

УДК 621.539.43.001.24

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН (часть 4)**

**Основные типы микроструктурных деформационных рельефов,
образующихся в конструкционных материалах при циклическом
нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения**

©Александр Никитович Романов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

alrom37@mail.ru

***Аннотация.** Приводятся результаты микроструктурного исследования деформационных процессов, протекающих в металлических материалах при переменных нагрузках в условиях высоких температур*

Теоретическому и экспериментальному исследованию вопросов несущей способности деталей и конструкций, работающих в условиях и высоких температур, в последнее время уделяется очень большое внимание [1-14]. Однако, как указывалось выше, вследствие значительных методических трудностей, связанных с проведением высокотемпературных усталостных испытаний, а также из-за отсутствия специальной аппаратуры до сих пор имеется весьма ограниченное число работ, посвященных микроструктурному исследованию деформационных процессов, протекающих в металлических материалах в указанных условиях нагружения. Известно, что повышение температуры испытания вызывает снижение усталостной прочности металлических материалов, применяемых в различных отраслях машиностроения. При этом механизм разрушения, действующий при нагреве, в значительной мере отличается от механизма, развивающегося при комнатных температурах.

При определенных режимах теплового и механического нагружений разрушение металлических поликристаллических материалов может протекать по границам зерен.

Проведенные нами исследования микроструктурных особенностей высокотемпературного усталостного разрушения однофазного материала (железа) показали, что при изотермической выдержке в интервале температур свыше 500⁰С для железа характерно интеркристаллитное разрушение.

Высокие температуры были приняты с целью более отчетливого проявления температурных эффектов.

Ранее были представлены результаты исследования микроструктурных особенностей развития деформаций в интервале температур транскристаллитного разрушения [3].

Проведены исследования микроструктурных особенностей высокотемпературного усталостного разрушения однофазного материала в условиях интеркристаллитного усталостного разрушения.

На рис.1 представлена серия микрофотографий, снятых с одного и того же участка поверхности образца на различных этапах испытания при 800⁰С. Образовавшиеся у основания надреза по границам зерен мелкие микротрещины при увеличении числа циклов нагружения приобретают более резкое очертание. Увеличение продолжительности испытания вызывает появление в некоторых зернах второй системы скольжения. При этом продолжают появляться микротрещины на границах других зерен, находящихся на большем расстоянии от основания надреза.

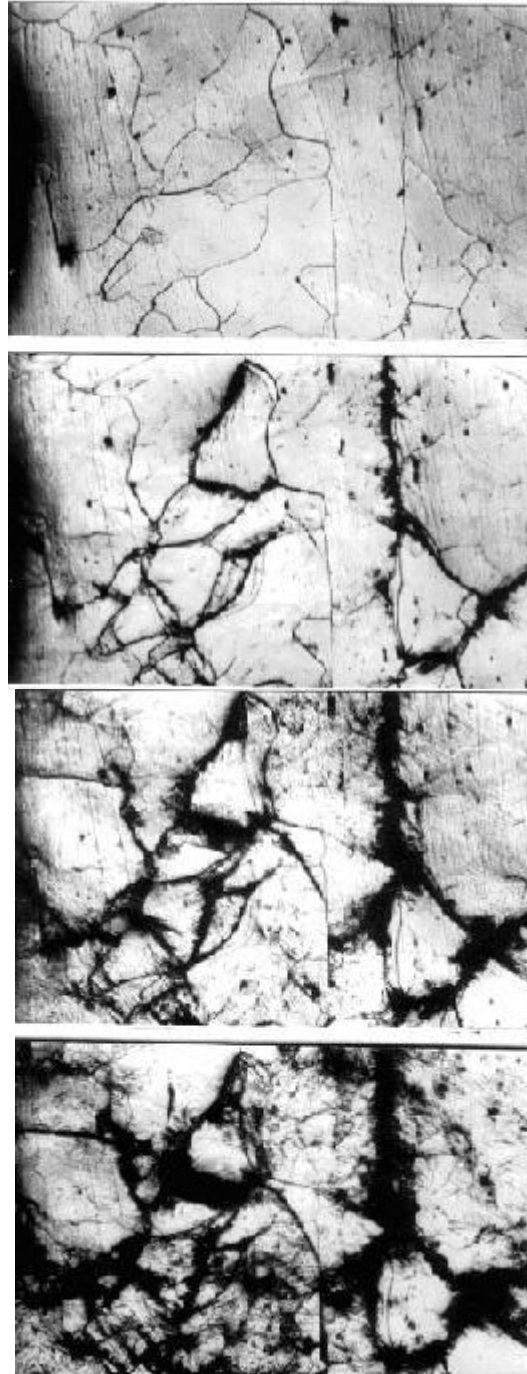
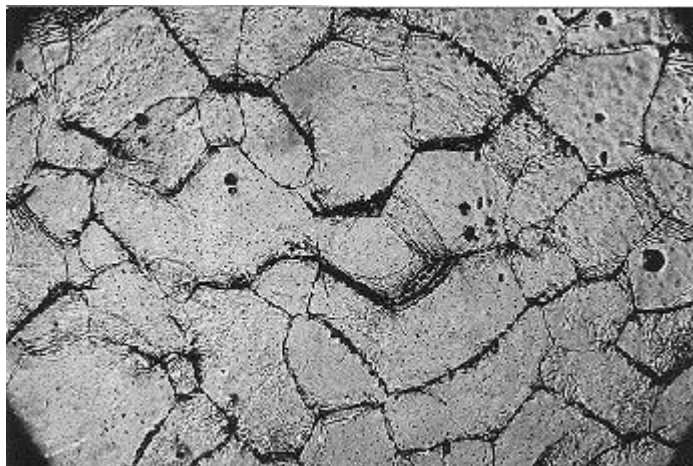


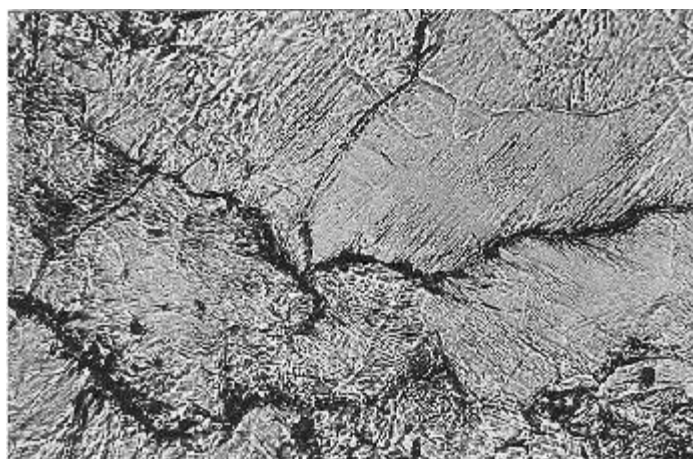
Рис.1. Развитие трещины усталости от надреза образца при высокой температуре (800⁰С).

Увеличение продолжительности испытания вызывает появление в некоторых зернах второй системы скольжения. При этом продолжают появляться микротрещины на границах других зерен, находящихся на большем расстоянии от основания надреза.

В условиях высоких температур наблюдается развитая сеть микротрещин по границам зерен и в приграничных зонах (рис. 2,а), а также активизируется деформация в теле зерен (рис. 2,б).



а)



б)

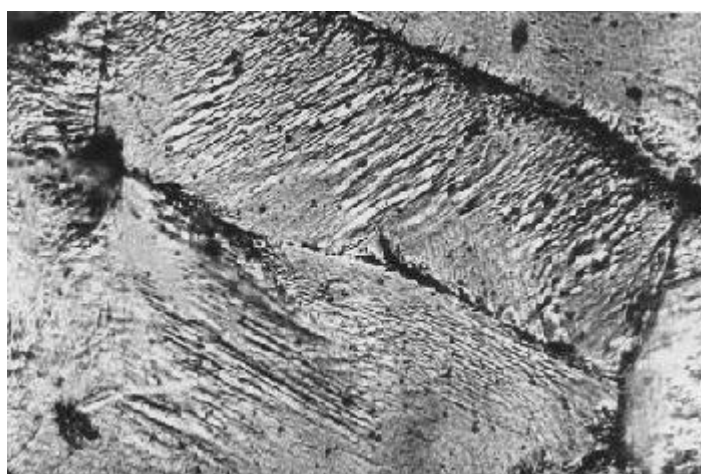
Рис.2. Развитие деформационных процессов и повреждаемости при высоких температурах при циклическом нагружении.

Микроструктурные исследования образцов технического железа при испытании в интервале температур интеркристаллитного разрушения показали, что увеличение температуры испытания приводит к активизации деформационных процессов на границах и в приграничных участках зерен.

Из показанной на рис.3,а микрофотографии видно, что в приграничных участках зерен образца после $1,8 \cdot 10^5$ циклов переменной нагрузки при 500°C протекают сложные деформационные процессы, связанные с образованием неоднородных полос скольжения.



а)



б)

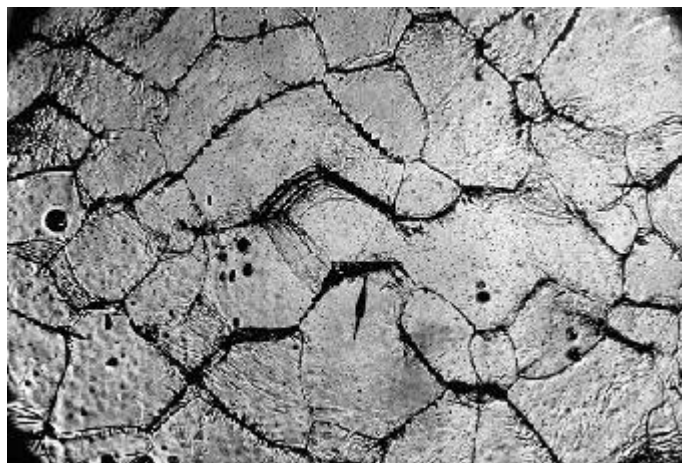
Рис.3. Развитие деформационных процессов в приграничных участках зерен образцов технического железа:
а – после $1,8 \cdot 10^5$ циклов при $T = 500^\circ\text{C}$,
б – после $7,7 \cdot 10^6$ циклов при $T = 600^\circ\text{C}$, (x 1200).

При этом в теле зерен наблюдается равномерная деформация с образованием слабо различимых в световом микроскопе возникших неровностей на поверхности. Направление деформационного микрорельефа, развившееся в одном зерне и отмеченное стрелками на рис.3, зависит от кристаллографической ориентации сопрягающихся зерен. Образующиеся в приграничных участках полосы скольжения не совпадают с направлением выпуклостей на приграничных зонах, а пересекают их под некоторым (как правило, небольшим) углом

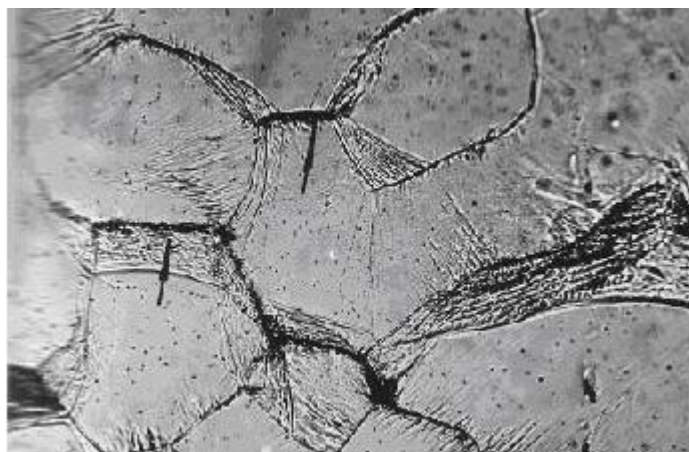
Увеличение продолжительности испытания вызывает увеличение числа выпуклостей в зоне границ. На рис.3,б показана микроструктура поверхности образца технического железа после $7,7 \cdot 10^6$ циклов нагружения при 500°C .

Вследствие увеличения пластичности материала с повышением температуры испытания выступы достигают значительных размеров без нарушения их сплошности.

Повышение температуры до 800°C уже после $8,45 \cdot 10^3$ циклов переменной нагрузки сопровождается сильной деформацией приграничных участков зерен с образованием трещин по границам (рис.4,а).



а) (x 250)



б) (x 500)

Рис.4. Микрофотографии, полученные с образца технического железа после $4,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения при 800°C .

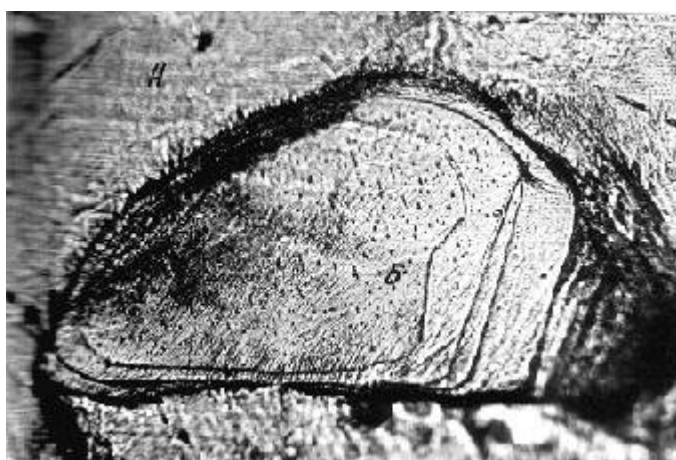
При этом наибольшую деформацию с раскрытием трещин претерпевают границы, направления которых совпадает с направлением максимальной деформации (перпендикулярно действию прикладываемых к образцу напряжений) или находятся под небольшим углом к нему. Границы, совпадающие с направлением действующей на образец нагрузки, деформируются в меньшей степени (например, границы, отмеченные стрелками на рис.4). В процессе высокотемпературного нагрева в вакууме выше 500°C и действия циклического нагружения на предварительно полированной поверхности образцов технического железа возникает рельеф в виде сетки границ зерен. Так как границы зерен являются областями с неупорядоченным расположением атомов, то свободная энергия поликристаллического металла больше свободной энергии монокристалла того же объема.

Следовательно, в образце имеется стремление к минимуму свободной энергии (предполагается отсутствие у образца напряжений и деформаций), что должно приводить к уменьшению свободной энергии границ зерен, т.е. к уменьшению протяженности границ.

На рис.5 и рис.6 представлены микрофотографии, снятые с поверхности образцов технического железа, прошедших испытание при изотермической выдержке при 700 и 800°C .



а)



б)

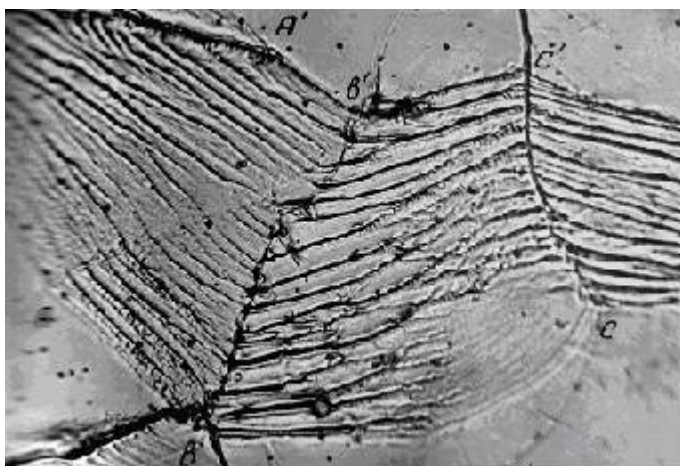
Рис.5. Собирательная рекристаллизация, наблюдавшаяся на поверхности образцов технического железа в процессе циклического нагружения при 700°C после $5,7 \cdot 10^3$ циклов

После $5,7 \cdot 10^3$ циклов нагрузки при 700°C (рис.5,а) на поверхности образца наблюдалось скачкообразное перемещение границы; граница из положения А переместилась в положение Б. На месте исходной границы А после ее миграции в результате собирательной рекристаллизации остается след, очерчиваемый рядом четко видимых ямок (пор). В промежутке между исходным и конечным положениями границы остаются следы ее промежуточного положения (в виде зон с выступами и впадинами). Расстояние между следами отдельных «скачков» границы составляет величину около $2,5\text{--}3\text{ мкм}$. Аналогичная картина наблюдалась в процессе испытания при 800°C . При этом процесс рекристаллизации протекал активнее, о чем свидетельствует увеличенное расстояние между положениями перемещающейся границы.

Следует обратить внимание на то, что граница зерен в начальный момент циклического нагружения мигрировала сравнительно плавно, лишь на непродолжительное время, задерживаясь в отдельных положениях (например, отмеченных стрелками на рис.6,а).



а)



б)

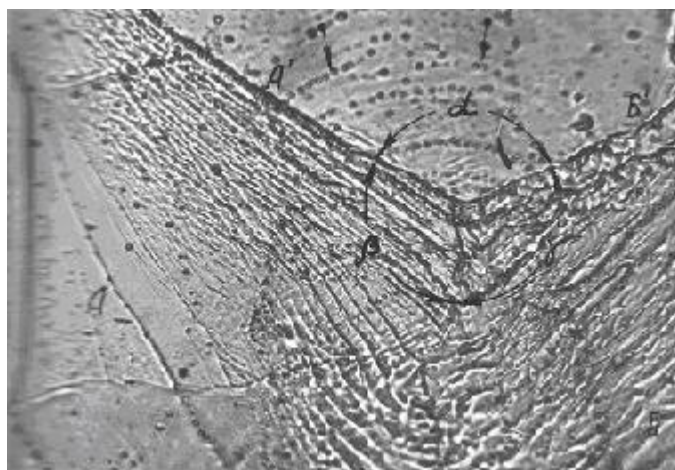
Рис.6. Миграция границ зерен образцов технического железа в процессе испытания на усталость:
а – после $5,7 \cdot 10^3$ циклов при 700°C ,
б – после $8,45 \cdot 10^3$ циклов при 800°C (x 1200).

Начиная с некоторого момента в процессе испытания образца, граница перемещается скачкообразно. По-видимому, для ее перехода из одного положения в другое необходимо вполне определенное количество энергии (тепловой и механической). На границе, некоторое время находящейся в стационарном положении (между очередными «скачками»), накапливается энергия и при достижении значения, достаточного для ее передвижения, происходит смещение в новое положение. Это перемещение всегда совершается в сторону увеличения радиуса кривизны границы (проявляется стремление границы к прямой линии). Это отчетливо видно на микрофотографии, показанной на рис.6,б, снятой с образца, прошедшего $8,45 \cdot 10^3$ циклов переменной нагрузки при 800°C .

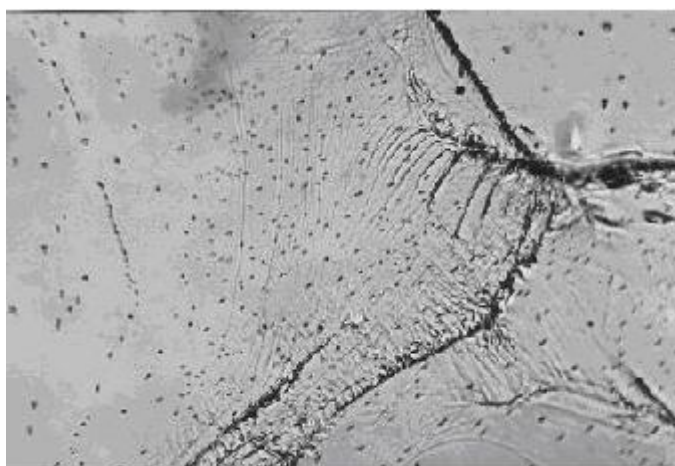
Длина исходной границы АВС после испытания в указанном режиме испытания значительно сократила свою протяженность (приблизительно на 10%), переместившись в положение А'В'С'.

Особенно интенсивно процесс собирательной рекристаллизации протекает в зоне «тройных» точек, когда наблюдается неравенство контактных углов у трех сопрягающихся зерен. В этих случаях миграция границ зерен приводит к выравниванию контактных углов и приближению их к равновесной величине, равной 120° .

В качестве примера на рис.7 показаны микрофотографии, снятые с поверхности образцов технического железа, прошедших $5,7 \cdot 10^3$ и $8,45 \cdot 10^3$ циклов знакопеременной нагрузки при 700°C и 800°C соответственно.



а)



б)

Рис.7. Развитие собирательной рекристаллизации в «тройных» точках образцов технического железа:

а – после $5,7 \cdot 10^3$ циклов нагружения при 700°C ,

б – после $8,45 \cdot 10^3$ циклов нагружения при 800°C (x 1200).

Граница АБ (рис.7,а), переместившаяся в положение А'В' в зоне тройной точки С, заняла равновесное положение. При этом углы α , β и γ оказались приблизительно равными 122 , 119 и 119° соответственно. Аналогичная картина наблюдается и при испытании в изотермических условиях при 800°C и циклическом нагружении в вакууме (рис.7,б).

Стремление границ в положение «равных углов» может быть объяснено представлениями об энергии поверхностного натяжения в тройных точках [116]:

$$\frac{T_{AB}}{\sin \gamma} = \frac{T_{BV}}{\sin \alpha} = \frac{T_{VA}}{\sin \beta},$$

где T_{AB} , T_{BV} и T_{VA} – силы поверхностного натяжения между зернами А и Б, В и С, В и Д; α , β , γ – углы между их границами.

В отожженных образцах, когда наблюдается неравенство углов α , β и γ , изотермическая выдержка при температурах 500-800⁰С не вызывает перемещения границ за промежуток времени в несколько минут. Сообщаемая при этом образцу энергия оказывается недостаточной для перемещения неравновесной тройной точки, возникшей под влиянием определенных условий кристаллизации металла. Приложение к образцу механической энергии в виде знакопеременных колебаний сообщает ему дополнительную энергию. При достижении суммарной энергией (сообщаемой образцу путем высокотемпературного нагрева до указанных температур и механическим нагружением на переменный изгиб) значения, равного энергии активации перемещения границы или тройной точки, происходит их миграция в новое положение, в котором они обладают меньшей величиной свободной энергии.

При рассмотрении рис.7,а, следует обратить внимание на особенность миграции границ, оказывающуюся в том, что в зоне перемещения происходит «накапливание» ямок, выстраивающихся по определенным направлениям (например, показанным на рис.7,а стрелками с черным кружком). Образование такого рода ямок следует связывать, по-видимому, с возникновением пор у границ зерен вследствие диффузии вакансий и их скопления в колонии. Указанные ямки как бы очерчивают при перемещении границы ее новые положения, а при миграции в процессе дальнейшего нагружения на месте переместившейся границы остается как бы «пунктирный» след.

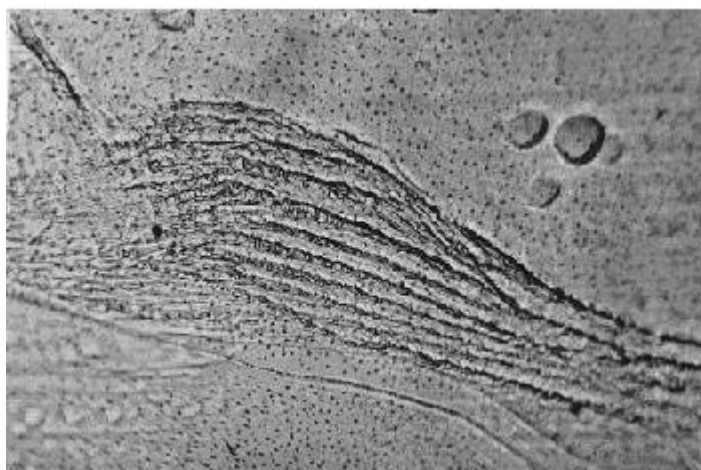
Изотермическая высокотемпературная выдержка образцов в вакууме в интервале интеркристаллитного разрушения сопровождается избирательным испарением материала в зонах выхода несовершенств кристаллической решетки на поверхность. При такого рода опытах температура испытания должна быть выше 0,5 $T_{пл}$ материала образца.

На микрофотографиях (рис.8), полученных с образца, прошедшего 5,7·10³ циклов нагружения при 700⁰С, видны в зернах выявившиеся в процессе испытания ямки травления, сравнительно равномерно расположенные по всему телу.

Проведенный нами подсчет по данным микрофотографиям количества ямок на единицу площади образца показал, что оно составляет величину около 10⁷ 1/см².

Наряду с дефектами, выявленными в виде точек, часто в одном и том же зерне можно наблюдать зоны выхода дефектов в виде коротких штрихов, имеющих в каждом отдельном зерне определенную ориентацию (как показано, например, стрелками на рис.8,б). В ряде случаев в некоторых зернах выявляются только «штрихообразные» короткие линии.

На рис.9 представлены микрофотографии, снятые с образца, подвергнутого 8,45·10³ циклов переменной нагрузки при 800⁰С. Стрелками с крестиком и белым кружком на рис.9,а отмечены зоны выхода дефектов, имеющие вид прямых коротких линий, различно ориентированных в зернах I и II. Выявившиеся дефекты на месте исходной границы неизменно ориентируются по ней на всей ее длине. Подобного рода дефекты показаны на рис.9,б. Если в зернах А и Б наблюдаются дефекты, выходящие на поверхность образца в виде коротких линий, то в зерне В они выявились в виде отдельных точек, часть которых выстраивается по прямым линиям (например, отмеченных стрелками), являющимися следами ранее существовавших положений границы.



а)



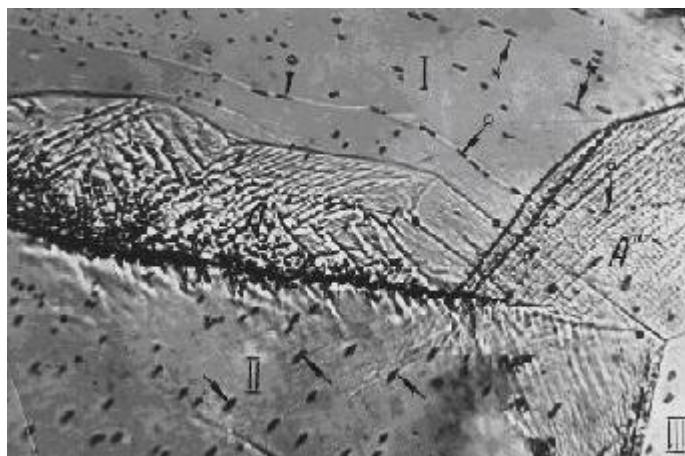
б)

Рис.8. Возникновение ямок травления на поверхности образцов технического железа в процессе испытания на усталость при 700°C после $5,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения (x 1200).

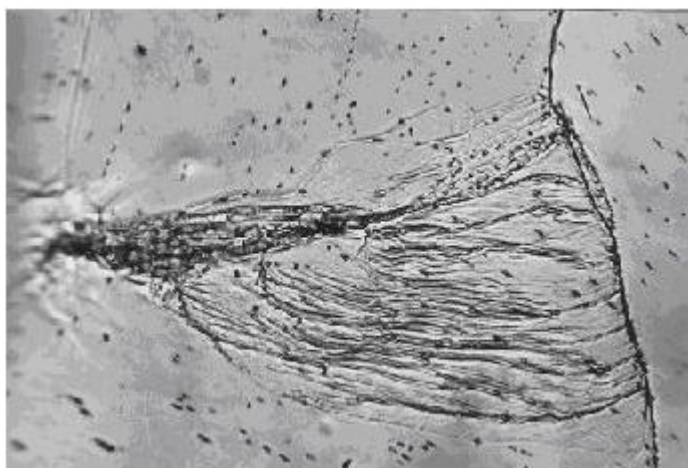
В ряде случаев на поверхности образцов, испытанных на усталость при высоких температурах, можно наблюдать скопление дефектов в виде отдельных групп, в которых насчитывается 5-10 ямок травления. На микрофотографии, представленной на рис.10, показаны такого рода скопления дефектов. Этот микрорельеф на поверхности образца технического железа был выявлен путем изотермической выдержки при 700°C в вакууме и нагружении по схеме знакопеременного симметричного изгиба после $5,7 \cdot 10^3$ циклов. При этом выявились также и отдельно расположенные ямки травления.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что выявляемые избирательными испарениями ямки травления при одних и тех же условиях испытания имеют не одинаковый размер. Микрофотографии, показанные на рис.8 и 10, сняты с одного и того же образца, и при одном и том же увеличении. Однако в первом случае ямки имеют значительно меньший размер, чем во втором. Это обстоятельство объясняется, по-видимому, либо различной ориентацией зерен, либо разными типами и количеством дефектов, выходящих на

поверхности в этих участках. Во всяком случае, обнаруженные особенности наблюдаемых выходов дефектов заслуживают специального изучения.



а)



б)

Рис.9. Микрофотографии, полученные с поверхности образцов технического железа, испытанного при 800⁰С после $8,45 \cdot 10^3$ циклов (х 1200).

Наряду с интенсивным протеканием деформационных процессов на границах зерен, при циклическом нагружении наблюдается значительная деформация, развивающаяся в теле зерен.

На рис.11 показана микрофотография, иллюстрирующая развитие деформационных процессов в теле зерен после $8,45 \cdot 10^3$ циклов нагружения при выдержке с нагревом на 800⁰С в вакууме. В отдельных зернах полосы скольжения, совпадающие с направлением максимальной деформации в образце, имеют зигзагообразный вид (например, в зерне А). Такой характер протекания деформации может быть связан с развитием поперечного скольжения в данном зерне при неизменном направлении деформации. В случае благоприятной ориентации зерен к направлению действия внешних напряжений, как и при испытании в интервале температур транскристаллитного разрушения, полосы скольжения имеют вид прямых полос, а деформационные процессы в них характеризуются

неизменностью элементов скольжения – плоскости и направления (например, в зерне Б на рис.11).

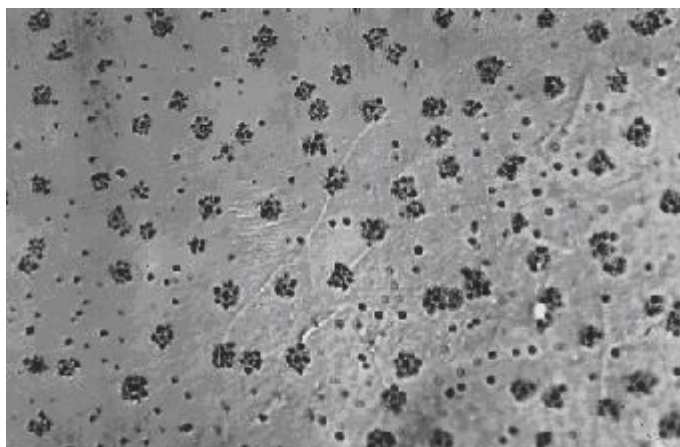


Рис.10. Ямки травления на поверхности образцов технического железа, прошедшего $5,7 \cdot 10^3$ циклов переменной нагрузки при 700°C (x 1200).

Испытания на усталость при температуре 1000°C показали, что в образцах железа, находящегося в γ -состоянии, уже после первых циклов нагружения, интенсивно развиваются сложные деформационные процессы, сопровождающиеся сильным дроблением зерен.

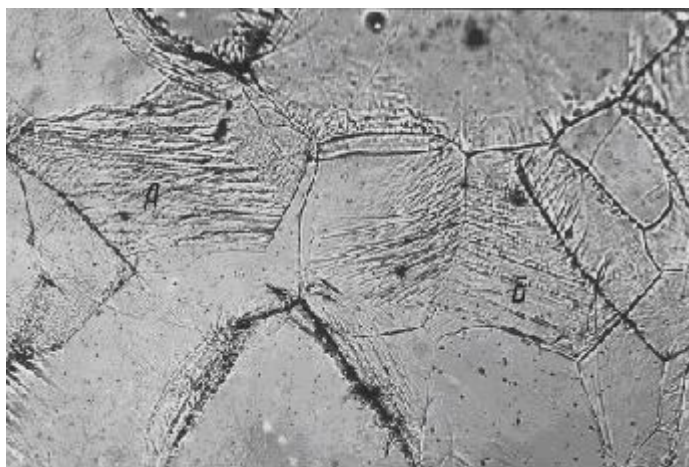
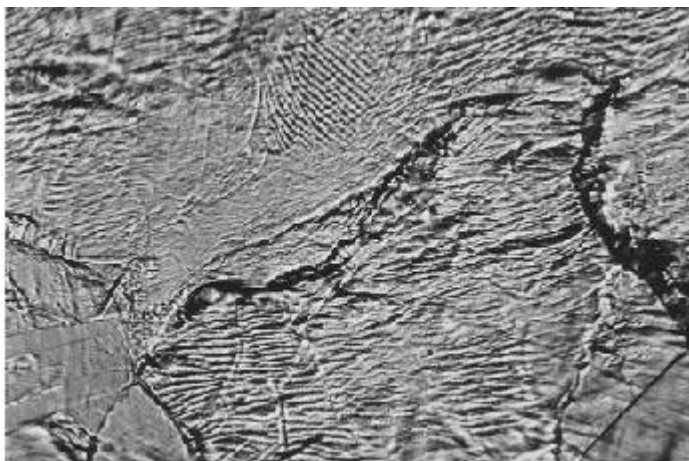
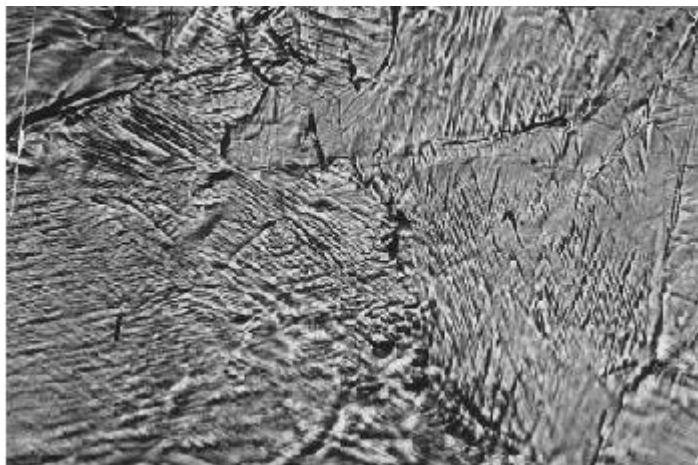


Рис.11. Образование следов скольжения в теле зерен образца технического железа, прошедшего $8,45 \cdot 10^6$ циклов переменной нагрузки при 800°C (x 500).

Микрофотографии, снятые с поверхности образцов (когда железо уже находилось в α -модификации), показывают (рис.12), что в теле зерен протекает сравнительно равномерная деформация. Однако, она отличается исключительной неоднородностью, и следы скольжения в отдельном зерне могут иметь различную ориентацию (как, например, показано на рис.12,а). Лишь в некоторых зернах (например, в зерне I на рис.12,б) процесс скольжения развивается по определенным плоскостям. Образующиеся в процессе испытания при 1000°C полосы скольжения вследствие большой вязкости материала при данной температуре имеют вид коротких и широких «морщин».



а)



б)

Рис.12. Микрофотографии поверхности образца технического железа, прошедшего $3 \cdot 10^3$ циклов переменной нагрузки при 1000°C (x 1200).

Следует подчеркнуть, что испытание на усталость образцов технического железа в γ -состоянии, хотя и сопровождается сильной деформацией тела зерен, однако, разрушение происходит преимущественно по границам. Вследствие высокой пластичности железа в интервале температур, при которых оно находится в γ -фазе, раскрытие «морщин» путем нарушения в них сплошности материала не наблюдается.

Электронно-микроскопический анализ показал, что в процессе испытания на усталость при температуре 800°C в вакууме, когда преобладает интеркристаллитный тип разрушения, в теле зерен протекают процессы, вызывающие образование различных типов микрорельефов, иллюстрируемых на рис.13.

В некоторых, определенным образом ориентированных к направлению прикладываемых напряжений зерна образца, могут возникать деформационные рельефы, вид которых представлен на рис.13, а-г. Характер микрорельефа зависит не только от направления внешней нагрузки, но и от напряженного состояния материала, взаимного влияния соседних зерен и наличия в них макродефектов. В центре некоторых зерен наблюдается однородное скольжение с образованием тонких полос, располагающихся на

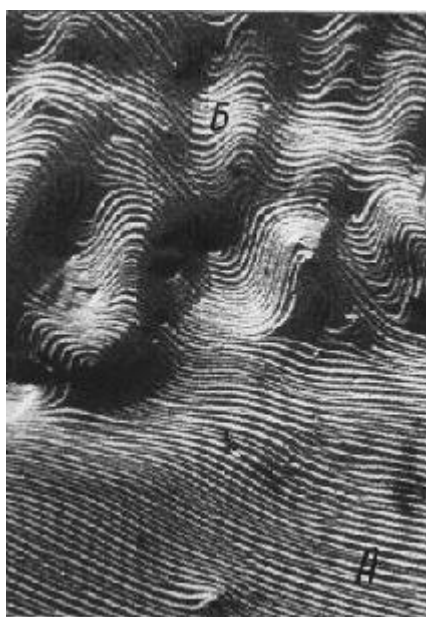
расстояниях от 0,1 до 0,5 мкм (примером такой структуры может служить показанная на рис.13,а).



а)



б)



в)



г)

Рис.13. Электронные микрофотографии, иллюстрирующие характер протекания тонкого скольжения в теле зерен образцетехнического железа после $4,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения при 800°C (x 11000).

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что некоторые рядом лежащие полосы тонкого однородного скольжения в некоторых участках (например, отмеченных стрелками на рис.13,а) сливаются друг с другом, образуя одну полосу скольжения, которая на некотором расстоянии может снова разветвиться на две самостоятельные. При приближении этих полос к границе зерна, где деформационные процессы активизируются в

результате скопления дефектов, интенсивно диффундирующих к границам под влиянием повышенной температуры, полосы скольжения существенно искривляются.

Присутствие в структуре материала различных примесей (металлических и неметаллических) приводит к искажению следов тонкого скольжения, выявляющихся на поверхности образцов в результате действия на них переменной нагрузки.

На рис.13,б показана электронная микрофотография, снятая с поверхности образца после $8,45 \cdot 10^3$ циклов переменной нагрузки при 800°C . Образование такого рода следов может быть связано с наличием в структуре технического железа (с 0,03% С и ряда других примесей) включений, а также карбидных частиц, в местах, отмеченных стрелками. Своеобразный «обход» включений полосами скольжения приводит к возникновению показанного на рис.13,б микрорельефа.

На рис.13,в представлена микрофотография поверхности образца, снятая с зерна, на котором в средней части (зона А) виден участок с прямолинейным характером расположения полос скольжения, принимающих в приграничной области (зона Б) извилистую форму.

В ряде случаев можно наблюдать в теле зерен неоднородное скольжение, обусловленное активизацией второй системы скольжения под воздействием высокотемпературного нагрева. Однако, возникновение неоднородного скольжения может происходить только в зернах, в которых вторая (неактивная) система благоприятно ориентирована к направлению действия прикладываемых напряжений. В этом случае отдельные микрообъемы материала совершают сложное перемещение в теле зерна и часто изменяют направление своего передвижения (например, такой характер строения имеется в участках, показанных стрелками на рис.13,г).

На рис.14 представлена серия электронных микрофотографий, снятых с приграничных участков зерен образца технического железа, испытанного на установке ИМАШ-10 при температуре 800°C в вакууме ($N = 4,5 \cdot 10^3$ циклов). На границах зерен и в приграничных участках протекают сложные деформационные процессы. Следует обратить внимание на изгиб полос тонкого скольжения в приграничных зонах, а также на образование волнистого микрорельефа в виде выступов и впадин, например, показанных стрелками на рис.14,а.

На микрофотографии (рис.14,б) видны три различные типа микрорельефов, возникших вследствие деформационных процессов, протекающих в участках возле границ трех сопрягающихся зерен А, Б и В. Такой характер образования микрорельефов обусловлен, по-видимому, различной ориентацией зерен по отношению к направлению действующей внешней нагрузки. Если в зерне А полосы скольжения имеют вид, аналогичный показанному на рис.14,а, то в зерне Б наблюдается неоднородное скольжение (аналогичное приведенному на рис.13,г).

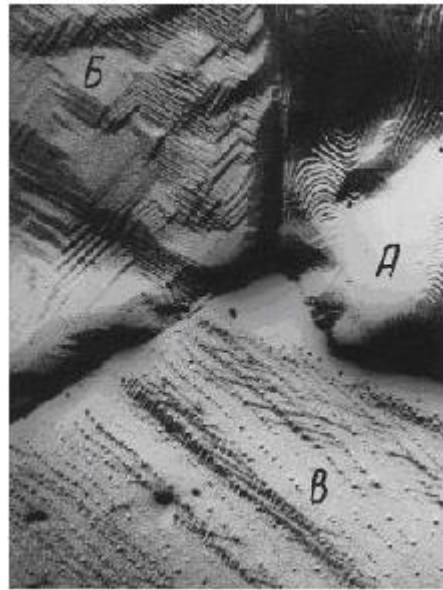
В зерне В видны контуры полос скольжения, на границах которых выявились в процессе испытания на усталость при нагреве имевшиеся и вновь образовавшиеся в этих зонах дефекты кристаллической решетки.

В результате протекания сложных деформационных процессов в зернах А, Б и В их граница сильно деформировалась, и в некоторых участках (показанных стрелками на рис.14,б) происходит смещение отдельных зон зерен.

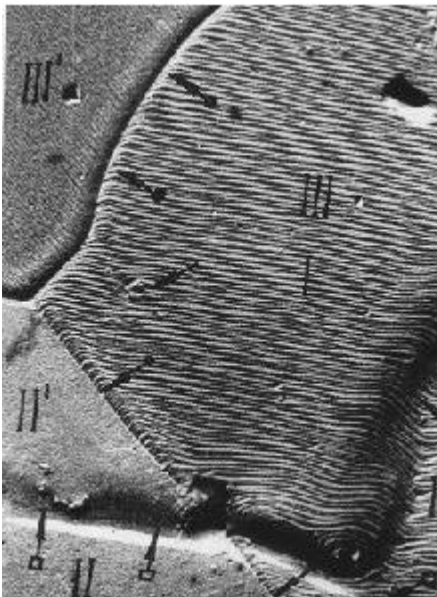
Выше мы отмечали при рассмотрении рис.6, что под влиянием воздействия напряжений, прикладываемых к образцам при проведении испытаний на усталость в условиях высокотемпературного нагрева в вакууме, развивается усиленная миграция границ зерен.



а)



б)



в)



г)

Рис.14. Электронные микрофотографии с приграничных участков зерен на поверхности образца технического железа после $4,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения при 800°C (x 11000).

На микрофотографии (рис.14,в) представлен снятый на электронном микроскопе участок поверхности образца железа, прошедшего испытание на усталость в указанном выше режиме. Стрелками с белыми кружками и квадратом на рис.14,в отмечены следы исходных границ зерен, а стрелками с черными кружками и квадратом показаны новые положения границ после их миграции в результате протекания собирательной рекристаллизации. В зоне

расположения старых границ имеются своеобразные «канавки», возникшие в результате избирательного испарения материала с этих участков.

В ряде участков возле границ зерен возникают отдельные ямки прямоугольной формы, являющиеся, по-видимому, зонами выхода дислокаций на поверхность материала.

Как указывалось ранее, на поверхности зерен технического железа в процессе испытания на усталость образуются дефекты либо «точечного» типа, либо в виде коротких полос («штрихов»), направление которых зависит от ориентации зерен (рис.9).

На представленной на рис.14,а микрофотографии видно, что «пунктирные» зоны выхода дислокаций (рис.9) при большом увеличении представляют собой фигуры в виде квадратов правильной формы, располагающихся в зерне либо по отдельности (отмечено стрелкой на рис.13,в), либо в виде трех лежащих рядом и образующих «штриховой» участок (как показано стрелкой на рис.14,г).

В результате электронномикроскопических исследований образцов, испытанных на усталость при различных режимах механического и теплового нагружения, было установлено, что наряду с интенсивной деформацией на границах, в теле зерен развивается тонкое скольжение, неразличимое в световом микроскопе даже при больших увеличениях. Особенно сильно оно протекает в первый период испытания, когда миграция границ почти не наблюдается.

С началом передвижения границ, сопровождающихся сильной деформацией материала в зоне мигрирующей границы, следы тонкого скольжения искажаются. Такой тип микрорельефа представлен на рис.15,а, где буквой А обозначена зона передвижения границы, в которой наблюдаются своеобразные выступы (отмечены стрелкой) и впадины (обозначены стрелкой с крестиком). Образование выступов и впадин привело к искажению тонкого скольжения.

В ряде случаев в приграничных участках зерен наблюдается образование выступов, имеющих определенную направленность, не совпадающую с направлением полос скольжения в зерне. На рис.15,б показаны своеобразные «валики» (отмечено стрелками), идущие под некоторым углом к границе зерен. «Валики» пересекаются полосами тонкого скольжения под углом, близким к 90° .

Как видно из рис.15,в, на месте мигрировавшей границы остаются следы в виде продолговатых пор, отмеченных стрелками.

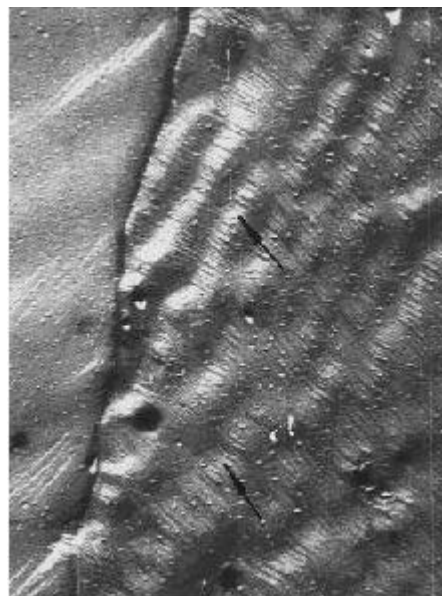
Микрофотографии, показанные на рис.15,а-в, получены с образца технического железа, подвергнутого $4,5 \cdot 10^5$ циклов переменной нагрузки при 800°C .

При длительных испытаниях, когда диффузионные процессы успевают достаточно развиться, на границах зерен возникают поры вследствие диффузии и скопления в них вакансий. На рис.15,г представлена микрофотография, полученная с образца железа, прошедшего $4 \cdot 10^6$ циклов нагрузки при 800°C и $\sigma = \pm 90$ МПа.

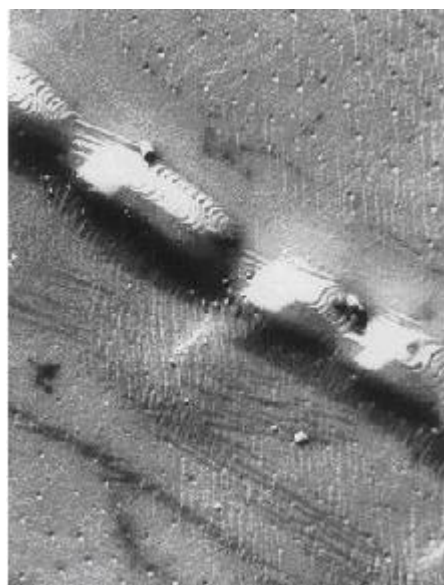
Стрелками отмечены поры, образовавшиеся при нагреве и нагружении при знакопеременном цикле. При этом в теле зерен наблюдается лишь тонкое скольжение, более интенсивно протекающее в приграничных участках.



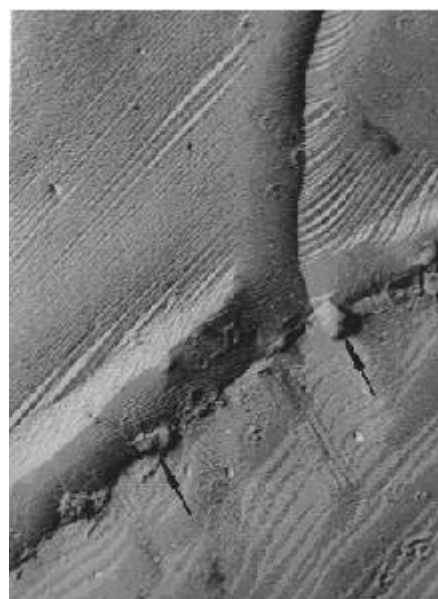
а)



б)



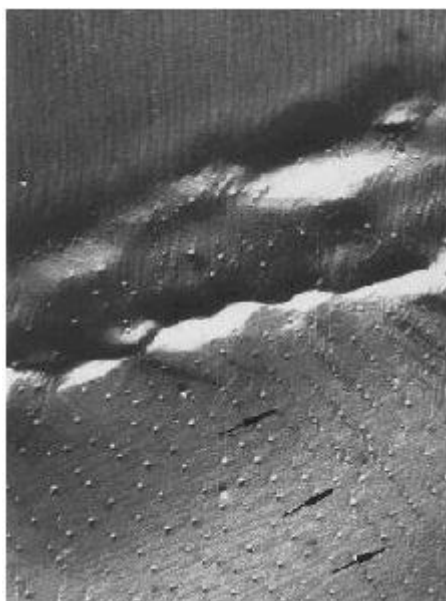
в)



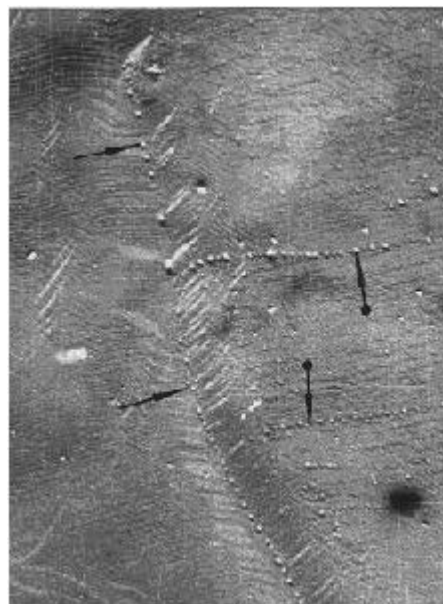
г)

Рис.15. Электронные микрофотографии, полученные с образца технического железа, испытанного при 800°C после $4,5 \cdot 10^3$ циклов ($\times 11000$).

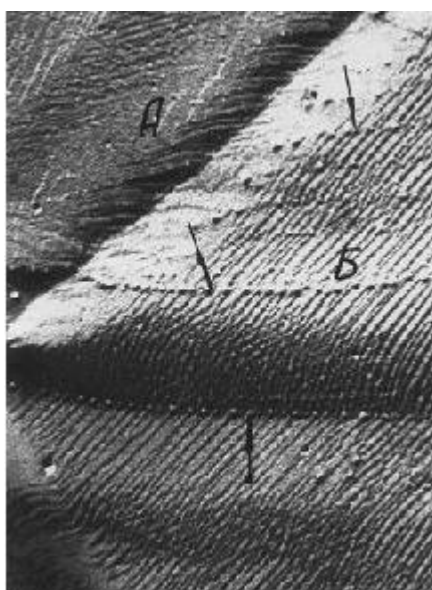
На рис.16,а показана микрофотография с выявленными в отдельных зернах образованиями точечного типа, возникающими вследствие локального испарения в вакууме в зонах выхода на поверхность дефектов кристаллической решетки, в частности, дислокаций, образующихся в процессе циклического нагружения. Эти точечные дефекты, как видно из рис.16,а, располагаются по линиям, как бы очерчивающим контуры отдельных плоскостей скольжения (например, отмеченных стрелками). В результате миграции границы при нагреве и нагружении упорядоченность ямок разрушается (рис.16,а).



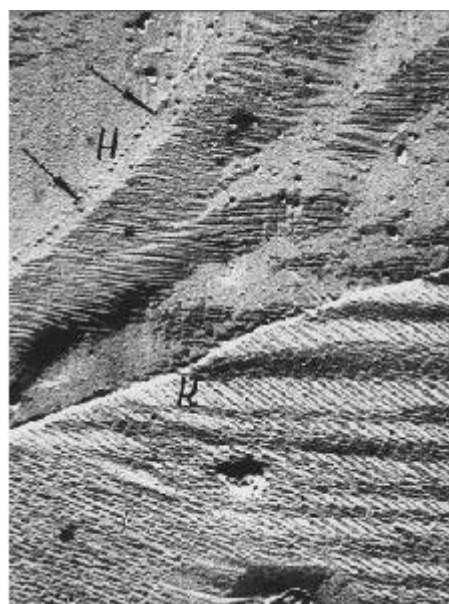
а)



б)



в)



г)

Рис.16. Электронные микрофотографии, иллюстрирующие характер образования ямок травления на поверхности образца, технического железа, испытанного при 800°C после $4,5 \cdot 10^3$ циклов нагружения ($\times 11000$).

При испытании в условиях повышенных температур в структуре металлических материалов наблюдаются процессы полигонизации, связанные с упорядоченным расположением дислокаций, образующих полигональные границы.

Показанная на рис.16,б электронная микрофотография иллюстрирует возникновение полигональной границы (отмечено стрелками) в образце технического железа после $8,45 \cdot 10^3$

циклов переменной нагрузки при 800°C . В результате испытания на усталость в указанных режимах на поверхности образца в результате избирательного испарения в вакууме выявились ямки травления, обусловленные выходом дислокаций на поверхность. Кроме того, наблюдалось также образование дислокаций по плоскостям скольжения, отмеченных, например, на рис.16,б стрелками с черным кружком.

Следует заметить, что процесс полигонизации более интенсивно протекает при больших нагрузках. Испытания образцов железа при температуре 800°C , но при меньшей амплитуде нагружения (в нашем случае она составляла 0,9 мм), полигональные группы наблюдались значительно реже. В последнем случае, когда длительность нагружения была большой, особенно интенсивно развивались экструзионно-интрузионные деформационные процессы.

Выше было показано, что направление полос скольжения в отдельном зерне зависит от его кристаллографической ориентации к направлению действия прикладываемых к образцу внешних напряжений и от взаимодействия с соседними зернами. В случае благоприятной ориентации зерен полосы скольжения могут переходить из одного зерна в другое. Из рис.16,в видно, что отдельные полосы тонкого скольжения переходят из зерна А в зерно Б. При этом в местах пересечения полос скольжения образуются, вследствие пересечения дислокаций, возникающих и перемещающихся под действием циклической знакопеременной нагрузки в плоскостях скольжения, вакансии. Скопление последних приводит к образованию пор в зонах пересечения полос скольжения в зерне Б (например, отмеченных стрелками). Причем по отдельным полосам скольжения (например, показанной стрелкой с черным кружком) могут наблюдаться перемещения отдельных микрообъемов, что приводит к искривлению полос скольжения зерна Б.

Как известно, высокотемпературный нагрев образцов железа в вакууме сопровождается активным протеканием диффузионных процессов, связанных с перемещением вакансий к границам зерен. Возникающие при этом поры на границе сохраняются и после перемещения последней вследствие собирательной рекристаллизации.

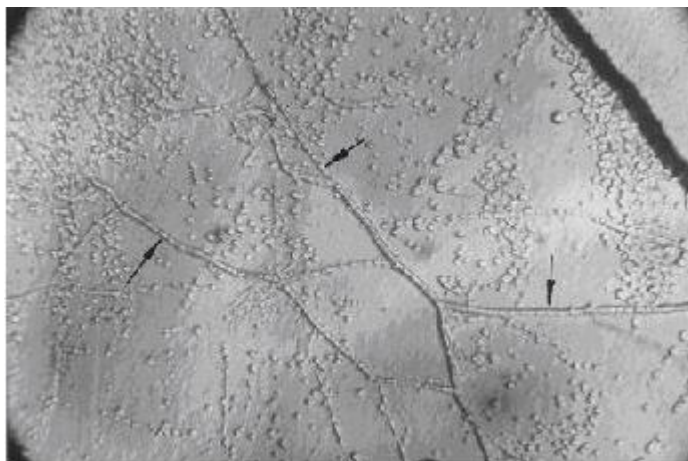
На рис.16,г показана микрофотография, снятая с образца железа после его нагружения $8,45 \cdot 10^3$ циклами переменной нагрузки при 800°C . После перемещения границы из положения «Н» в положение «К» исходное ее положение обозначено рядом точек, отмеченных стрелками.

Следует заметить, что полигональные процессы, о которых сообщалось выше, протекали также и в процессе усталостного разрушения в интервале температур транскристаллитного разрушения. На рис.17 представлены микрофотографии, полученные с поверхности образца железа, испытанного при 400°C . Возникшие в результате электролитического травления ямки образуют полигональные границы отдельных субзерен (например, отмеченные стрелками на рис.17).

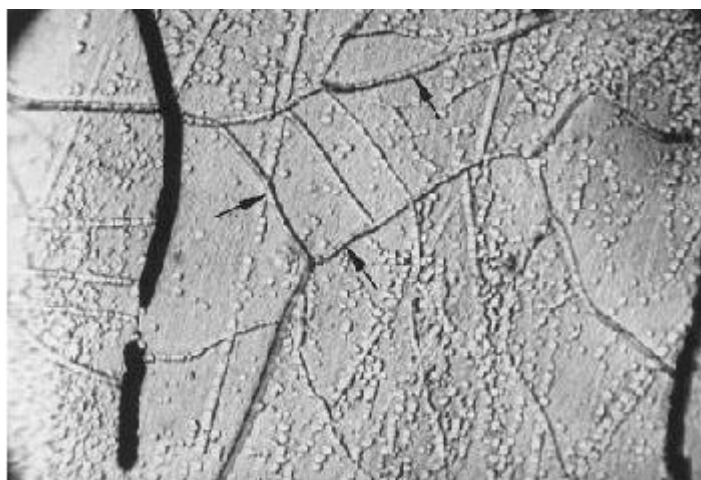
Однако с повышением температуры испытания количество субзерен увеличивается, а размер их уменьшается. Поскольку при высоких температурах деформационные процессы активизируются преимущественно у границ зерен, то и полигонизация начинает развиваться сначала у границ зерен (рис. 18)

Неоднородность деформаций у границ зерен определяет и характер образования полигональной структуры (рис. 19). При интеркристаллитном разрушении, как видно из рис.19, неоднородность деформаций преимущественно у границ зерен обуславливает и неоднородность скопления дислокаций в зонах наибольшей неоднородности

(на рис.19,а показаны зоны с максимальным распределением ямок травления в местах выхода дислокаций на поверхность испытываемого материала). При транскристаллитном разрушении наибольшая плотность дислокаций наблюдается по полосам скольжения (рис.19,б).



а)



б)

Рис.17. Развитие процесса полигонизации в зоне разрушения образца технического железа, испытанного при 400⁰С (х 2000).

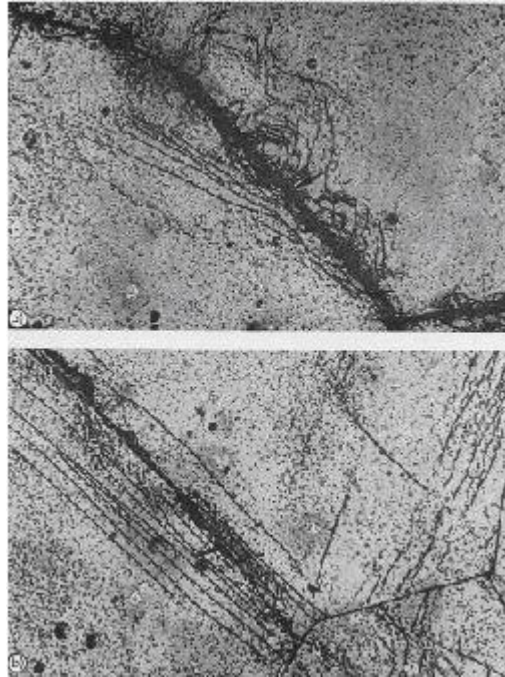


Рис. 18. Развите полигональных процессов у границ зерен.

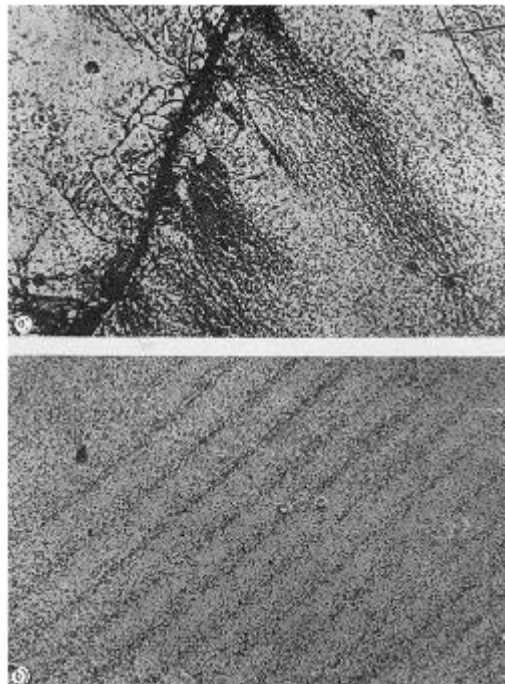


Рис. 19. Характер распределения ямок травления (выхода дислокаций на поверхность) при нагружении в интервале температур интеркристаллитного (а) и транкристаллитного (б) типа разрушения.

В процессе циклического нагружения при высоких температурах выстраиваются в полигональные стенки, обуславливая перестройку структуры с образованием новых зерен и субзерен (рис. 20 и рис. 21).

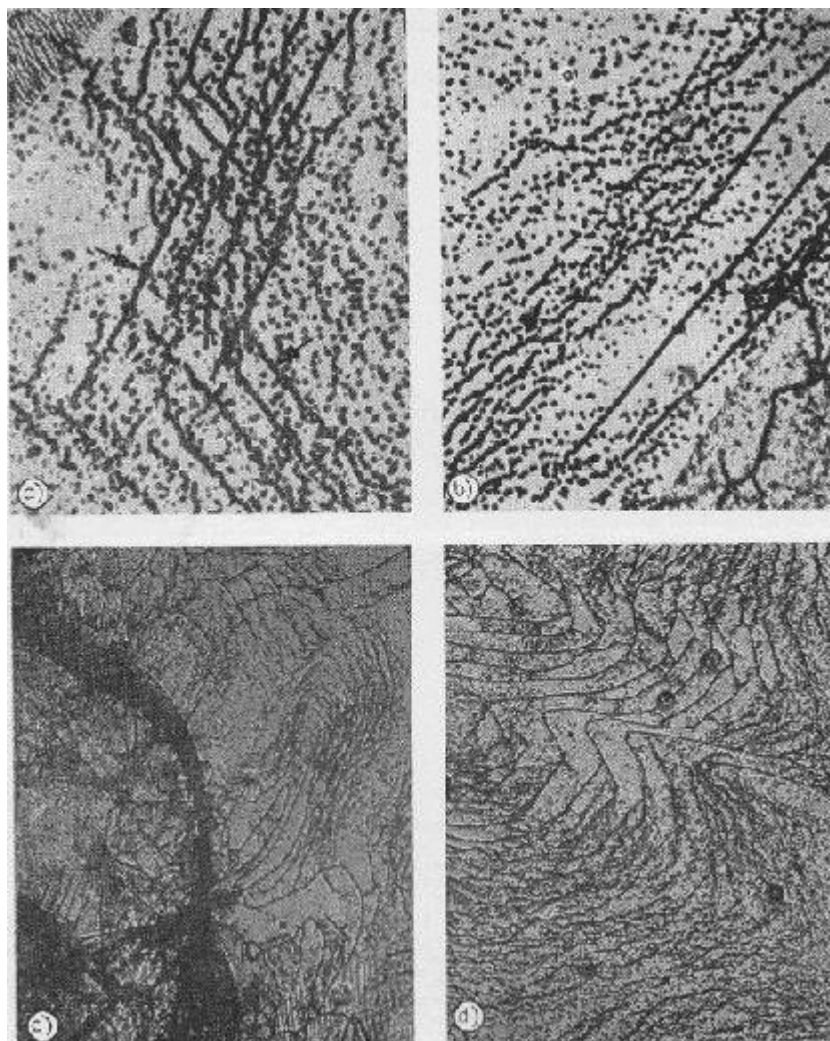


Рис. 20. Особенности полигональной структуры железа после высокотемпературного циклического нагружения.

Циклическое нагружение способствует стоку дислокаций к образующимся полигональным границам зерен от старых границ зерен (А, В, С, Е, D, G на рис 22) исходной структуры с образованием новых зерен A^1 , B^1 и возникновением рельефа типа «рыбий скелет».

Сток дислокаций к новым образующимся полигональным границам заканчивается образованием новой развитой полигональной структуры (рис. 22 и рис. 23).

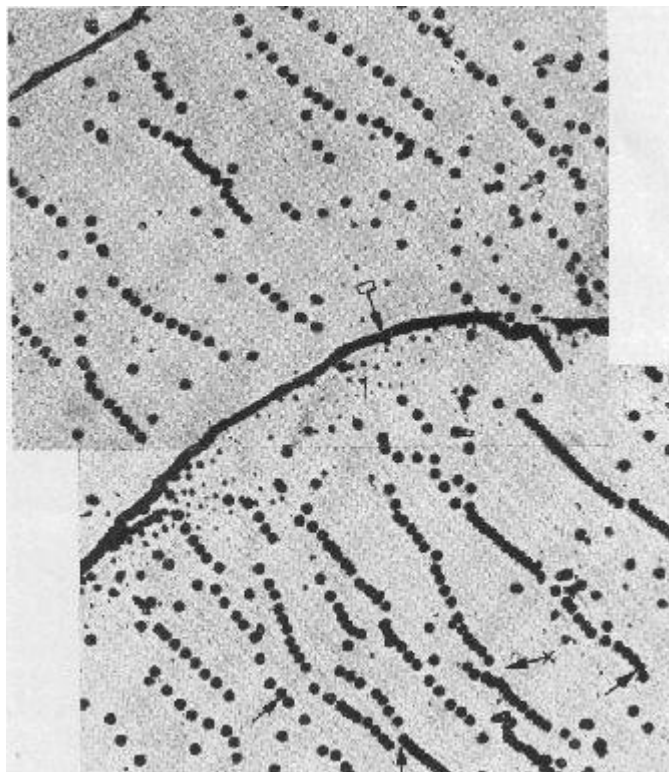


Рис. 21. Кинетика образования полигональных границ при высокотемпературном циклическом нагружении.

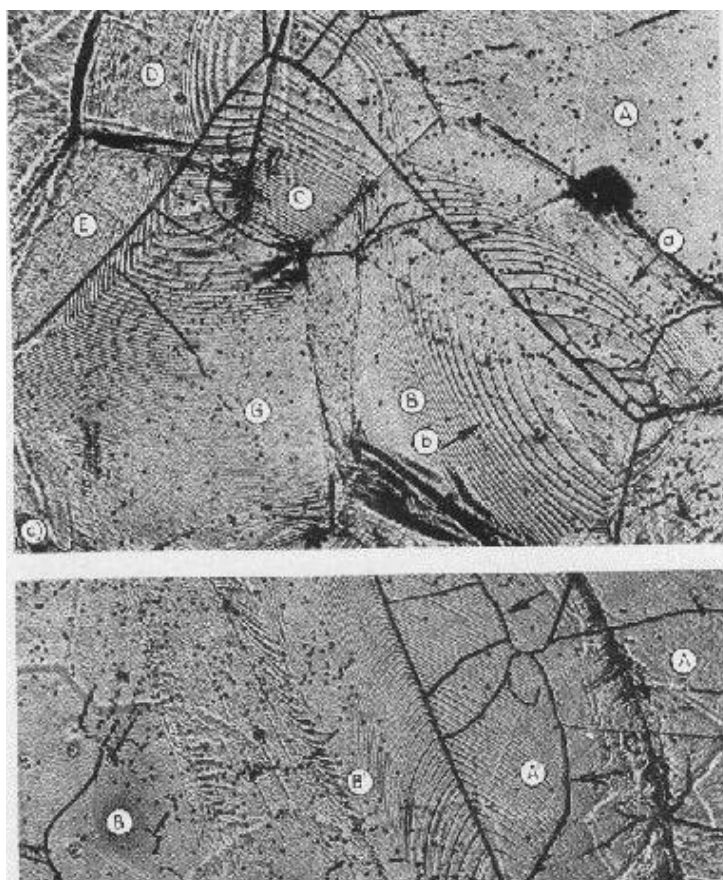


Рис. 22. Следы стока дислокаций в образующиеся полигональные границы.

Как показали наши исследования, на поверхности образцов технического железа в процессе циклического нагружения при высоких температурах развиваются экструзионно-интрузионные деформационные процессы. На рис.18 даны электронные микрофотографии, полученные с поверхности образцов, прошедших испытание при 800°C . Можно видеть, что образовавшиеся под действием переменной нагрузки полосы тонкого скольжения (рис.24,а) после $8,45 \cdot 10^3$ циклов искривляются вследствие образования впадины (отмеченной стрелкой). Наряду с этим можно видеть волнообразные выступы объемов материала (отмечены стрелками с черным кружком). На микрофотографиях (рис.24,б-г показаны образовавшиеся выступы (экструзии) и впадины (интрузии) на отдельных стадиях их развития. Указанные микрорельефы (рис.24,б-г) возникли на поверхности образца после $4 \cdot 10^6$ циклов нагрузки при 800°C и $\sigma = \pm 90$ МПа.

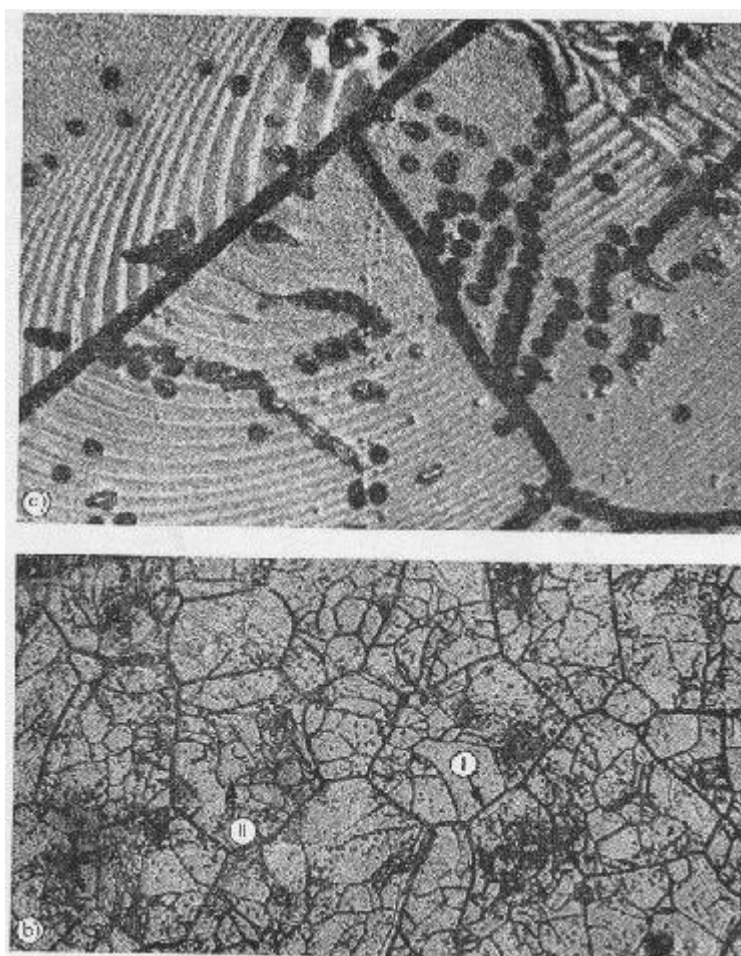
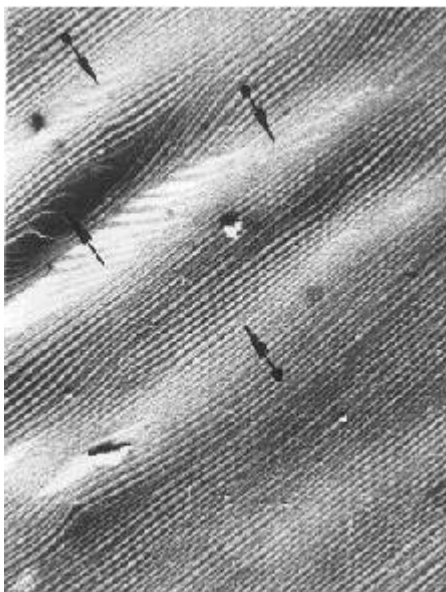
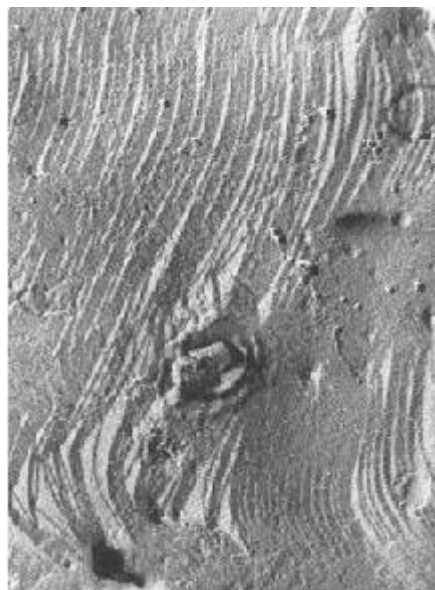


Рис. 23. Построение полигональной структуры при высоких температурах и циклическом нагружении.

На рис 25 показано развитие экструзионно - интрузионных процессов при высокотемпературном циклическом нагружении, а рис. 26 – возможный механизм образования при этом структурных повреждений. Приведенные деформационные рельефы не являются исчерпывающими.



а)



б)



в)



г) (x 22000)

Рис.24. Экструзионно-интрузионные микрорельефы, образующиеся на поверхности образцов технического железа в процессе испытания на усталость при 800⁰С (x 11000).

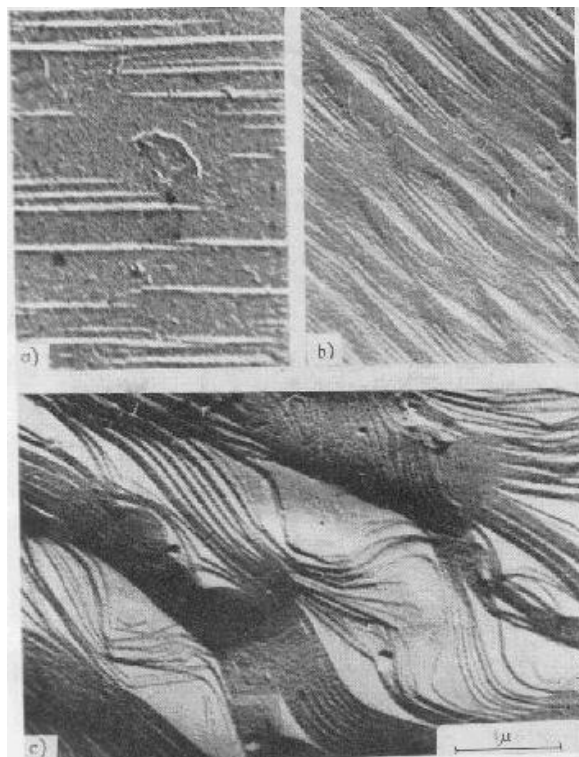


Рис. 25. Характер образования и развития экструзионно-интрузионных процессов в железе при циклическом нагружении.

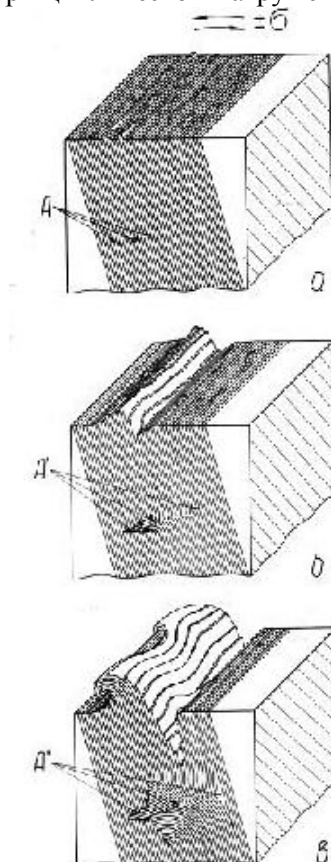


Рис.26. Предполагаемый механизм развития экструзионно-интрузионных процессов и образования структурных повреждений при циклическом нагружении.

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1., Вестник научно-технического развития, №11, 2013, с.
2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование. Вестник научно-технического развития, №1, 2014, с.
3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения. Вестник научно-технического развития, № 2, 2014, с.
4. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35, с.
5. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.:Наука. 1988, 280 с..
6. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Микроструктурные особенности развития деформаций металлических материалов в широком диапазоне температур. Информатизация и связь, 2009 №4, с41-47..
7. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Рассредоточенное трещинообразование в конструкционных материалах при циклическом нагружении в связи с их структурной неоднородностью. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012, №5, с.30-40.
8. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных металлических материалов. Информатизация и связь. 2000, №4, с. 48-54.
9. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Влияние структурного состояния конструкционных металлических материалов на неоднородность накопления повреждений при циклическом нагружении. Труды Пятого Международного междисциплинарного симпозиума «Прикладная синергетика в нанотехнологиях». 2008. Москва, с.391-393.
10. Романов А.Н., Филимонова Н.И., Дубравина А.А.. Микроструктурные особенности развития усталостного разрушения технического железа при температурах испытания от 20 до 400⁰С. Информатизация и связь, 2012, №7, с. 90-96.
11. Романов А.Н. Сопротивление деформированию и разрушению конструкционных материалов при циклическом нагружении. Проблемы машиностроения и надежности машин. М. «Наука», 2012, №4, с.
12. Романов А.Н. Закономерности усталостного разрушения. Металловедение и термическая обработка, 2006, № 9, с. 19-27.
13. Романов А.Н. Выбор материала при конструировании. Кинетические критерии разрушения при циклическом нагружении на стадиях образования и развития трещин. Инженерный журнал «Справочник», 2001, № 10, с.53-56.
14. Романов А.Н. Структура и прочность конструкционных материалов. МЦНТИ, 1988, 155 с.