



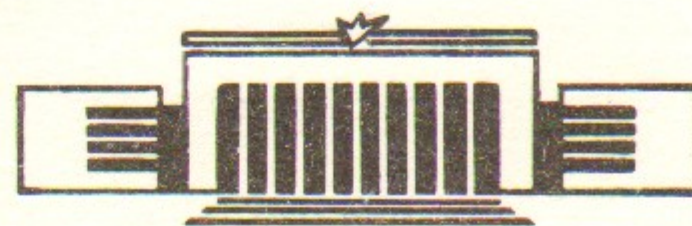
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

//

Н.З. Ляхов, А.И. Маслий,
Б.П. Толочко, М.А. Шеромов

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМИРОВАННОГО СРЕЗОМ СЕРЕБРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ПРЕПРИНТ 86-27



НОВОСИБИРСК
1986

АННОТАЦИЯ

С помощью методики скоростной дифрактометрии синхротронного излучения, получены экспериментальные результаты, свидетельствующие о протекании быстрых релаксационных процессов в деформированном срезом серебре.

Контакт с раствором азотнокислого серебра ускоряет процесс перестройки деформированной поверхности металла тем сильнее, чем больше концентрация ионов серебра в растворе.

ВВЕДЕНИЕ

Природа деформированной поверхности металлов до настоящего времени изучена не в полной мере, хотя представляет большой интерес для металловедов и химиков. Для первых наиболее актуальна проблема влияния структуры поверхности металлов после механической обработки (резка, полировка, дробеструйная обработка и т.п.) на прочностные свойства металлов, а для химиков — проблема химической активности обработанной поверхности, в частности ее коррозионная стойкость.

Для изучения структуры приповерхностных слоев деформированных металлов удобным методом исследования является дифракция электронов, позволяющая исследовать тонкие слои 10—100 Å. Для получения информации о более толстых слоях металла, необходимо использовать дифракцию рентгеновского излучения, проникающего на глубину 1—1000 мкм. Обеим методикам присущ один недостаток — они обладают низким быстродействием (несколько минут для получения одной дифракционной картины), поэтому применять их для исследования процессов, происходящих в минутном и тем более в секундном масштабе времен, невозможно.

Методика дифрактометрии синхротронного излучения [1] обладает существенно лучшим быстродействием: 1 мс для получения одной рентгенограммы, что дает возможность исследовать динамику структурных превращений, в частности структурной релаксации деформированных слоев металла. Эта методика позволяет также исследовать структурные изменения в образцах, находящихся под слоем раствора [2], если использовать жесткий диапазон синхротронного излучения.

В данной работе представлены экспериментальные результаты, полученные на дифрактометре синхротронного излучения [1], по исследованию релаксационных процессов в деформированном срезом серебре на воздухе и в контакте с раствором. Серебро для исследований было выбрано в связи с тем, что, как [3] было обнаружено ранее, электрохимическое поведение серебра после среза сильно меняется со временем, но причины этого изменения не были выяснены.

Образцом для исследований служила серебряная проволока СА 99,99 диаметром 0,8 мм. Деформация срезом осуществлялась в устройстве, описанном в работе [4]. Рентгенограммы регистрировались от плоскости среза, перпендикулярного оси проволоки. Образец нагревался термостатом.

СТРУКТУРА ДЕФОРМИРОВАННОГО СЛОЯ СЕРЕБРА

Из-за конструктивных особенностей деформирующего устройства [4], первая рентгенограмма от образца могла быть получена через 0,4 с после того как рубиновый нож, срезая тонкий (10—20 мкм) слой, смещался от образца и пучок синхротронного излучения попадал на серебро. Экспозиция одной съемки равнялась 0,1 с.

Рентгенограмма, полученная от деформированного серебра, заметно отличается от рентгенограммы исходного образца: рефлексy уширены и смещены, соотношение их интенсивностей изменилось, появился диффузный фон (рис. 1 и 2).

Смещение рефлексов в сторону меньших углов свидетельствует об увеличении параметра решетки $\delta a/a = 0,008$. Изменение на 30° угла падения излучения на образец не приводило к изменению положения рефлексов, что свидетельствует об отсутствии заметных макронапряжений в образце при деформации срезом.

Кроме общего смещения рефлексов в меньшие углы, наблюдается изменение расстояния между рефлексами с разными индексами Миллера. В частности, рефлексy (111) и (200) смещаются по направлению друг к другу, а рефлексy (200) и (220) удаляются друг от друга. Такое смещение свидетельствует об образовании дефектов упаковки деформационного типа [5]. Определена их концентрация $\alpha = 0,025$. На точность определения концентрации дефектов упаковки в этом методе не влияет изменение периода решетки, так как при расчетах используется относительное, а не абсолютное смещение рефлексов.

Измеренная концентрация дефектов упаковки деформационного типа высока и, вероятно, обусловлена спецификой деформации срезом. Срез при температуре жидкого азота также приводит к возникновению высокой концентрации дефектов упаковки деформационного типа [6], причем они образуют крупные скопления. Эти скопления формально можно рассматривать как области со структурой ГПУ решетки. Обнаруженные ранее [6] рефлексy, соответствующие ГПУ решетке, подтверждают предположение о возможности существования такой фазы в деформированном серебре.

Проведенный анализ формы рефлексов серебра свидетельствует о появлении асимметрии, т. е. их центр тяжести не совпадает с максимумом интенсивности, что позволяет рассчитать концентрацию дефектов двойникового типа, равную 0,01.

В исследованиях использовалось излучение с различной длиной волны от $0,3 \text{ \AA}$ до $2,5 \text{ \AA}$, что позволяло получать информацию о

нарушениях кристаллической решетки на разной глубине. В частности, глубина половинного ослабления в серебре для излучения с длиной волны $0,3 \text{ \AA}$ составляет 720 мкм, а с длиной волны $2,5 \text{ \AA}$ —0,5 мкм, поэтому и исследуемый слой был соответствующей толщины.

При уменьшении длины волны от $1,2 \text{ \AA}$ до $0,3 \text{ \AA}$, начинают дифрагировать глубинные, неискаженные слои металла. Зная глубину половинного ослабления излучения с длиной волны $1,2 \text{ \AA}$, можно сделать вывод, что наибольшие искажения сосредоточены в слое толщиной порядка 10 мкм.

С ростом длины волны наблюдается увеличение диффузного рассеяния на рентгенограммах. Особенно резко это происходит начиная с длины волны $1,7 \text{ \AA}$, т. е. когда эффективная глубина проникновения равна 2 мкм. Такое увеличение фона можно интерпретировать как возрастание вклада неупорядоченной фазы при приближении к границе среза (рис. 3).

Анализ тонкой структуры двух порядков отражения системы плоскостей {100} по методу [7] позволил рассчитать размер областей когерентного рассеяния $\langle L \rangle = 100 \text{ \AA}$, а также величину микроискажений $\langle \epsilon \rangle^{1/2} = 4,5 \cdot 10^{-3}$. Такой величине областей когерентного рассеяния соответствует концентрация дислокаций $N = 10^{12} \text{ см}^{-1}$. Высокое значение микроискажений указывает на существенную неоднородность поверхности, т. е. деформация срезом приводит к образованию сильной локальной флуктуации плотности вещества. Деформация срезом приводит также к частичному текстурированию металла. Так из рентгенограммы на рис. 1 следует, что количество кристаллитов с гранью (100), параллельной плоскости среза, уменьшилось в три раза по сравнению с количеством кристаллитов, выходящих на поверхность гранью (111). Относительно уменьшается также выход на поверхность грани (110). Это свидетельствует о том, что в процессе деформации происходит сдвиг приповерхностных слоев, увлекаемых за собой рубиновым ножом, в результате чего они переориентируются определенным образом.

СТРУКТУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СЕРЕБРА

Энергия, расходуемая на деформацию металла, остается, накапливается в кристаллической решетке, увеличивая его внутреннюю энергию. Это возрастание внутренней энергии обусловлено дефектами, возникающими при деформации. Такое состояние на-

клепанного металла является термодинамически неустойчивым при всех температурах, поэтому переход деформированного металла в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией возможен и при комнатной температуре. Вместе с тем этот переход требует определенной термической активации и следовательно скорость этого процесса должна увеличиваться с возрастанием температуры [8].

Для выяснения механизма структурной релаксации мы проводили низкотемпературный отжиг образцов в интервале температур от 25°C до 95°C, т. е. в интервале температур проведения электрохимических реакций.

В начальный момент времени после деформации (в интервале 0,4 ÷ 4 с) наблюдается высокая скорость изменения всех параметров рентгенограммы: интенсивности рефлексов (рис. 4), их положения (рис. 5) и полуширины, причем скорость их изменения не меняется с ростом температуры. Таким образом, процессы, происходящие на этой стадии релаксации, не являются термически активируемыми. Естественно предположить, что в этом временном интервале происходит скольжение дислокаций под действием сил внутренних остаточных напряжений, приводящее к их более равномерному распределению и частичному снятию микронапряжений. Дальнейшее скольжение дислокаций становится невозможным, так как они, вероятно, останавливаются на стопорах, преодоление которых (или их исчезновение) требует подвода дополнительной энергии.

Изменения, происходящие в следующем временном интервале 10—100 с сильно зависят от температуры (рис. 6) и удовлетворительно описываются соотношением (например, для полуширины рефлекса σ);

$$(\sigma(t) - \sigma_0)^{-1} = k \cdot t,$$

где t —время после среза, k —константа скорости реакции. Таким образом, релаксационные процессы, протекающие в этом временном интервале, описываются уравнениями кинетики второго порядка. Построив график $\ln k - 1/T$, где T —абсолютная температура, определили энергию активации процесса структурной релаксации $E = 1$ эВ.

В следующем временном интервале 200—600 с, при температурах 25°C—80°C, структурная релаксация по-прежнему описывается уравнениями кинетики второго порядка. При больших температурах для удовлетворительного описания экспериментальных дан-

ных необходимо прибегать к уравнениям первого порядка (рис. 7).

Измеренная энергия активации возврата структуры деформированного металла, согласно общепринятой классификации процессов, происходящих при отжиге [8], дает основание полагать, что во время отжига серебра возможны: 1) миграция вакансий к ловушкам и миграция бивакансий; 2) миграция вакансий к дислокациям, способствующая их перераспределению (процесс полигонизации) с образованием малоугловых границ и частичной аннигиляцией.

Тот факт, что структурная релаксация протекает по законам кинетики второго порядка, дает основание предполагать, что роль аннигиляции дислокаций разного знака в этом процессе для серебра достаточно велика, так как x —расстояние между дислокациями существенно меньше, чем L —расстояние между их стоками (рис. 8).

В области высоких температур, когда релаксационные процессы протекают особенно быстро, вполне вероятно, что при временах, больших 100 с, начинает превалировать уже не аннигиляция дислокаций разного знака, а их выход и гибель на стоках дислокаций, так как на этой стадии, вероятно, расстояние между дислокациями становится сравнимым с расстоянием между стоками. Следовательно кинетика этого процесса должна описываться уравнениями первого порядка. При более низких температурах переход от одной кинетики к другой наблюдается при существенно больших временах.

Известно, что точечные дефекты являются стопорами для дислокаций, поэтому обнаруженное нами уменьшение диффузного рассеяния вблизи рентгеновских рефлексов (рис. 9) свидетельствует об уменьшении концентрации точечных дефектов, что должно приводить к возрастанию подвижности дислокаций. Таким образом, несмотря на то, что изменение полуширины рефлексов связано с уменьшением концентрации дислокаций, тем не менее активация этого процесса обусловлена уменьшением концентрации точечных дефектов. Если это предположение верно, тогда вполне объяснимо низкое значение полученной в эксперименте энергии активации—1 эВ, так как для активации миграции точечных дефектов необходима энергия такого порядка.

Следует отметить, что зависимость $\sigma(t)$, соответствующая системе плоскостей {100}, в начальный момент ведет себя по-другому: в первые 100 с $\sigma(t)$ даже увеличивается. Это можно объяснить, если принять во внимание то, что дислокации, расположенные в

различных кристаллографических плоскостях, ведут себя по-разному в процессе отжига. Это естественно, так как (111) — характерная плоскость сдвига в гранцентрированной кубической решетке, поэтому дислокации, расположенные в этой плоскости, будут двигаться к стокам наиболее легко. Дислокации, расположенные в других плоскостях, перемещаются значительно медленнее и по другому механизму — поперечного скольжения и диффузионного ползновения. Поэтому в тот момент, когда происходит резкое уменьшение концентрации дислокаций, находящихся в системе плоскостей {111}, в системе {100} микронапряжения возрастают, что приводит к увеличению $\sigma(t)$ рефлексов этой системы. В дальнейшем микронапряжения по всем направлениям уравниваются, что приводит к плавному уменьшению $\sigma(t)$ рефлексов от плоскостей {100} (рис. 10).

Использование излучения с длиной волны больше 2 Å позволяло исследовать структурную релаксацию в приповерхностных слоях толщиной порядка 1 мкм и меньше. Релаксационные процессы в тонких слоях происходят с большей скоростью, нежели в объеме металла. Проведя экстраполяцию, можно оценить скорость релаксационных процессов на поверхности металла.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В работе [9] исследовалось влияние поверхностно активных веществ на поведение структуры деформированных металлов (эффект Ребиндера), а в [10] — влияние коррозионно-активных веществ на поведение металлов под напряжением. Влияние ионов металлов на перестройку структуры деформированных металлов изучено слабо и в основном косвенными методами [11]. Используя методику регистрации рентгенограмм через раствор [2], нам удалось обнаружить, что контакт с раствором нитрата серебра приводит к существенному ускорению процессов перестройки поверхности деформированного срезом серебра, о чем свидетельствует более быстрое изменение интенсивности рефлексов, их полуширины, положения, а также более резкое уменьшение диффузного рассеяния по сравнению с их поведением во время отжига на воздухе (рис. 11).

Измерения проводились при разной температуре в диапазоне 25°C—95°C. Увеличение температуры приводит к еще большему ускорению процесса перестройки поверхности электрода. Следует

отметить, что изменяется не только скорость, но и характер изменения рентгенограмм: если при температуре 25°C изменение параметров тонкой структуры рефлексов носит экспоненциальный характер, то при 95°C, экспериментальные значения описываются более сложной зависимостью. Это объясняется тем, что при повышенной температуре ускоряются не только процессы на поверхности металла, но и в его объеме и поэтому, хотя скорость гибели дефектов на поверхности высока, подвод из объема новых дислокаций снижает экспериментально наблюдаемую величину уменьшения концентрации дислокаций во времени.

Для определения энергии активации процессов, происходящих на границе раздела металл-электролит, эксперименты проводились в температурном интервале 25°C—65°C так как при этих температурах структурная релаксация в объеме металла протекает медленно. Измеренная энергия активации равняется 0,3 эВ. Полученный результат дает основание предполагать, что перестройка поверхности при контакте с электролитом обусловлена кинетикой обмена атомов серебра в наиболее дефектных участках поверхности с ионами серебра в растворе.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Деформация срезом приводит к резкому, скачкообразному отклонению потенциала серебряного электрода от равновесного в отрицательную сторону (рис. 12). Амплитуда отклонения и скорость возвращения потенциала к равновесному сильно зависят от температуры: амплитуда уменьшается, а скорость возрастает при увеличении температуры.

Потенциал обновляемого электрода определяется энергетическим состоянием поверхностных слоев металла толщиной в несколько ангстрем, поэтому диссипация запасенной в нем при срезе энергии приводит к уменьшению электрохимического потенциала.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Изотоп ^{110}Ag наносился на отожженную пластинку серебра размером 10×20×1 мм. Площадка, на которую наносился изотоп имела размеры 5×10 мм. После нанесения изотопа серебряная пластина помещалась на 10 мин в раствор 0,1 м AgNO_3 , затем

промывалась, сушилась и методом автордиографии определялось распределение радиоактивного изотопа по образцу.

Во время контакта с серебрясодержащим раствором радиоактивные изотопы попадают в раствор, так как в этой системе очень большой ток обмена ~ 1 А/дм², а затем снова осаждаются на электрод. Из автордиограммы видно, что на участках серебра, первоначально свободных от изотопов, после контакта с раствором появляются следы радиоактивного серебра. Изотопы осаждаются не равномерно по всей поверхности, а избирательно—на отдельных кристаллитах, выходящих на поверхность электрода, поэтому автордиограмма от этого участка поверхности состоит из изолированных черных пятен, совпадающих по размеру с размерами кристаллитов.

Для объяснения полученного результата необходимо предположить, что при контакте с раствором различные участки поверхности серебра участвуют в процессе обмена с раствором по-разному—одни преимущественно растворяются, а на других в основном происходит осаждение ионов серебра, в том числе и радиоактивных. Такой неравномерный по поверхности обмен с раствором связан с различным энергетическим состоянием различных кристаллитов, т. е. в образце существуют остаточные напряжения разной величины, что приводит к различному электрохимическому поведению кристаллитов.

В работе [12] рассматривается распределение электронов в металлах и делается вывод, что в случае неоднородной деформации решетки, электроны перемещаются из сжатой области в растянутую. В результате этого перераспределения электронов сжатые участки образца заряжаются положительно, а растянутые—отрицательно, т. е. появляются микроаноды и микрокатоды, короткозамкнутые между собой. Очевидно, что при контакте с раствором азотнокислого серебра анодные участки начнут растворяться, а на катодных будет происходить осаждение серебра, что мы и наблюдаем в экспериментах с радиоактивными изотопами.

Деформация срезом приводит к существенно большей неоднородности поверхности металла, чем у образцов, использовавшихся в экспериментах с радиоактивными изотопами. В частности, несмотря на то, что в целом кристаллическая решетка серебра растянута и средняя деформация составляет величину +0,8%, существуют области как с еще более растянутой кристаллической решеткой, так и области со сжатой кристаллической решеткой (рис. 13). Очевидно, что участкам с разным остаточным напряже-

нием будет соответствовать различный электрохимический потенциал и поэтому должны возникнуть активные микрогальванопары. Возникновение микрогальванопар должно существенно ускорить процесс перестройки поверхности по сравнению с процессами, протекающими на воздухе или в растворе, не содержащем ионы серебра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя результаты электрохимических, рентгеноструктурных и автордиографических измерений, можно прийти к выводу, что при контакте с растворами азотнокислого серебра на поверхности деформированного срезом серебра интенсифицируются процессы перестройки поверхности. Ускоряющая роль раствора сводится к тому, что он существенно облегчает перемещение атомов серебра из кристаллографически невыгодного положения на поверхности металла к более выгодному. При контакте с раствором образуются микрогальванопары, в результате чего одни микроучастки поверхности растворяются, а на других идет осаждение ионов серебра.

Полученные нами результаты свидетельствуют также об ускорении процесса перестройки поверхностных слоев деформированного электрода с ростом концентрации ионов серебра в растворе и подтверждают предложенную модель. В рамках модели такое ускорение естественно, так как рост концентрации c_0 приводит к росту тока обмена: $I \sim \sqrt{c_0}$, что в свою очередь приводит к более интенсивной работе микрогальванопар и, следовательно, к более быстрой перестройке поверхности электрода.

Воспользовавшись случаем, хочется поблагодарить сотрудников комплекса ВЭПП-3, ВЭПП-4, обеспечивавших в течении ряда лет надежную работу с пучком синхротронного излучения. Особую благодарность за постоянную помощь и поддержку мы хотим выразить Г.Н. Кулипанову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мезенцев Н.А., Шеромов М.А. и др. Экспериментальная станция для исследования динамики структурных изменений вещества с использованием синхротронного излучения. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-156. Новосибирск, 1983.
2. Толочко Б.П., Маслий А.И. и др. Известия СО АН СССР, сер. хим. наук. 1985, т. 115, вып. 1.
3. Толочко Б.П., Маслий А.И. и др. Известия СО АН СССР, сер. хим. наук. 1979, т. 109, вып. 5.
4. Бек Р.Ю., Лаврова Т.А. Известия СО АН СССР, сер. хим. наук. 1971, т. 101, вып. 1.
5. Вишняков Я.Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов. М.: Металлургия. 1975.
6. Ляхов Н.З., Толочко Б.П. В сб.: Отчет о работах по использованию синхротронного излучения в Институте ядерной физики СО АН СССР. Новосибирск, 1981.
7. Уоррен Б. Рентгенографическое изучение деформированных металлов. М.: Металлургиздат, 1963. (Сер. Успехи физики металлов).
8. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1967.
9. Лихтман В.И., Шукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. М.: 1962.
10. Пассивность и коррозия металлов (ред. А. М. Сухотин), М.: Химия, 1971.
11. Hennig D., Weil K. G., Z. Phys. Chem. (BDR), 1975, v.98, 143.
12. Коттрел А.Х. В кн.: Структура металлов и свойства. М.: Металлургиздат, 1957.

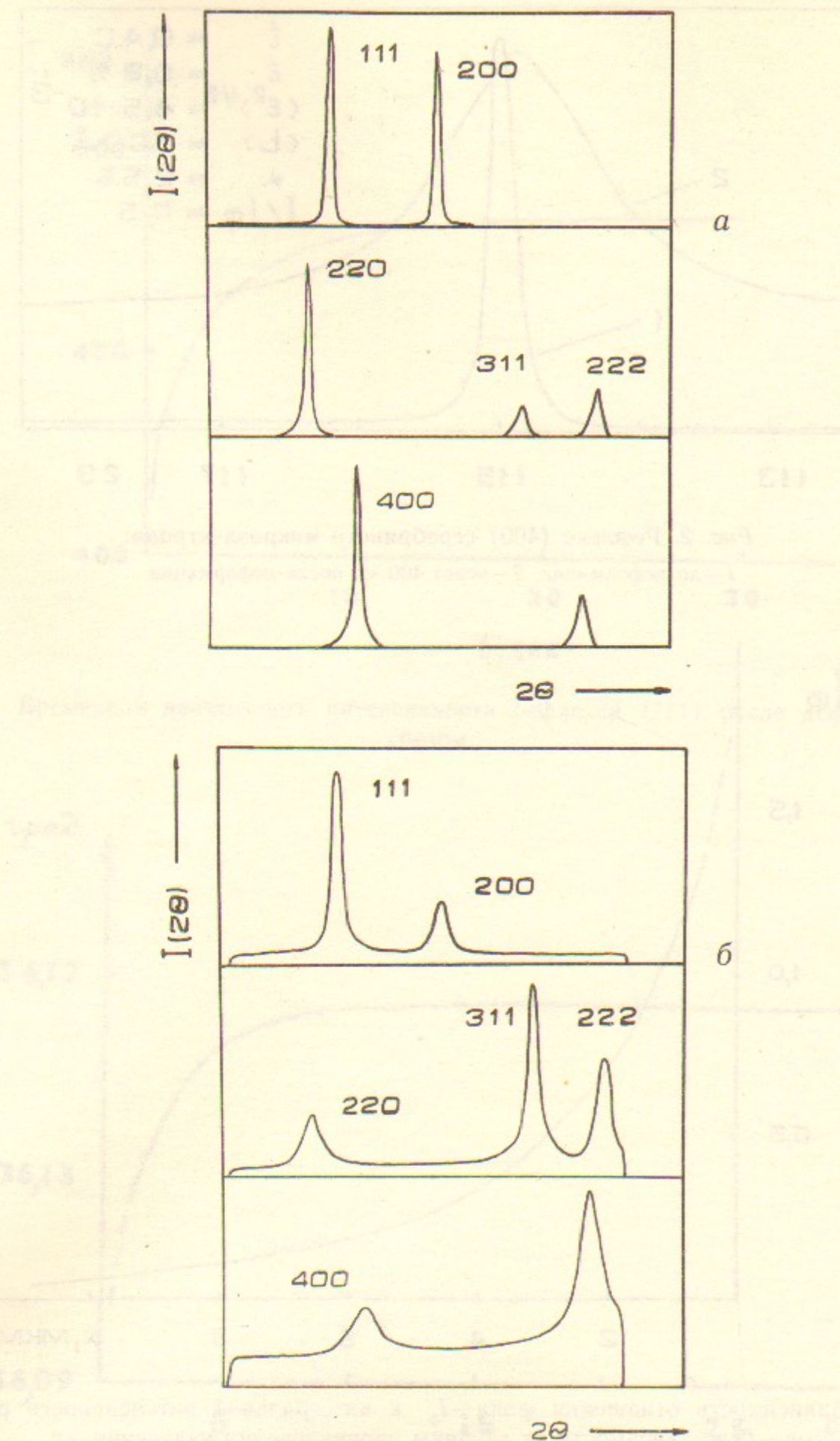


Рис. 1. Рентгенограммы микроэлектрода серебра: а—до деформации, б—через 400 мс после деформации срезом.

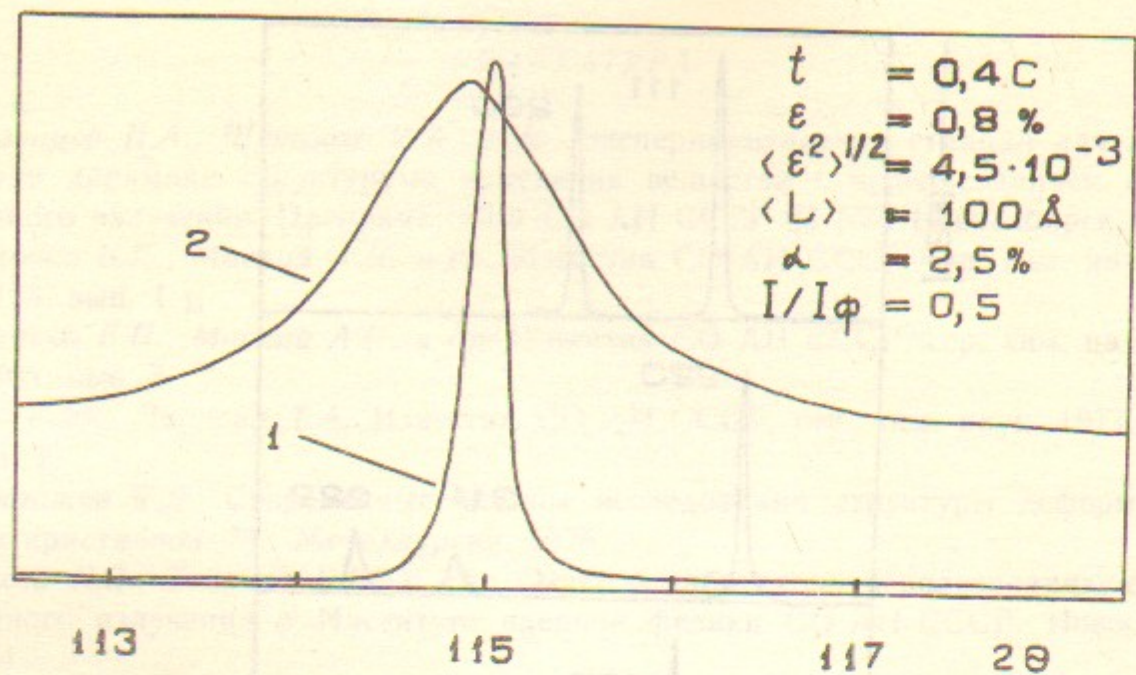


Рис. 2. Рефлекс (400) серебряного микроэлектрода:
1—до деформации, 2—через 400 мс после деформации.

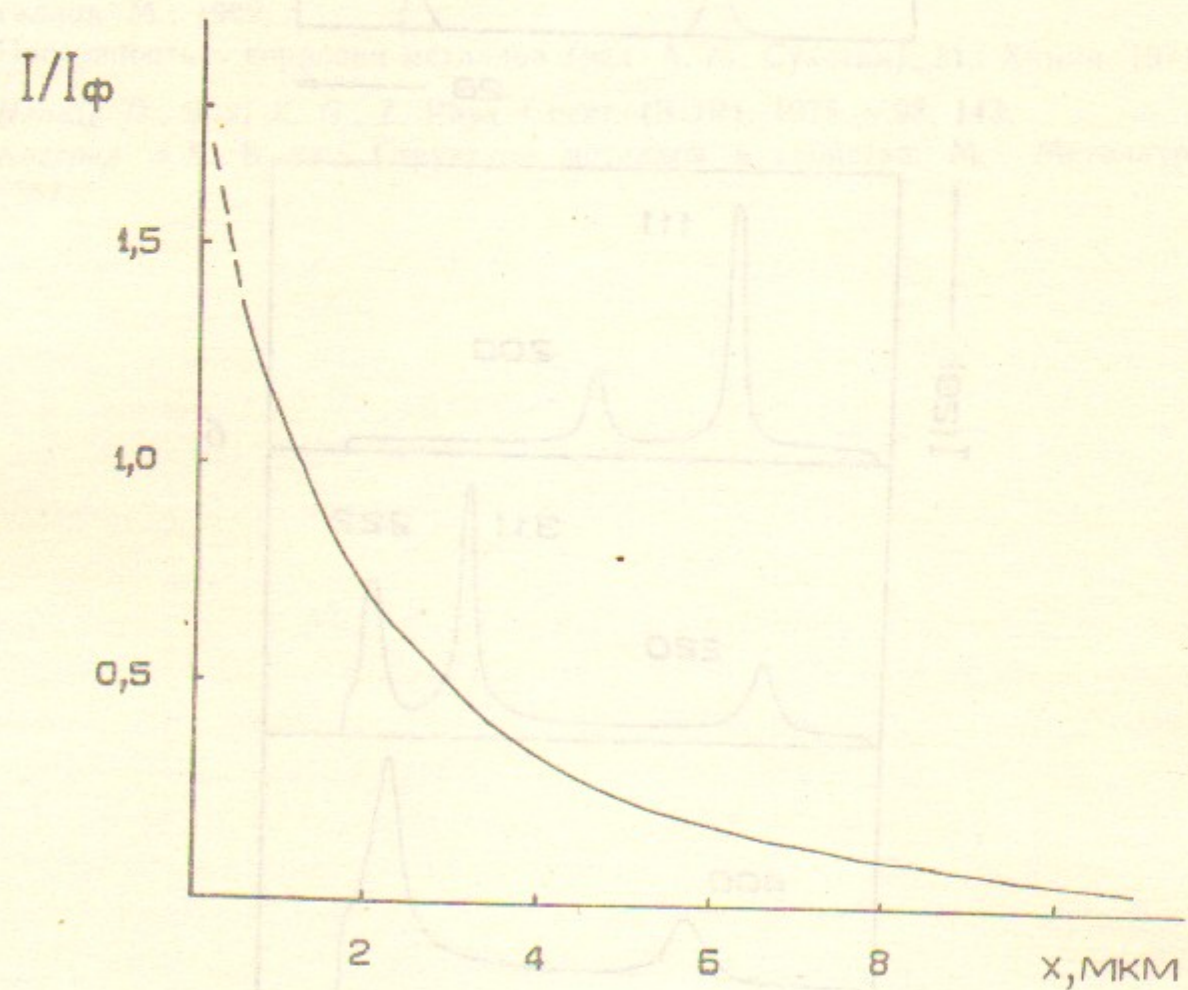


Рис. 3. Зависимость отношения фона— I_ϕ к интегральной интенсивности рефлексов— I , в зависимости от глубины проникновения излучения— x .

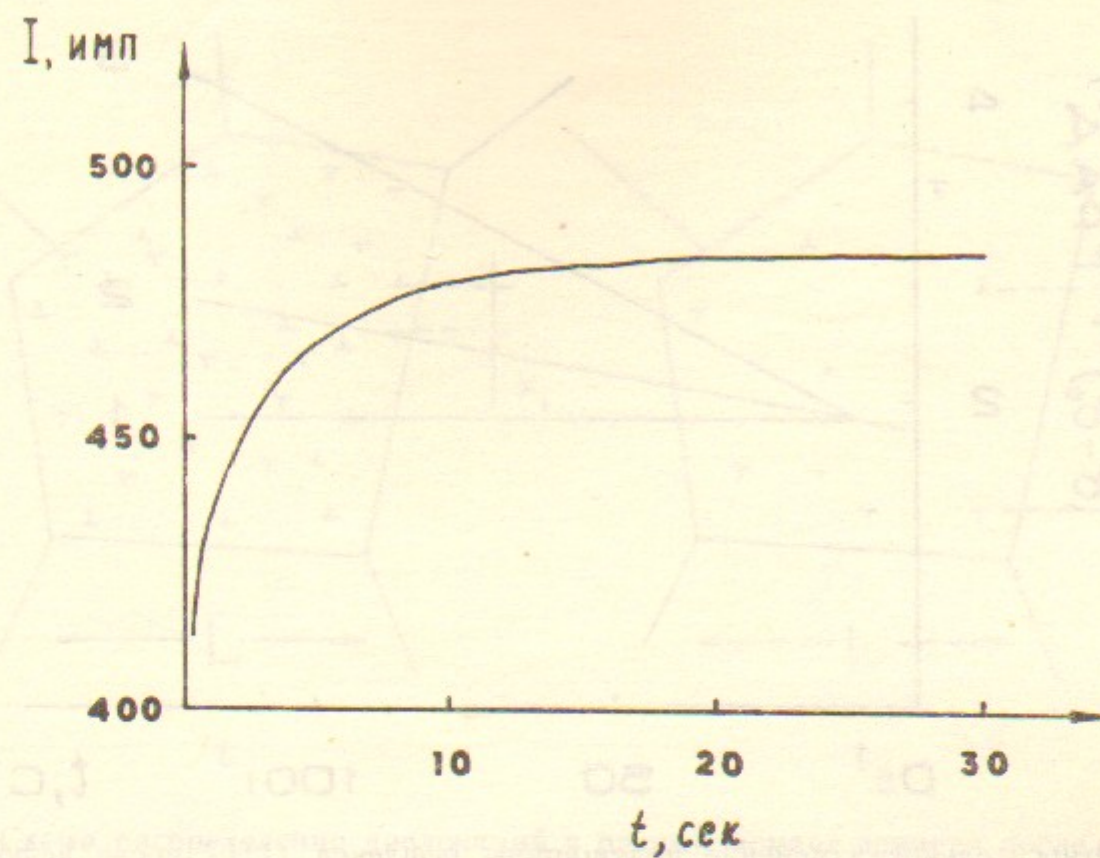


Рис. 4. Временная зависимость интенсивности рефлекса (111) после деформации срезом.

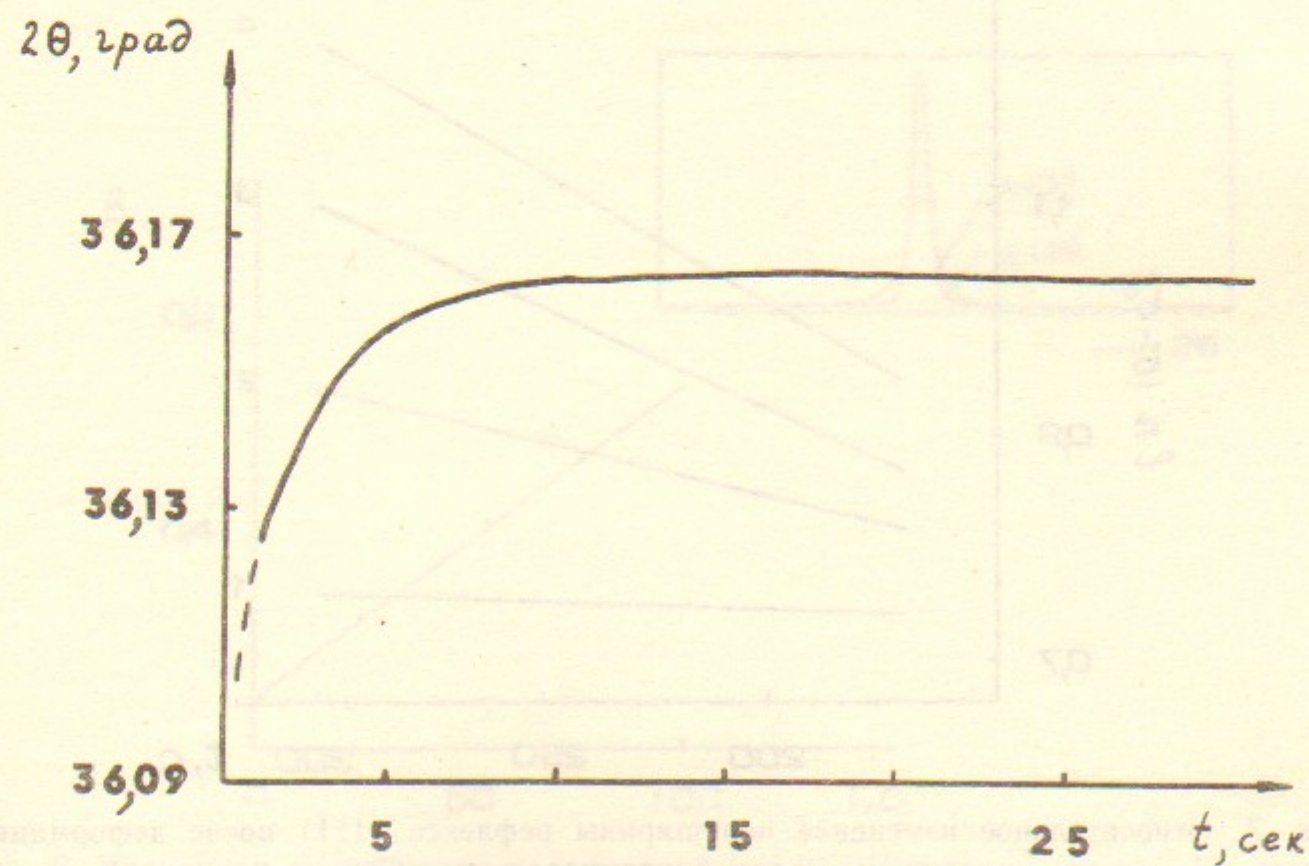


Рис. 5. Временная зависимость положения рефлекса (111) после деформации срезом.

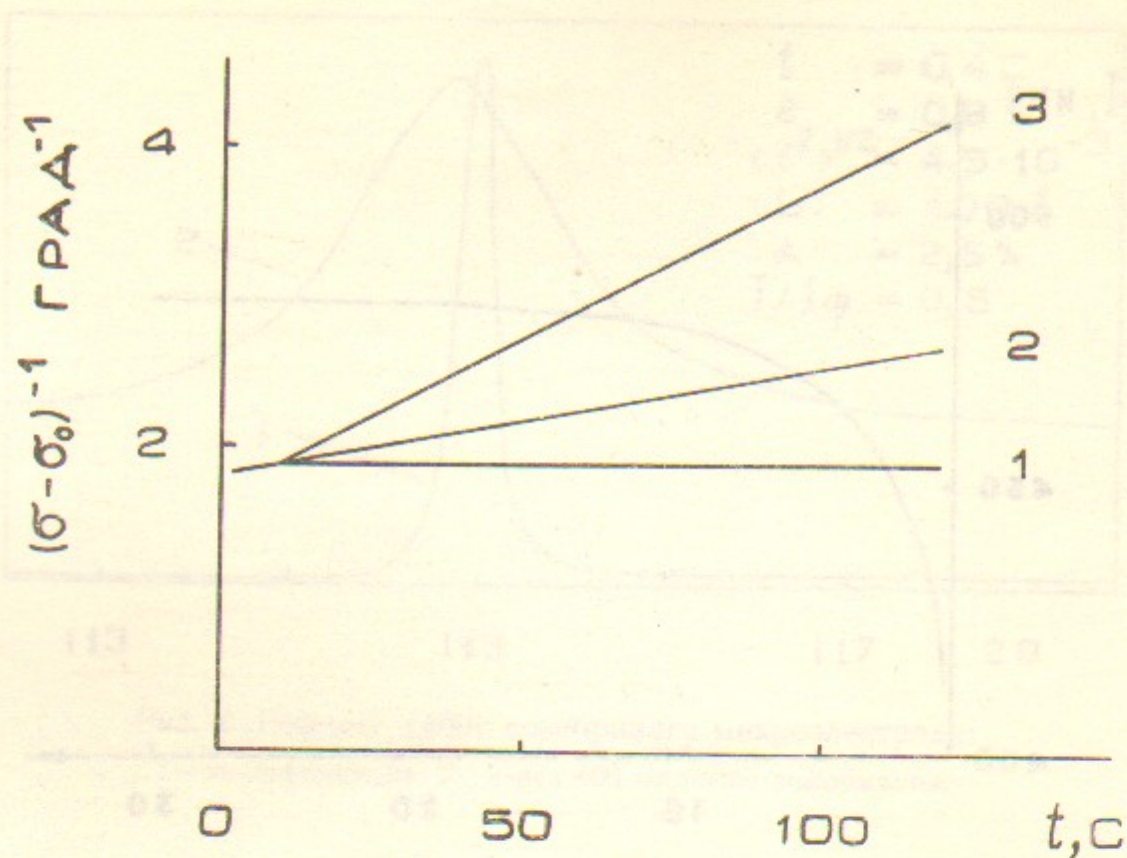


Рис. 6. Относительное изменение полуширины рефлекса (111) после деформации срезом при разных температурах (С):
1—25; 2—80; 3—95 в диапазоне времен от 0,4 до 120 с.

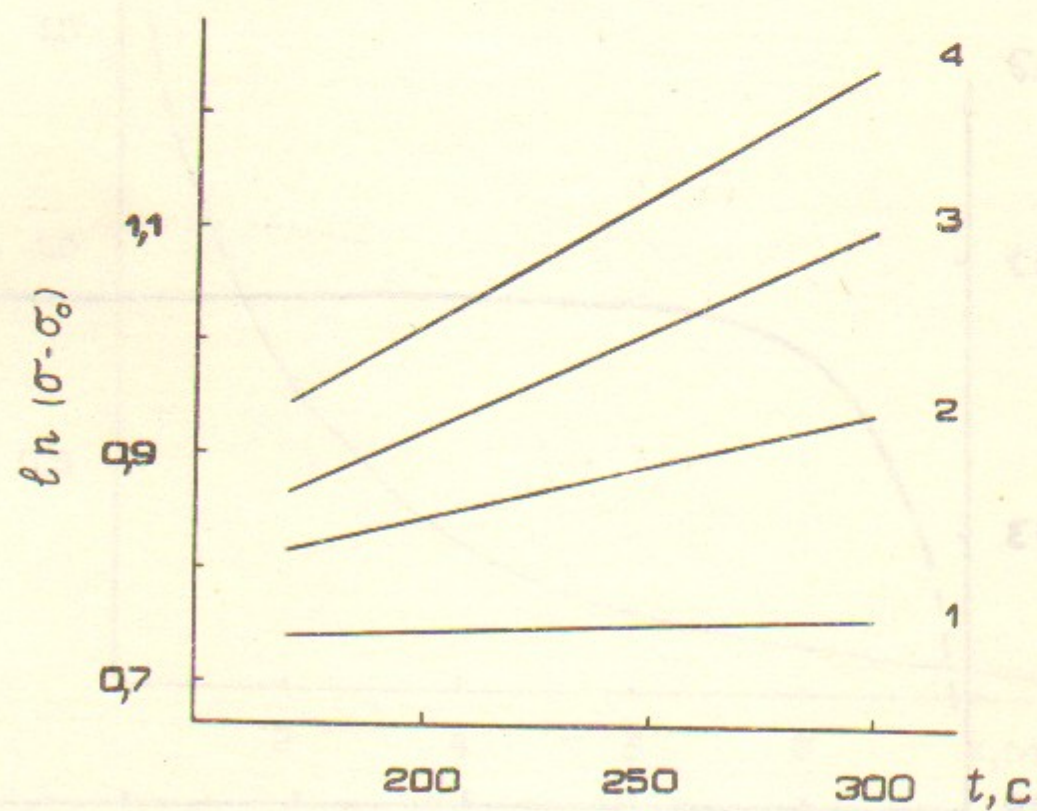


Рис. 7. Относительное изменение полуширины рефлекса (111) после деформации срезом при разных температурах (С):
1—25; 2—75; 3—80; 4—95 в диапазоне времен от 200 до 300 с.

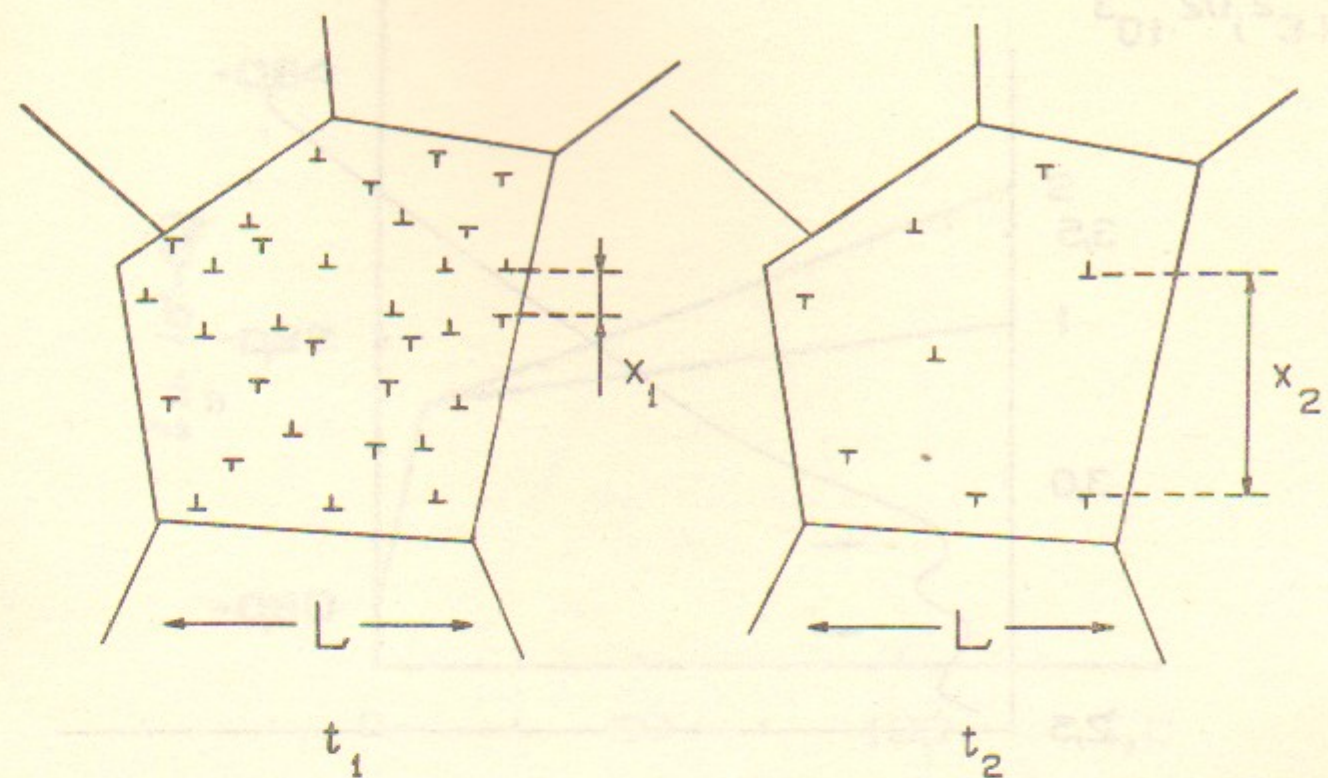


Рис. 8. Схема распределения дислокаций в разный момент времени после деформации:
 $T_1=0,4-120$ с, $T_2=200-600$ с. L —расстояние между стоками дислокаций, x — расстояние между дислокациями.

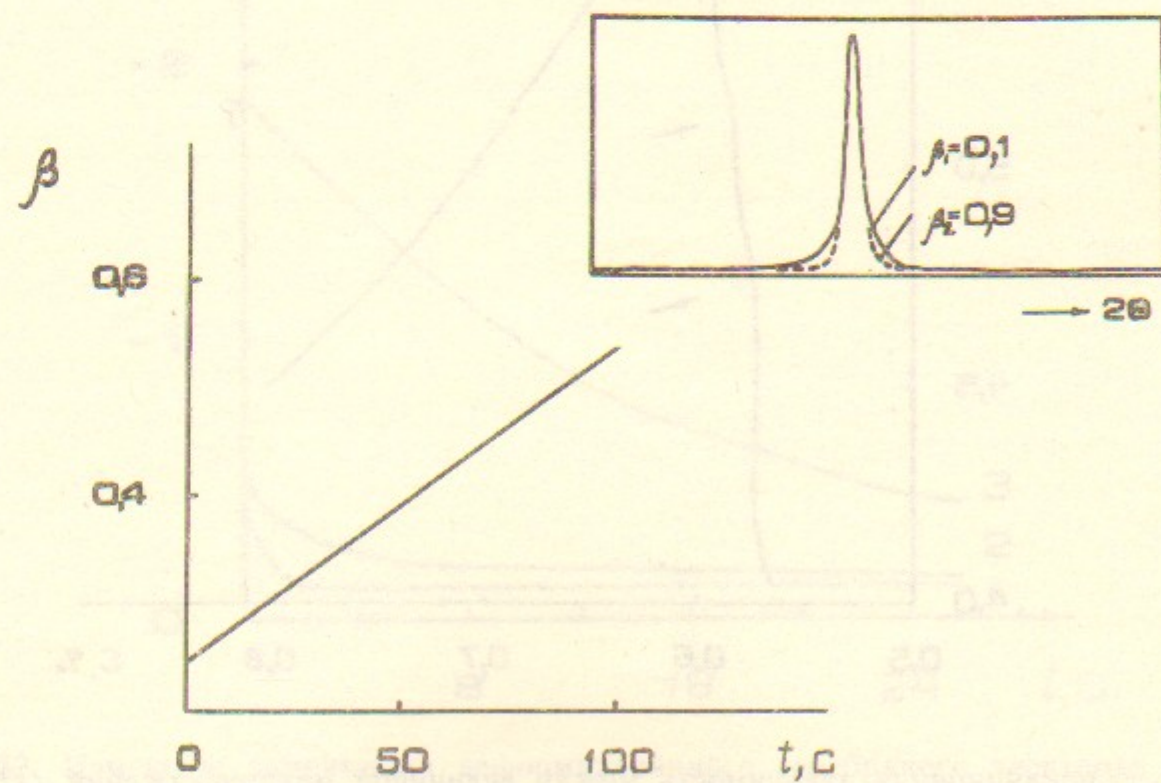


Рис. 9. Временная зависимость параметра β после деформации срезом. На схеме показано влияние параметра β на профиль рефлекса.

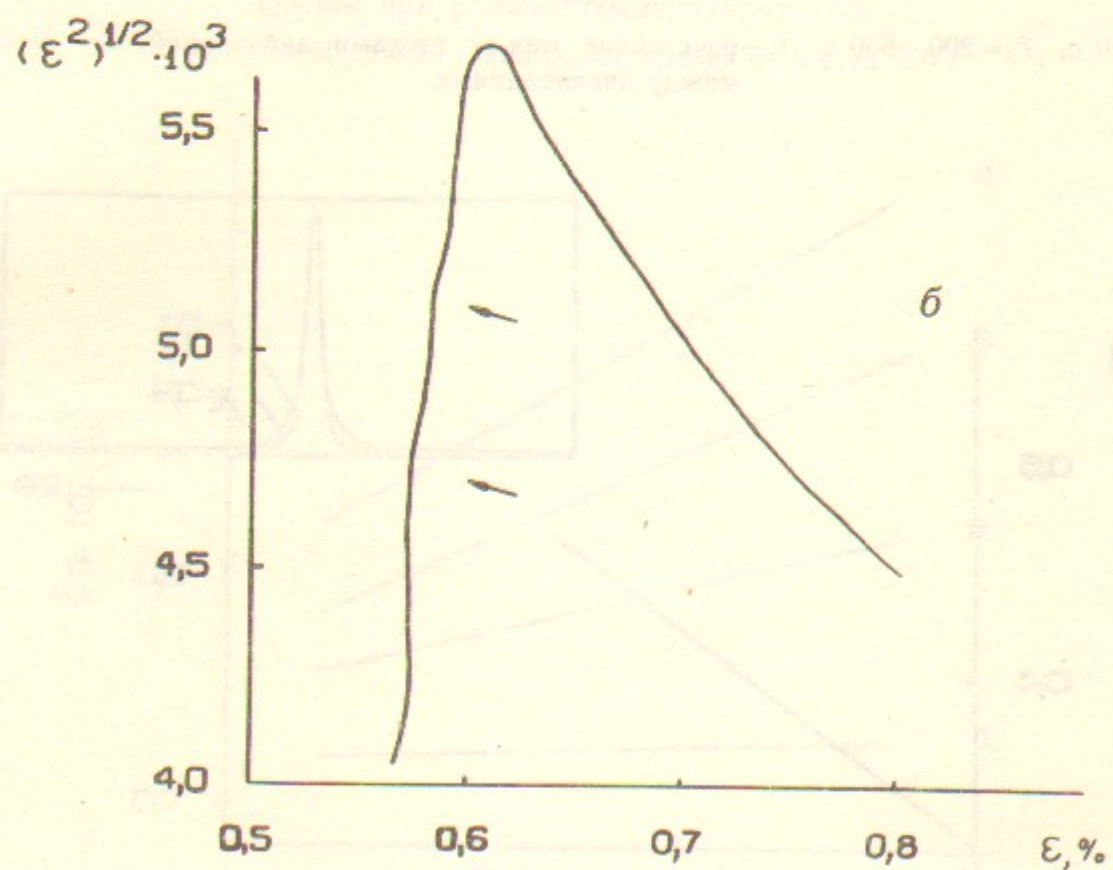
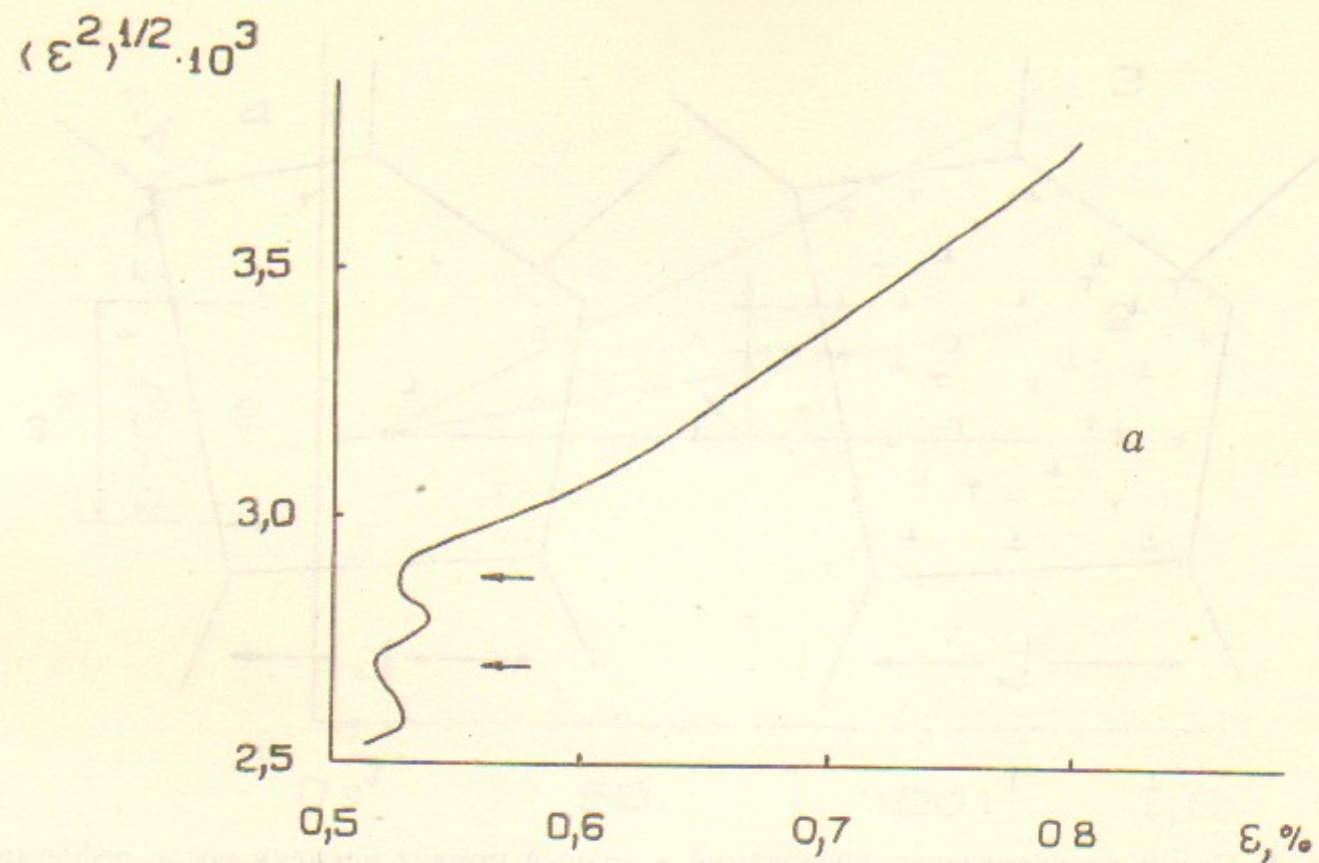


Рис. 10. Корреляционная зависимость между величиной микроискажений $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$ и истинной деформацией ϵ для рефлексов: а—(111), б—(200).

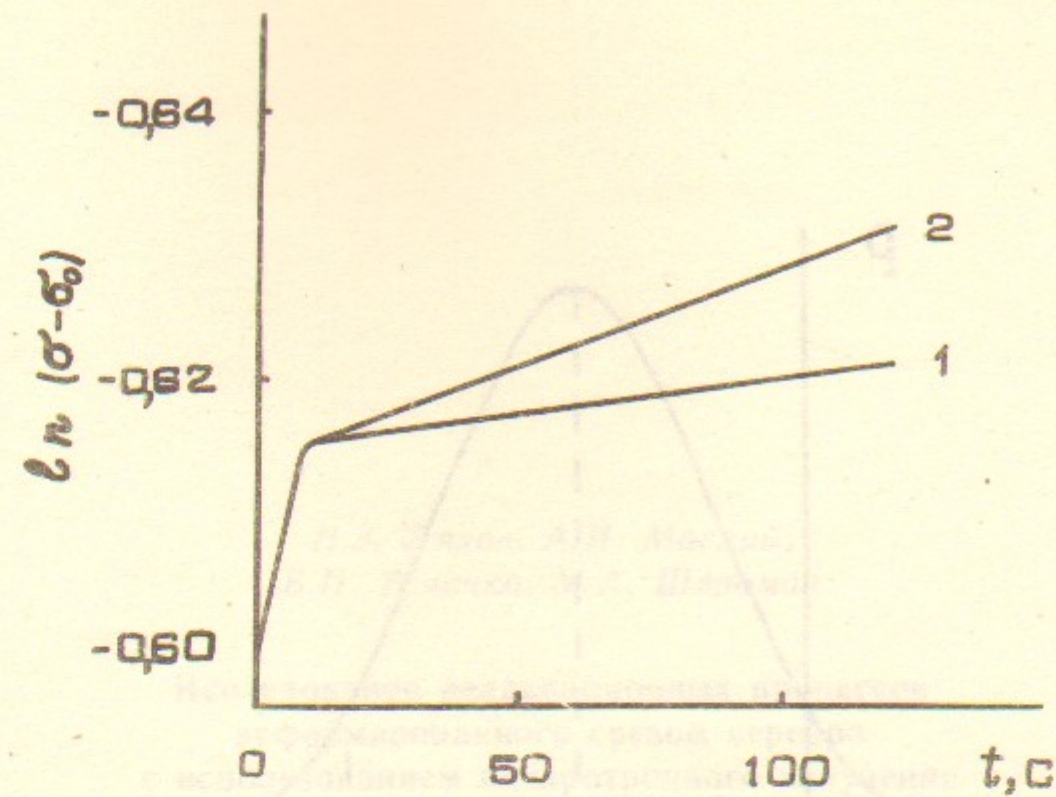


Рис. 11. Изменение σ -полуширины рефлекса (111)—при температуре 50°C после деформации срезом:

1—на воздухе, 2—при контакте с 0,1 м раствором азотнокислого серебра.

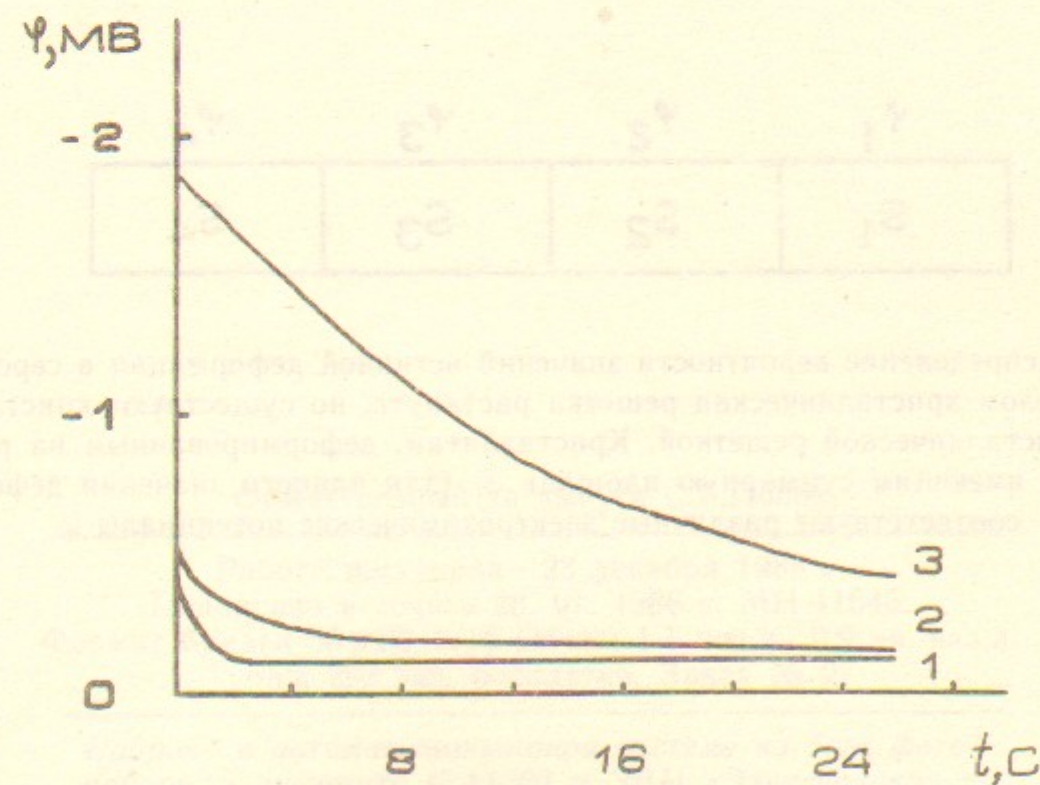
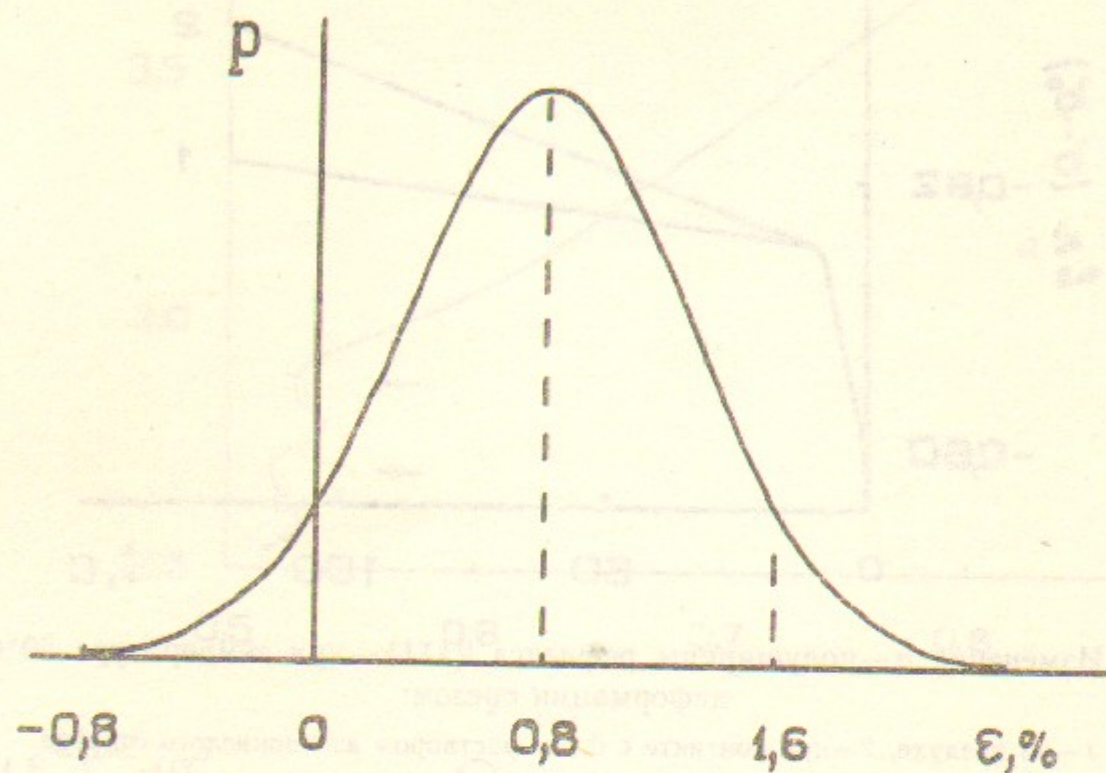


Рис. 12. Изменение потенциала деформированного серебряного электрода относительно отожженного противозэлектрода в 0,01 м растворе азотнокислого серебра при температуре (С):

1—25; 2—5; 3—(-5).



ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
S_1	S_2	S_3	S_4

Рис. 13. Распределение вероятности значений истинной деформации в серебре после среза. В целом кристаллическая решетка растянута, но существуют кристаллиты со сжатой кристаллической решеткой. Кристаллитам, деформированным на различную величину и имеющим суммарную площадь S_i (для данного значения деформации), соответствуют различные электрохимические потенциалы ψ_i .

Н.З. Ляхов, А.И. Маслий,
Б.П. Толочко, М.А. Шеромов

Исследование релаксационных процессов
деформированного срезом серебра
с использованием синхротронного излучения

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила — 23 декабря 1985 г.
Подписано в печать 28. 01. 1986 г. МН 11645.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 27

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.