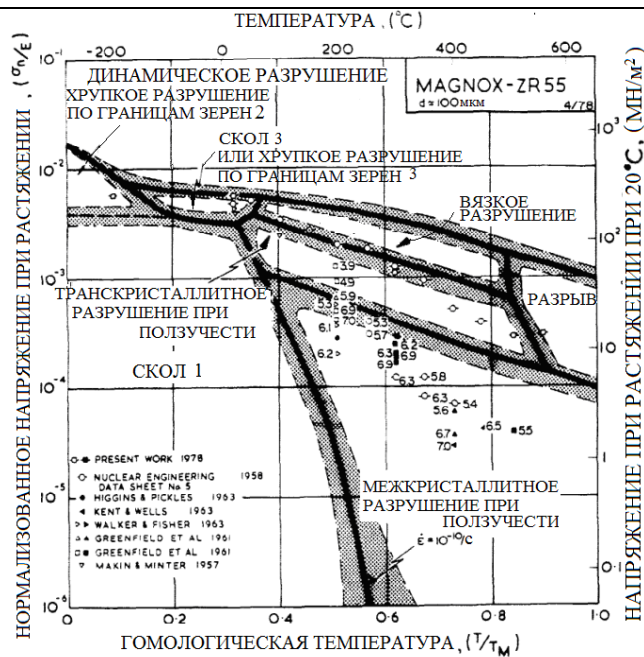


Рис.12. Карта механизмов разрушения MAGNOX-ZR55 – конструкционного сплава, с содержанием 0.5% Zr.(Ссылки по порядку [69,83-87]).

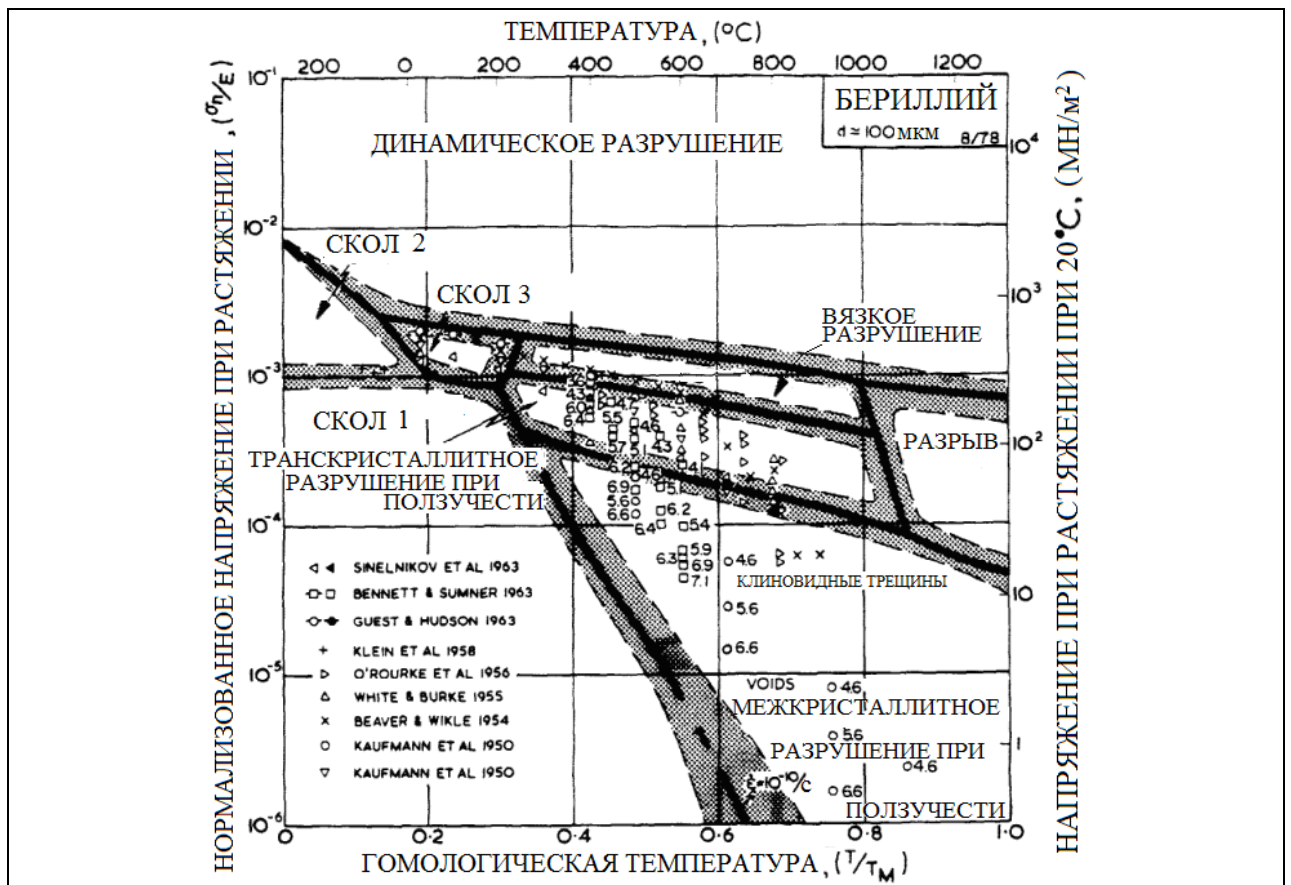


Рис.14. Карта механизмов разрушения бериллия. (Ссылки по порядку [88-93, 12, 94]).

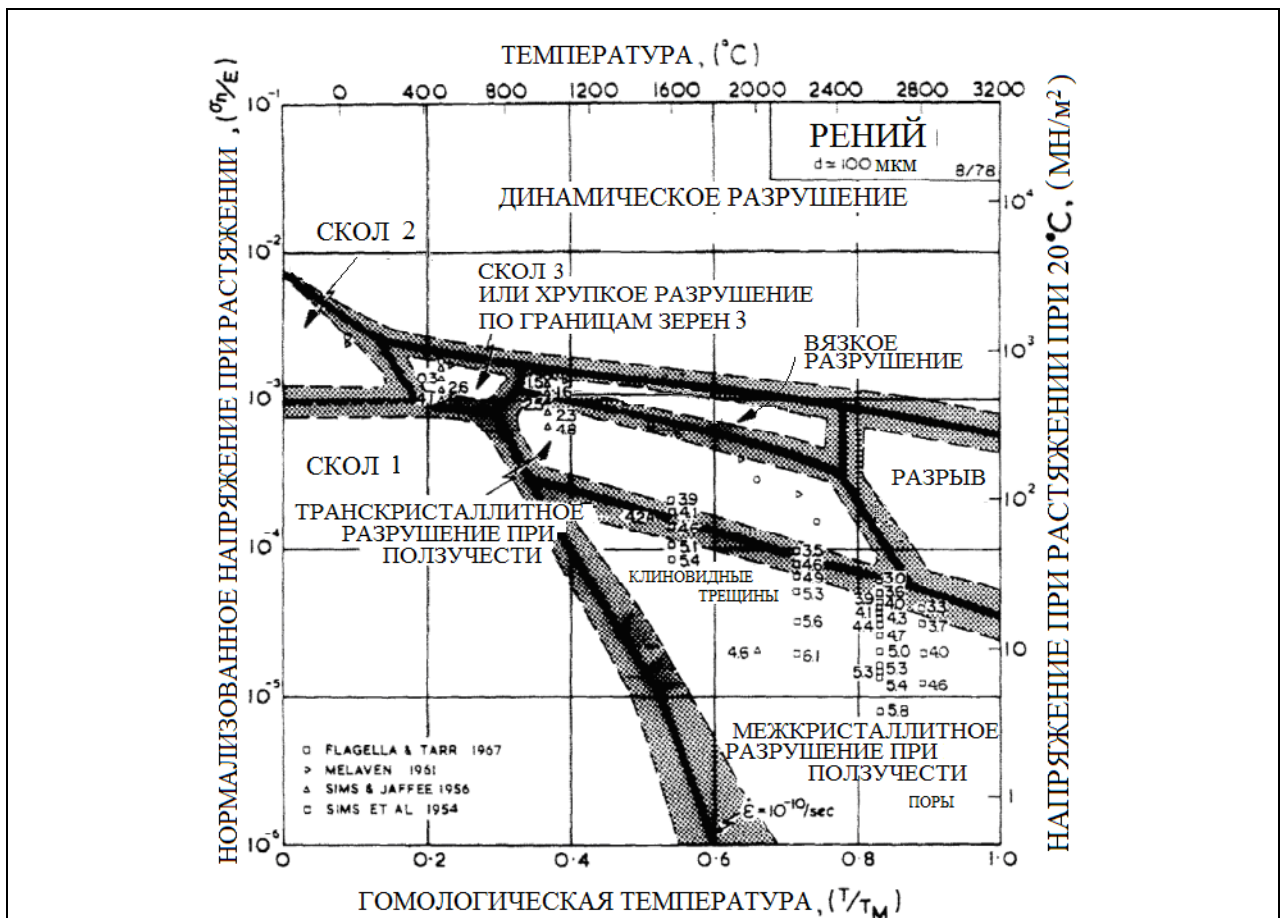


Рис.15. Карта механизмов разрушения рения. (Ссылки по порядку [95- 98]).

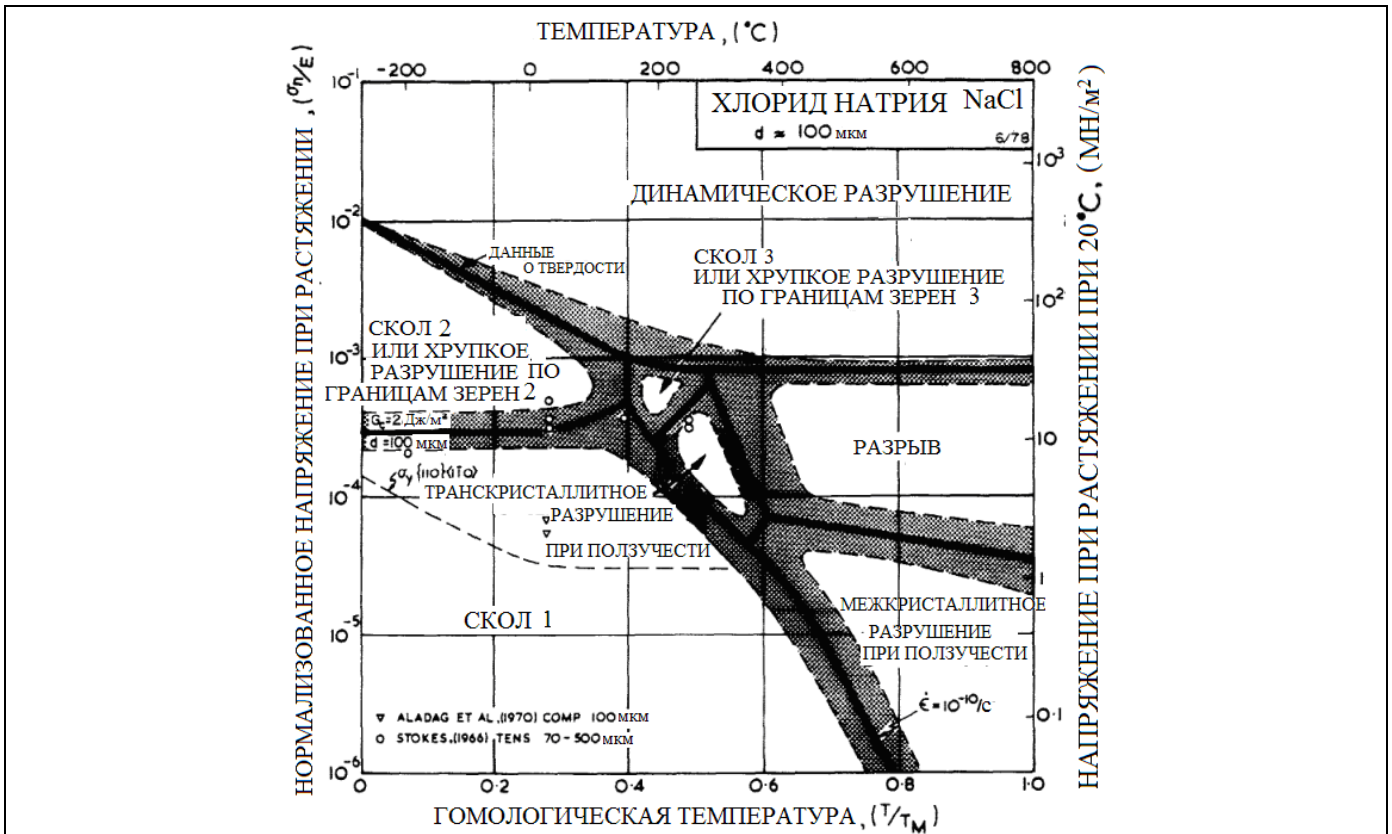


Рис.16. Карта механизмов разрушения хлорида натрия NaCl (Ссылки по порядку [120, 121]).

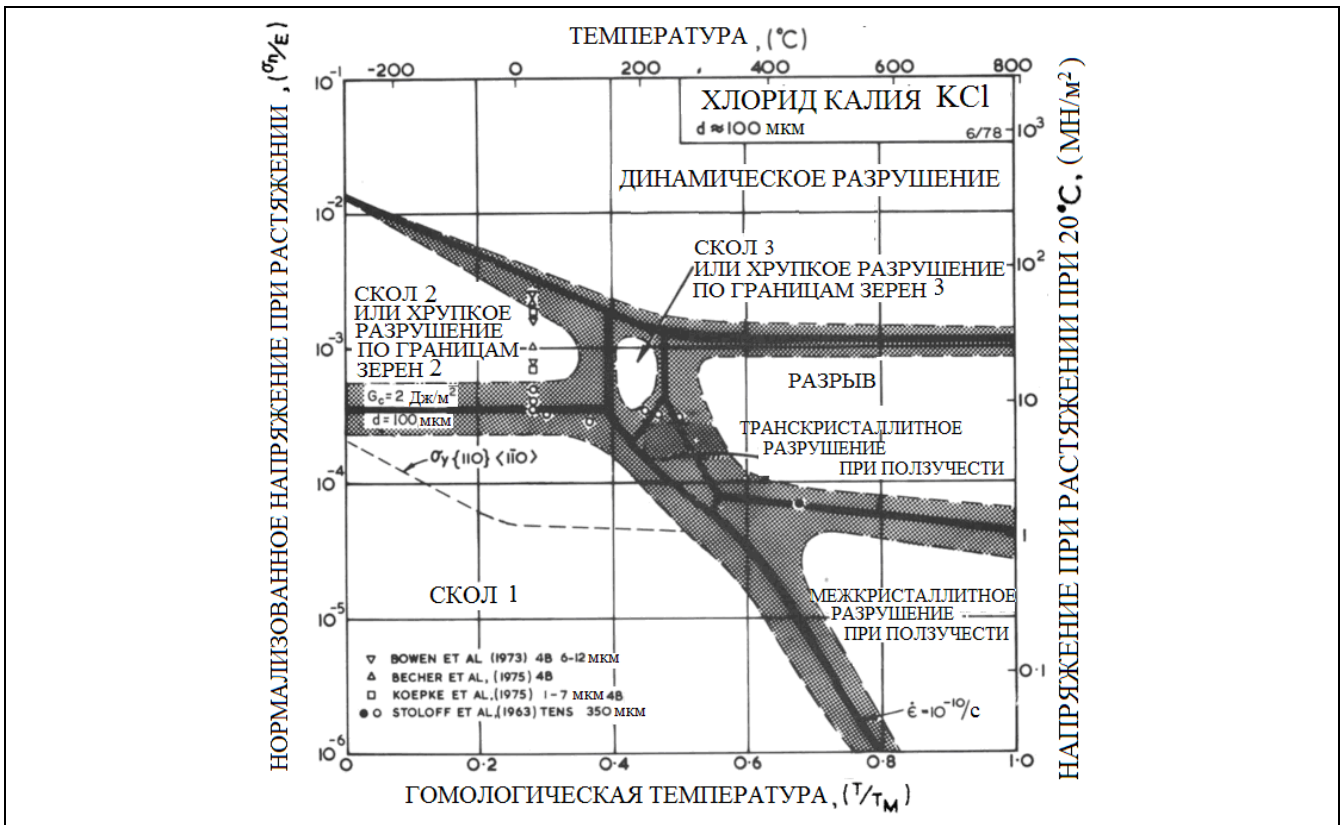


Рис.17. Карта механизмов разрушения хлорида калия KCl (Ссылки по порядку [122-125]).

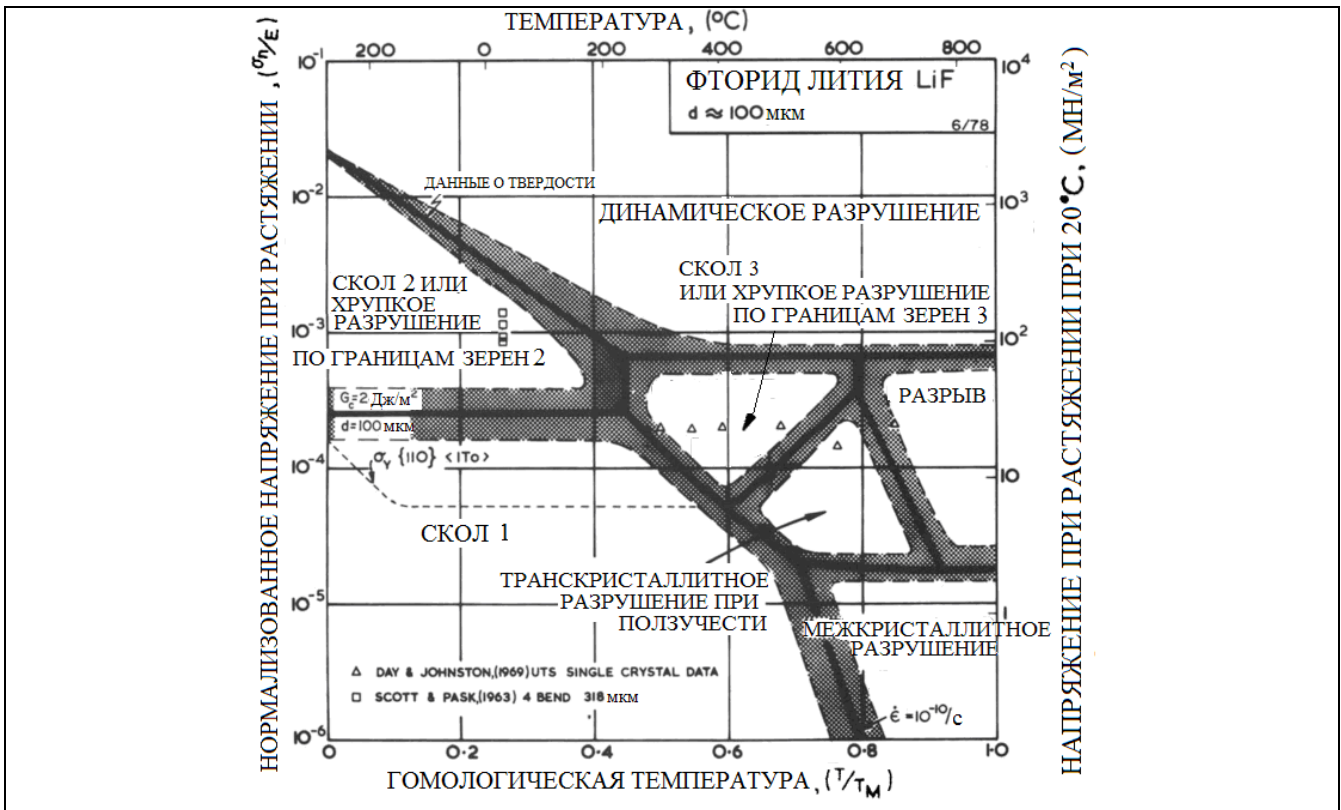


Рис.18. Карта механизмов разрушения фторида лития LiF (Ссылки по порядку [130, 131]).

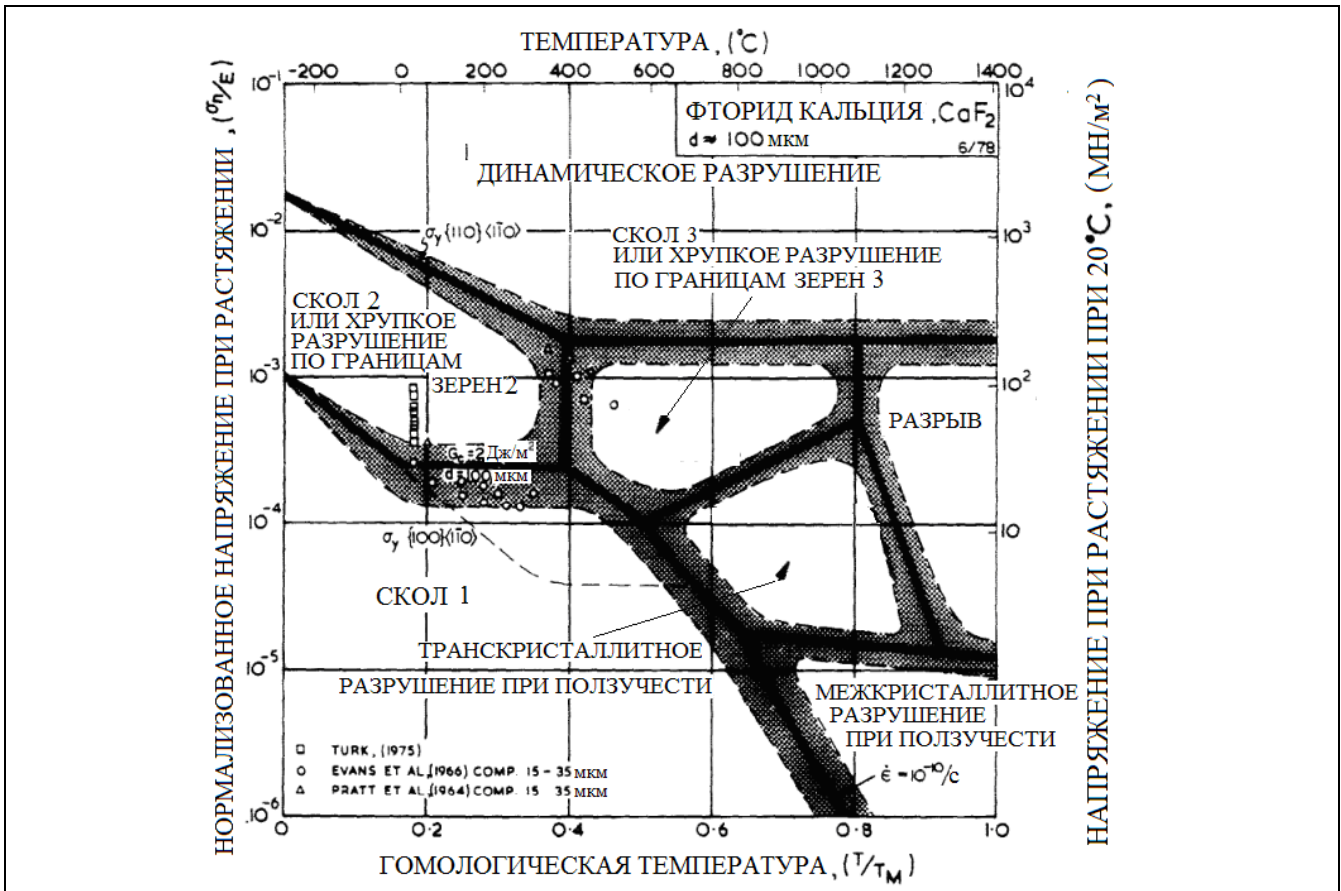


Рис.19. Карта механизмов разрушения фторида кальция CaF₂ (Ссылки по порядку [134, 112, 135]).

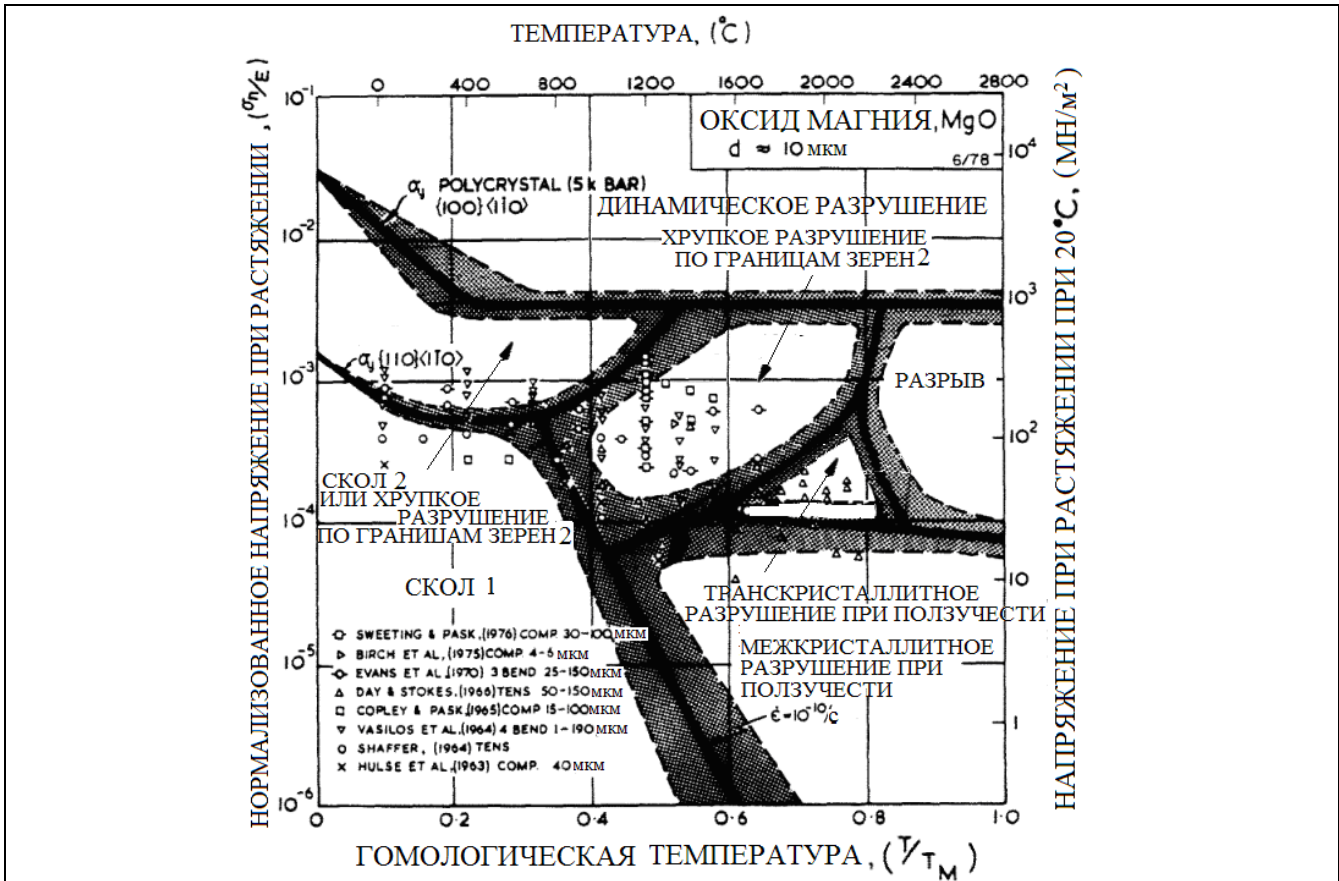


Рис.20. Карта механизмов разрушения оксида магния MgO (Ссылки по порядку [136-141, 104, 142]).

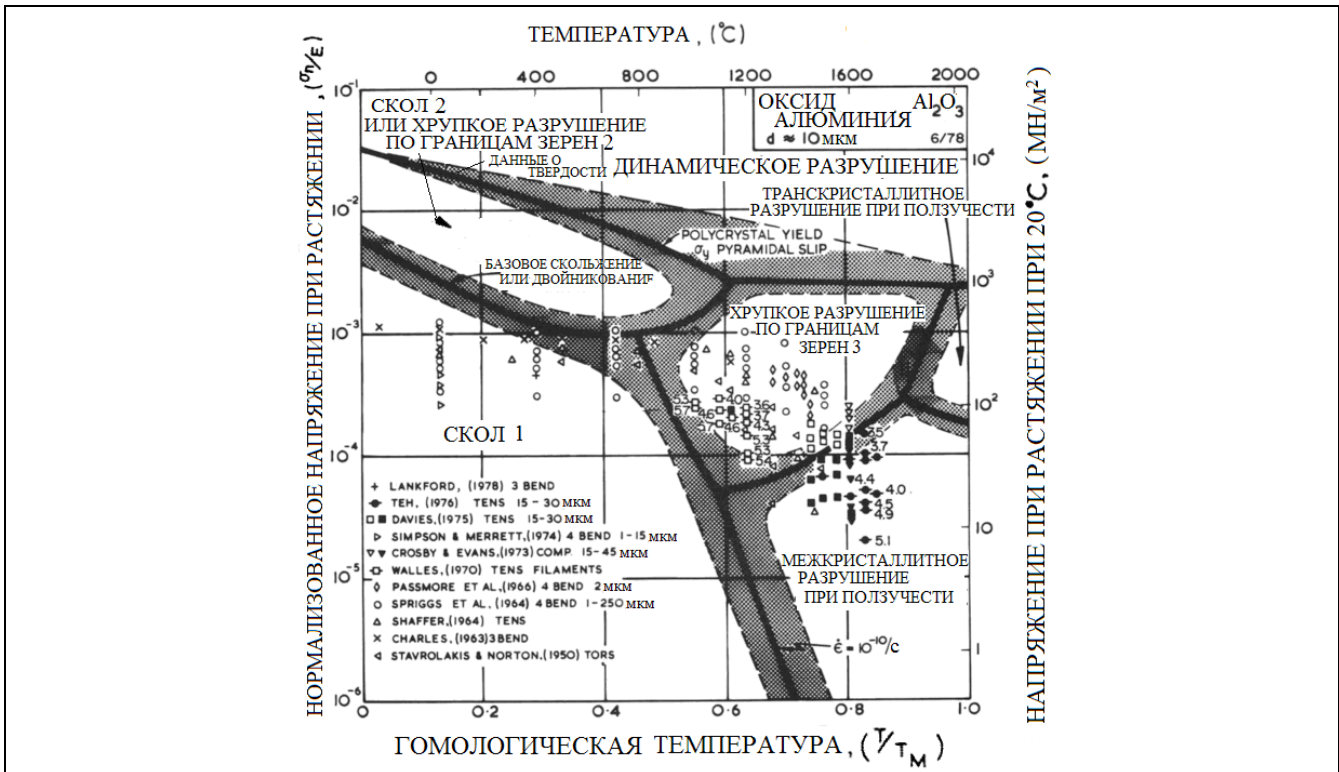


Рис.21. Карта механизмов разрушения оксида алюминия, Al₂O₃ (Ссылки по порядку [145-152, 104, 153, 154]).

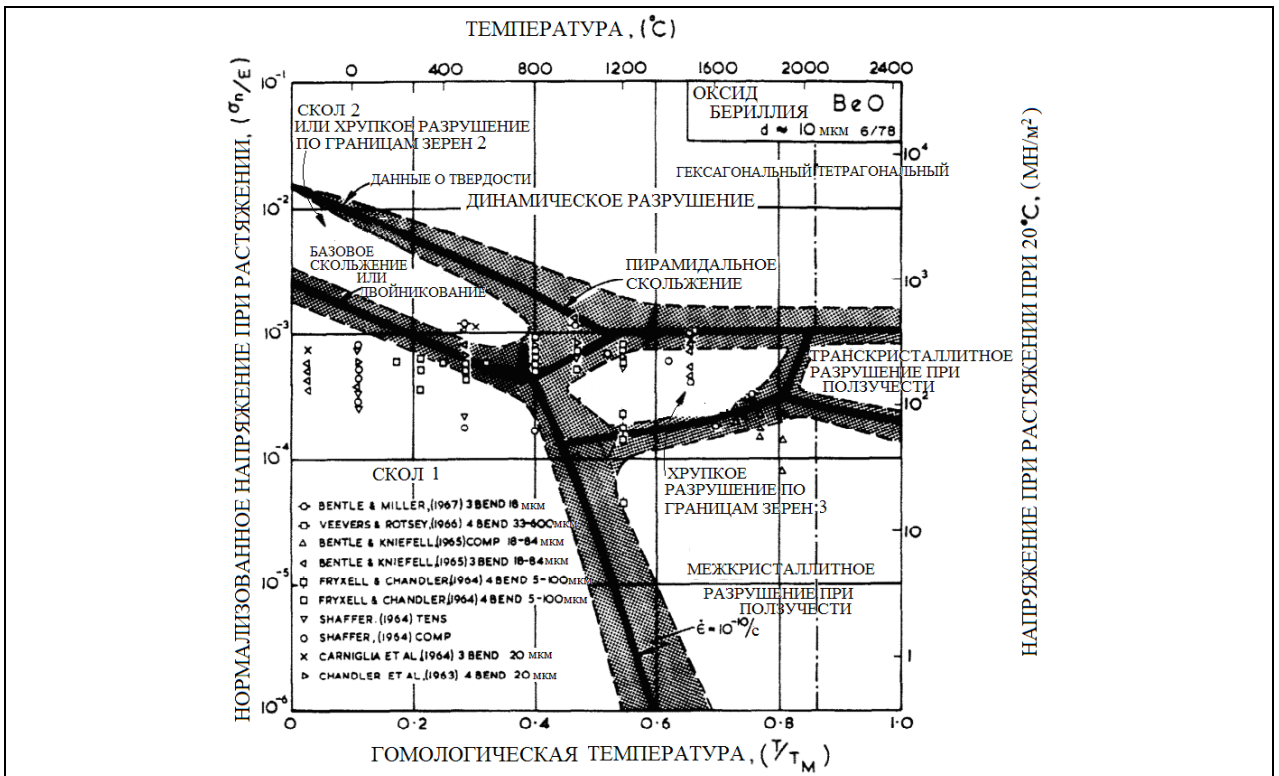


Рис.22. Карта механизмов разрушения оксида бериллия, BeO (Ссылки по порядку 162-165, 104, 166, 167)).

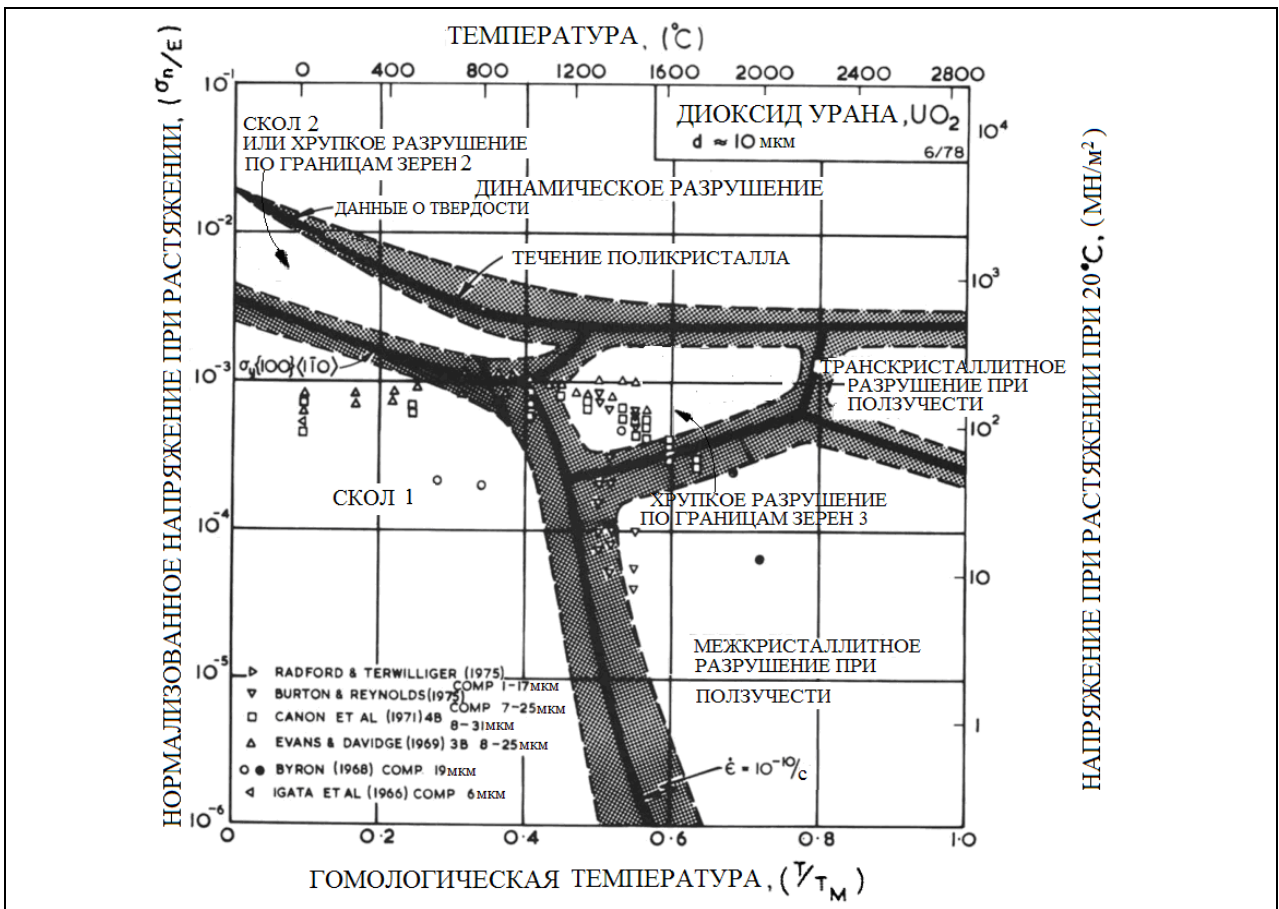


Рис.23. Карта механизмов разрушения оксида урана UO₂ (Ссылки по порядку [169-174]).

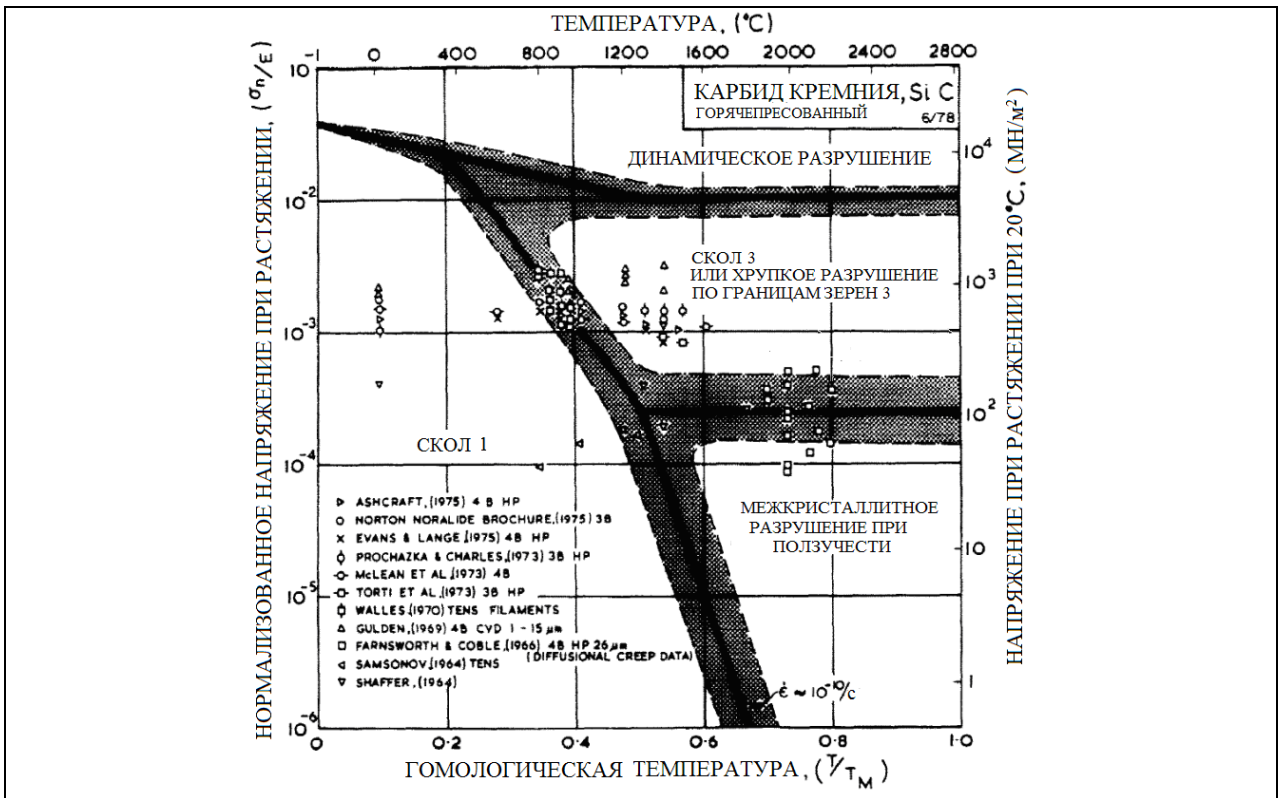


Рис.24. Карта механизмов разрушения горячепрессованного карбида кремния, SiC (Ссылки по порядку [176-181, 150, 182-184, 104]).

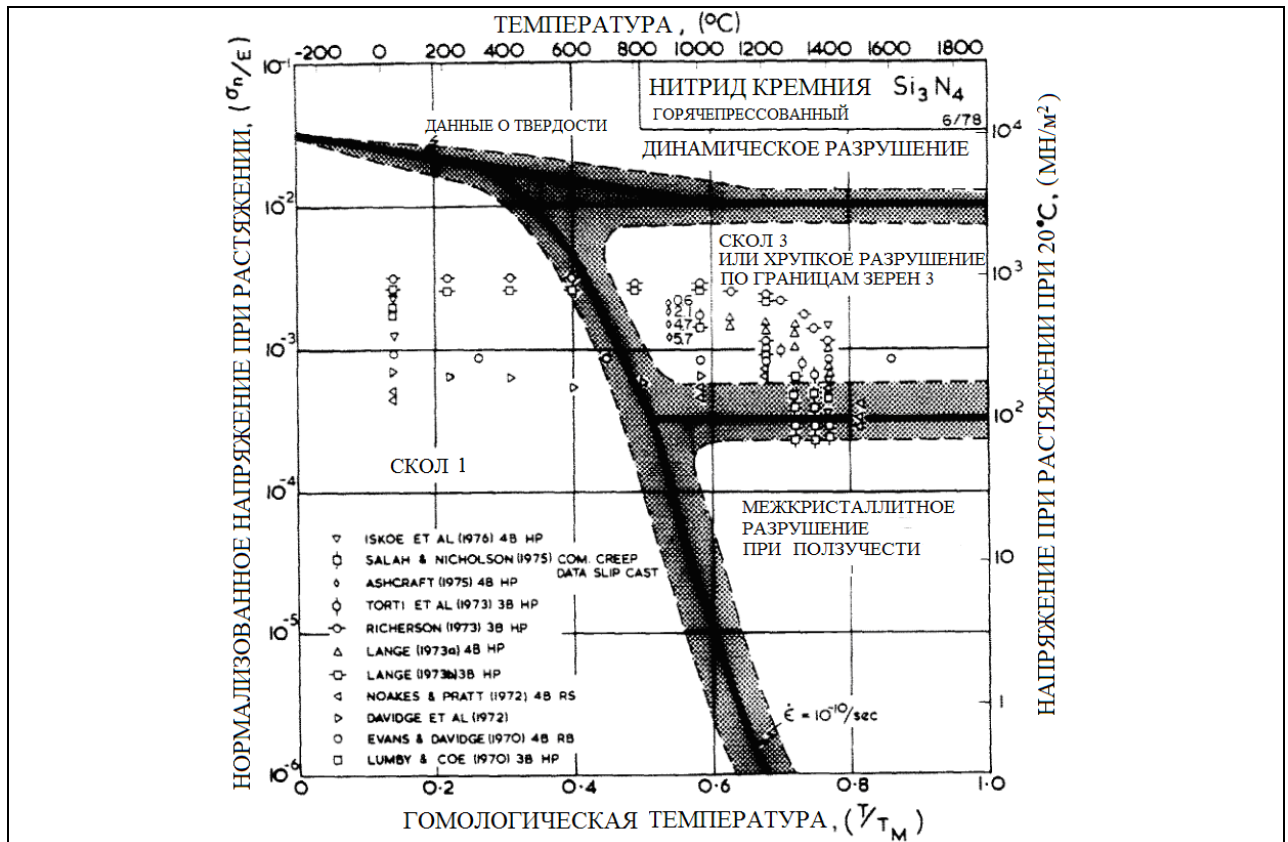


Рис.25. Карта механизмов разрушения горячепрессованного нитрида кремния, Si_3N_4 (Ссылки по порядку [186, 187, 176, 181, 188-193]).

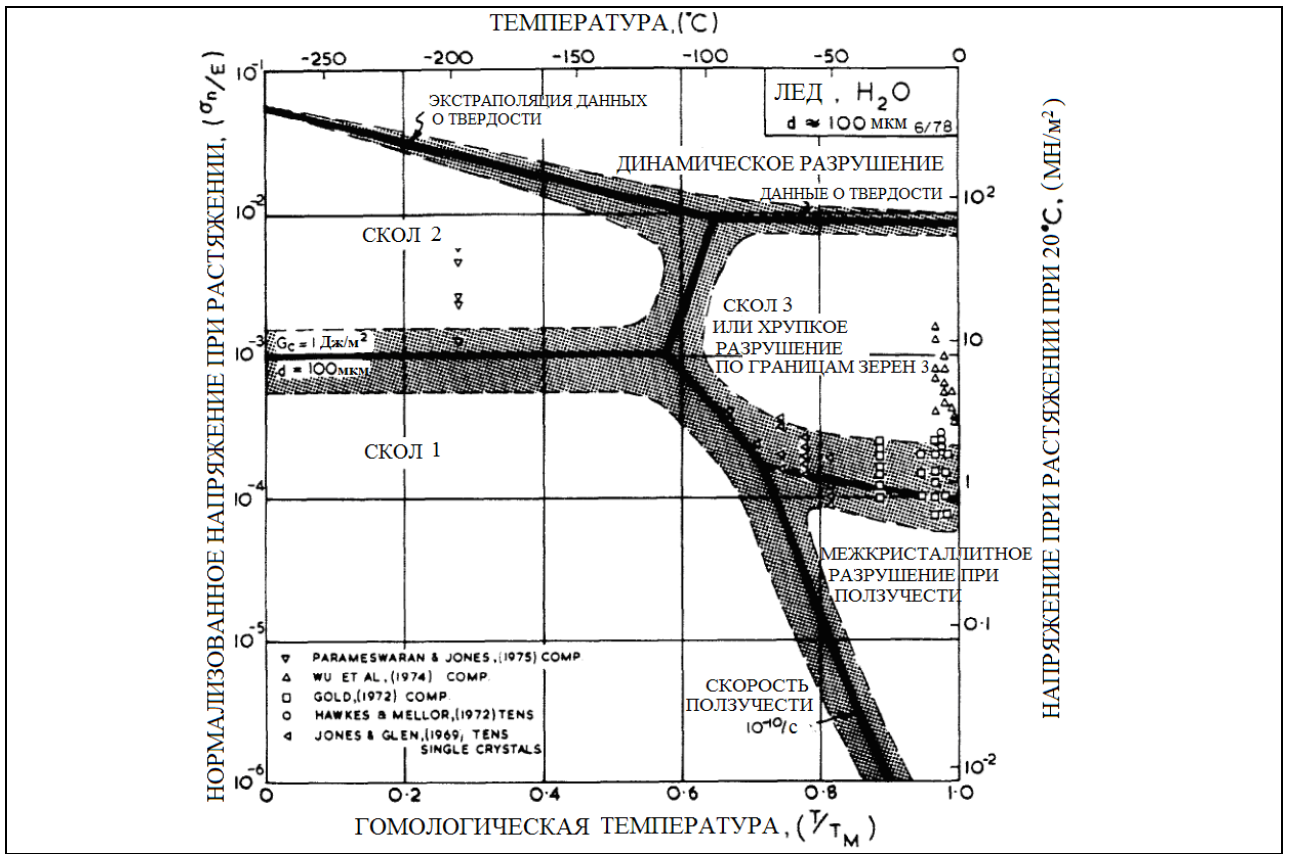


Рис.26. Карта механизмов разрушения льда, H₂O (Ссылки по порядку [195-200]).

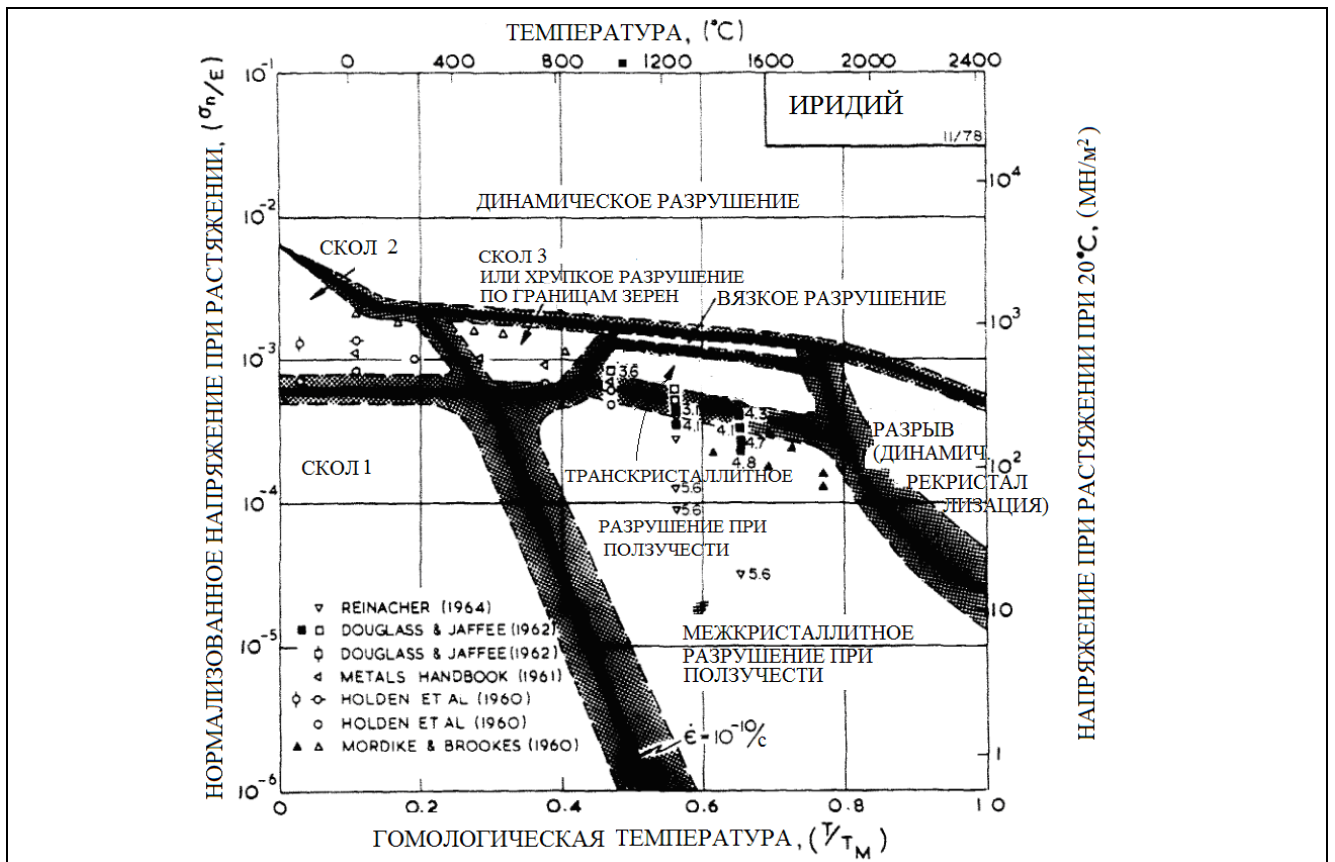


Рис.27. Карта механизмов разрушения иридия (Ссылки по порядку [205, 206, 4, 207, 208]).

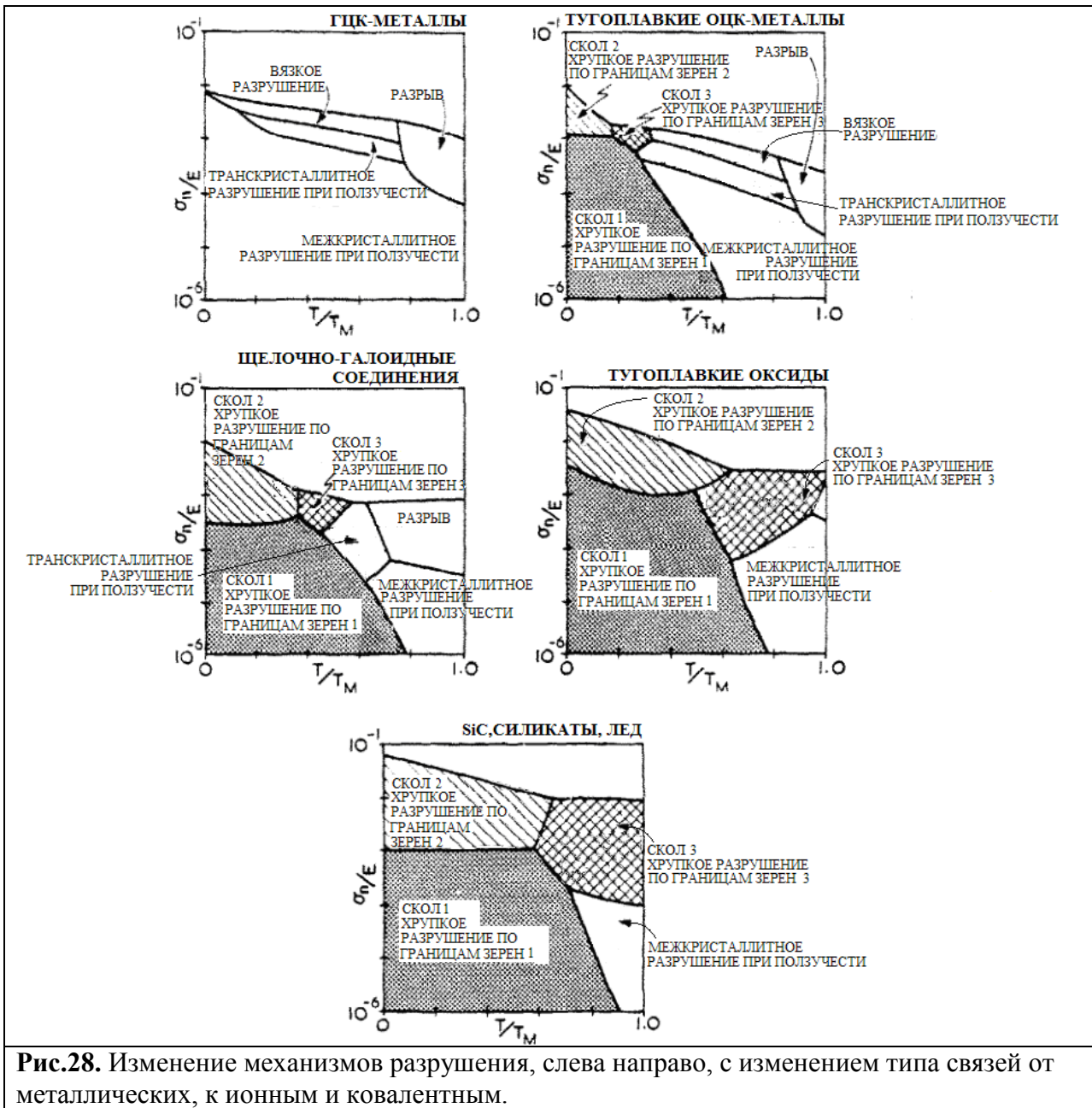


Рис.28. Изменение механизмов разрушения, слева направо, с изменением типа связей от металлических, к ионным и ковалентным.

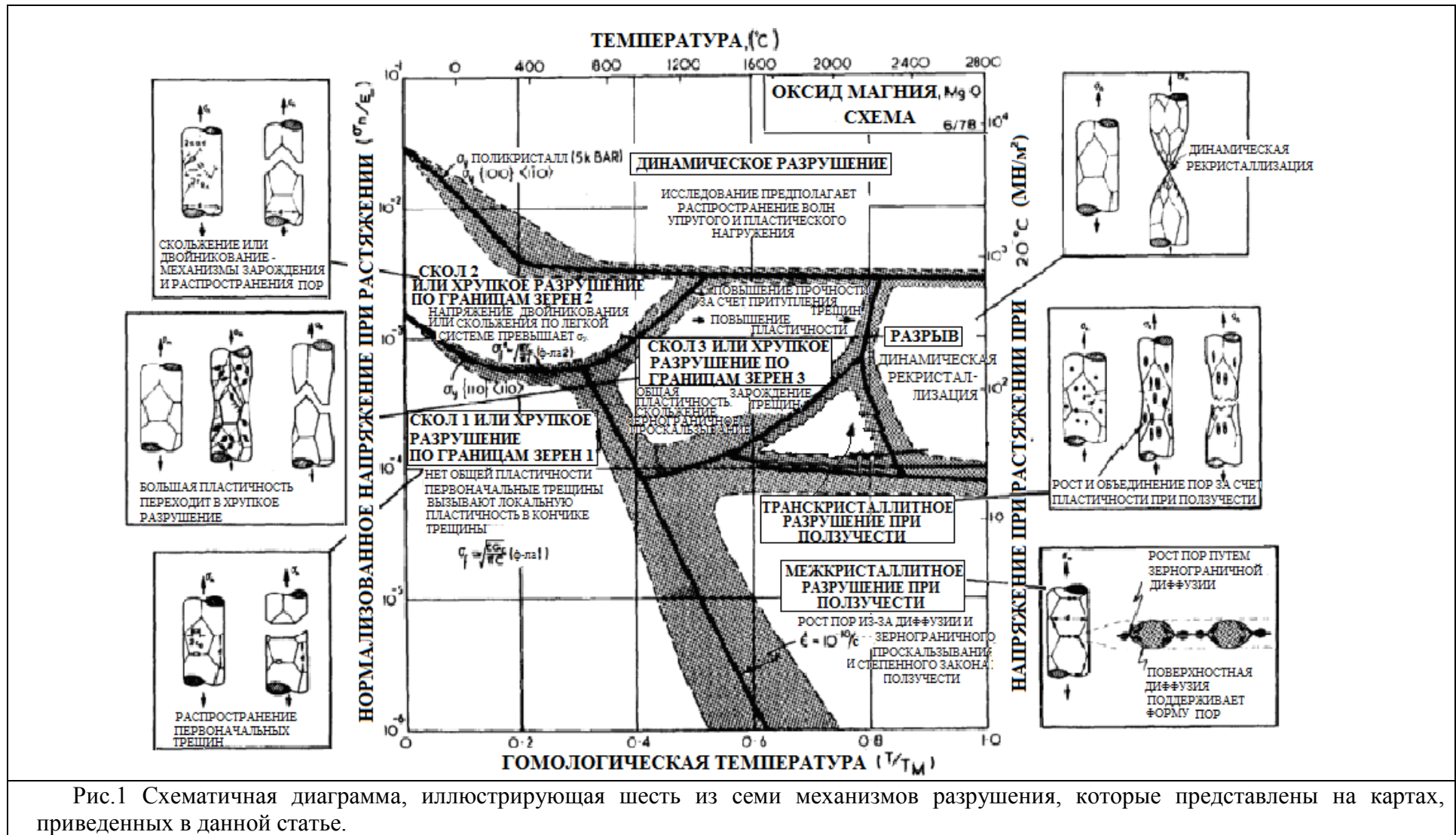


Рис.1 Схематичная диаграмма, иллюстрирующая шесть из семи механизмов разрушения, которые представлены на картах, приведенных в данной статье.

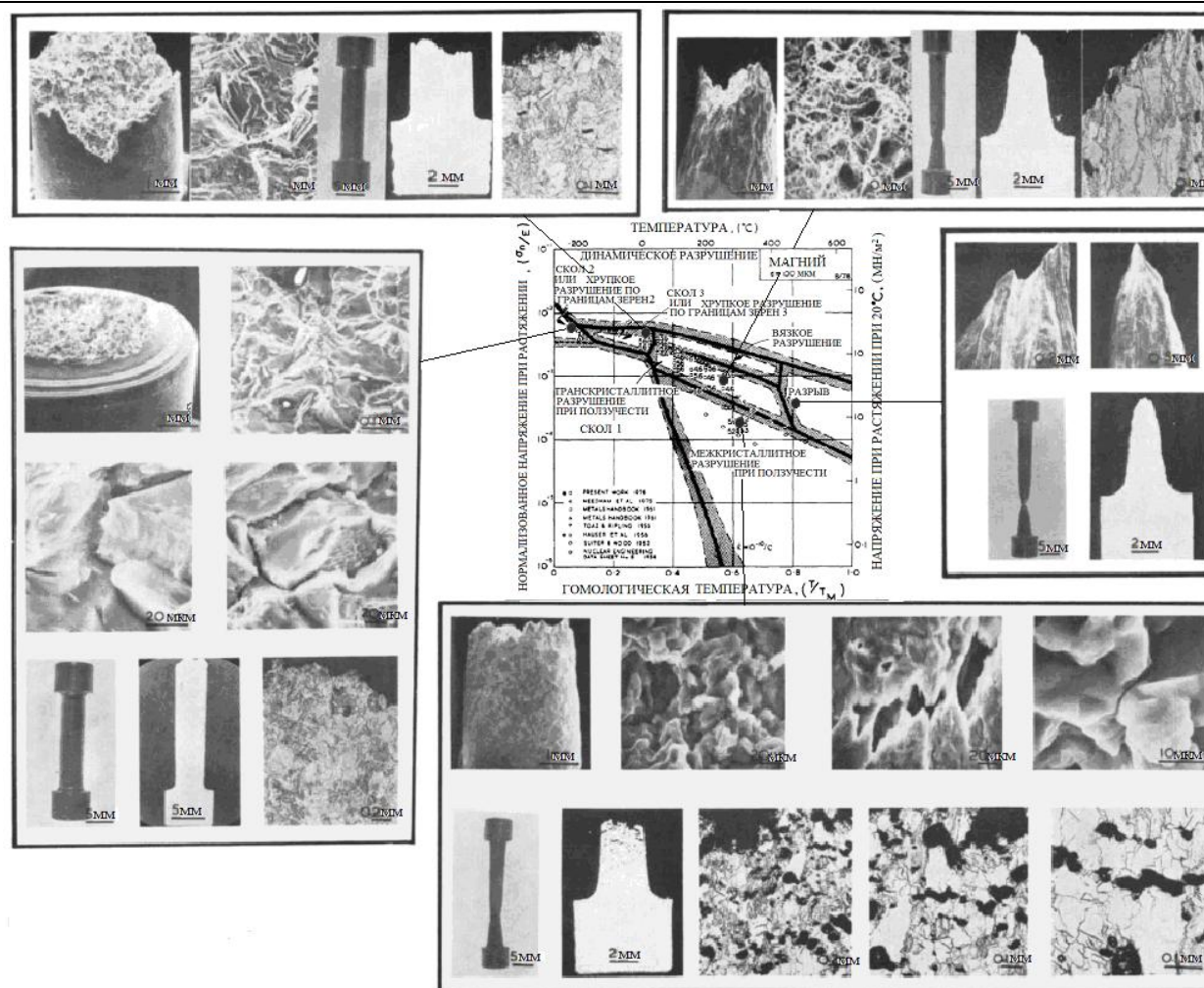


Рис. 9 Микрофотографии, выполненные на оптическом и электронном микроскопах, характеризующие пять областей на карте механизмов разрушения магния.

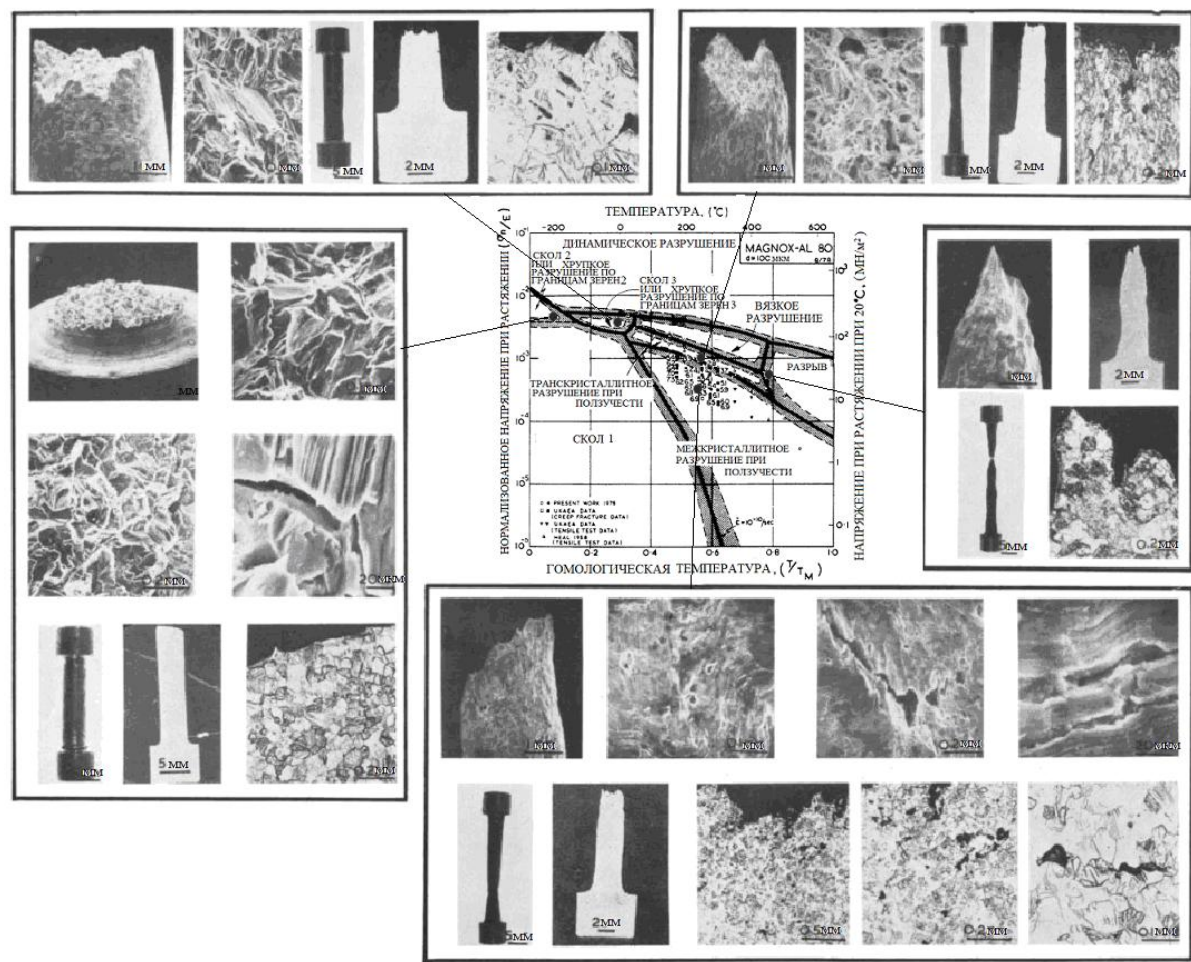


Рис. 11 Микрофотографии, выполненные на оптическом и электронном микроскопах, характеризующие пять областей на карте механизмов разрушения Magnox-AL80

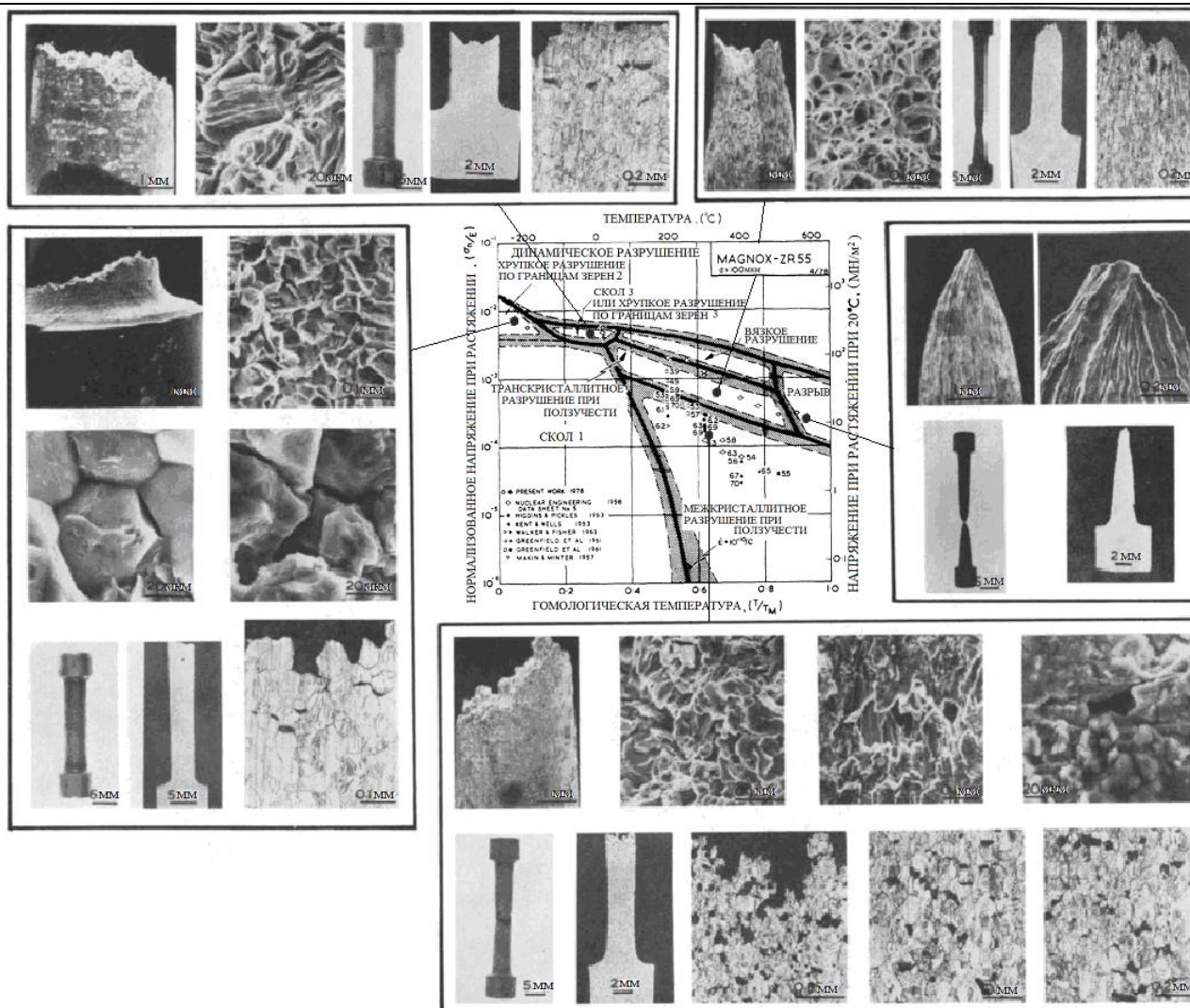


Рис. 13 Микрофотографии, выполненные на оптическом и электронном микроскопах, характеризующие пять областей на карте механизмов разрушения Magnox-ZR55

Табл. 1 Нормализующие параметры для ОЦК- и ГПУ-металлов и сплавов				
Материал	T_M (К)	Источник	Модуль Юнга ($\text{МН} \cdot \text{м}^{-2}$)	Источник
Вольфрам	3683	[4]	$E = 4.16 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.04 \times 10^{-4}]$	[6], [7]
Молибден	2883	[4]	$E = 3.48 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.50 \times 10^{-4}]$	[8]
Тантал	3271	[4]	$E = 1.59 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.35 \times 10^{-4}]$	[9], [7]
Ниобий	2741	[4]	$E = 1.15 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.56 \times 10^{-4}]$	[9], [8]
Хром	2148	[4]	$E = 3.28 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 2.30 \times 10^{-4}]$	[11]
Магний	923	[4]	$E = 4.52 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 4.4 \times 10^{-4}]$	[4]
Магнох-AL80	920	[5]	$E = 4.52 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 4.4 \times 10^{-4}]$	см. Mg [4]
Магнох-ZR55	923	см. Mg		
Бериллий	1588	[4]	$E = 3.04 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 3.14 \times 10^{-4}]$	[12]
Рений	3453	[4]	$E = 4.60 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.01 \times 10^{-4}]$	[13]

Табл. 2 Нормализующие параметры для керамик				
Материал	T_M (К)	Источник	Модуль Юнга ($\text{МН} \cdot \text{м}^{-2}$)	Источник
NaCl	1073	[101]	$E = 3.94 \times 10^4 [1 - (T - 300) \times 6.8 \times 10^{-4}]$	[105]
KCl	1063	[101]	$E = 2.44 \times 10^4 [1 - (T - 300) \times 6.1 \times 10^{-4}]$	[106]
LiF	1143	[101]	$E = 1.19 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 7.02 \times 10^{-4}]$	[105]
CaF ₂	1691	[101]	$E = 1.12 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 2.9 \times 10^{-4}]$	[106]
MgO	3073	[101]	$E = 2.50 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 2.06 \times 10^{-4}]$	[104]
Al ₂ O ₃	2323	[101]	$E = 3.89 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.6 \times 10^{-4}]$	[107]
UO ₂	3151	[102]	$E = 1.93 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 4.24 \times 10^{-4}]$	[104]
BeO	2701	[103]	$E = 3.80 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 1.85 \times 10^{-4}]$	[108]
SiC	3110	[104]	$E = 4.50 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 7.3 \times 10^{-4}]$	[104]
Si ₃ N ₄	2173	[104]	$E = 3.14 \times 10^5 [1 - (T - 300) \times 5.0 \times 10^{-4}]$	[104]
H ₂ O	273	[101]	$E = 7.66 \times 10^3 [1 - (T - 300) \times 9.89 \times 10^{-4}]$	[109]

Таблица 3. Системы скольжения и плоскости скола для керамики

Материал	Кристаллическая структура	Первичная система скольжения (низкие температуры)		Вторичная система скольжения (высокие температуры)		Плоскость раскола	Источник
NaCl	Кубическая каменная соль	$\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	2	$\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	2	(001)	[110]
KCl				$\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	3		[111]
LiF							
CaF ₂	Флюорит	$\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	3	$\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	2	(111)	[112] [111]
MgO	Кубическая каменная соль (NaCl)	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2	$\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	3	(001)	[110]
				$\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	2		[111]
Al ₂ O ₃	Гексагональная (Fe ₂ O ₃)	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2	$\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$	2	(0001)	[113]
				$\{1\bar{1}02\} \langle \bar{1}101 \rangle$	3		[114]
BeO	Гексагональная (W)	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2	$\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2	(0001) (10 $\bar{1}0$)	[115]
				$\{10\bar{1}0\} \langle 0001 \rangle$	2		[116]
UO ₂	Флюорит (CaF ₂)	$\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	3	$\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$	2	(111)	[111]
SiC	α Гексагональная	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2	$\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$	2	(0001)	[117]
	β Кубическая			- -		-	
Si ₃ N ₄	α Гексагональная	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$		$\{11\bar{2}0\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$	2	(0001)	[117]
	β Гексагональная	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{1\bar{1}02\} \langle \bar{1}101 \rangle$	3			
			$\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2			
H ₂ O (лед)	Гексагональная	$(0001) \langle 11\bar{2}0 \rangle$		$\{10\bar{1}0\} \langle 0001 \rangle$	2		[119]

Таблица 4. Критерии раскола.

Материал	G (ГН·м ⁻²)	K (ГН·м ⁻²)	Ω ($\times 10^{-29}$ м ²)	γ (Дж·м ⁻²)	T_M (К)	σ_y^0 (ГН·м ⁻²)	Критерий 1 G/K	Критерий 2 $G\Omega^{1/3}/\gamma$	Критерий 3 $\sigma_y^0\Omega/kT_M$	Критерий 4 σ_y^0/K ($\times 10^{-4}$)
ГЦК-металлы										
Pb	10	47	3.0	0.6	600	0.07	0.21	5.2	0.25	0.15
Ag	30	104	1.7	1.6	1234	0.3	0.29	4.8	0.3	0.29
Cu	45	141	1.2	2.2	1356	0.4	0.32	4.7	0.25	0.28
Al	27	82	1.7	1.1	933	0.25	0.33	6.3	0.33	0.3
Ni	86	180	1.1	2.5	1726	0.73	0.48	7.7	0.34	0.41
Ir	220	360	1.4	3.6	2716	3.6	0.61	15	1.4	1.0
ОЦК-металлы										
Fe	79	160	1.2	2.7	1810	1.1	0.49	6.7	0.52	0.69
Nb	39	168	1.8	3.2	2741	1.4	0.23	3.2	0.67	0.83
Ta	70	192	1.8	3.4	3271	1.5	0.36	5.4	0.61	0.78
Mo	126	265	1.5	2.9	2883	1.4	0.48	10.7	0.53	0.53
W	160	305	1.6	4.2	3683	3.8	0.52	9.6	1.2	1.3
Cr	120	160	1.2	2.9	2148	2.0	0.75	9.5	0.8	1.3
ГПУ-металлы										
Mg	18	36	2.3	—	923	0.69	0.5	—	1.3	1.9
Be	150	116	0.8	0.9	1588	2.6	1.29	33	0.96	2.2
Re	186	363	1.5	—	3453	3.4	0.51	—	1.0	0.94
Щелочно-галогидные соединения										
NaCl	15	25	4.5	0.28	1073	0.47	0.6	19	1.4	1.9
KCl	10	19	6.3	0.16	1063	0.36	0.53	25	1.5	1.9
LiF	49	68	1.6	0.34	1143	3.0	0.72	36	3.1	4.4
CaF ₂	42	91	—	—	1691	2.1	0.46	—	—	2.3
Оксиды										
MgO	129	154	1.9	1.2	3073	7.5	0.84	29	3.4	4.9
Al ₂ O ₃	160	247	1.4	1.0	2323	13.5	0.65	39	5.9	5.5
BeO	163	236	1.4	—	2701	6.1	0.69	—	2.3	2.6
UO ₂	85	212	4.1	—	3151	3.6	0.40	—	3.4	1.7
Материалы с ковалентными и водородными связями										
SiC	192	227	1.04	—	3110	18	0.85	—	4.4	7.9
Si ₃ N ₄	122	194	—	—	2173	10	0.63	—	—	5.2
H ₂ O	3.5	8.5	3.3	0.1	273	0.55	0.41	11	4.7	6.5
Ge	55	75	2.3	—	1210	5.5	0.73	—	7.6	7.3
Si	67	99	2.0	—	1683	7.8	0.68	—	6.7	7.9