

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Р. Ф. Бекишев, Б. И. Костылев, А. И. Скороспешкин

(Представлена научным семинаром  
кафедр электрических машин и общей электротехники)

Поверхностная пленка, образующаяся на коллекторах электрических машин, оказывает весьма существенное влияние на коммутацию. Надежность работы скользящего щеточного контакта и коллекторной электрической машины в целом во многом определяется состоянием и свойствами поверхностной пленки на коллекторе. Поэтому изучение действительной природы коллекторных пленок, исследование их фазового состава и структуры является весьма актуальным. К тому же по данному вопросу отсутствуют обстоятельные исследования [1].

В настоящее время физические свойства и особенности строения тонких пленок, образующихся в процессе поверхностного окисления различных металлов, в том числе меди, изучены достаточно полно [2]. Данные исследования проводятся, как правило, с применением современных физико-химических методов, таких как электронно-микроскопическое изучение тонких пленок, электронографическое исследование и рентгеноструктурный анализ.

При изучении коллекторных пленок остаются справедливыми общие принципы, характерные для обычных окисных пленок на металлах при проведении электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований.

Изучение поверхностных пленок, образованных как на коллекторах электрических машин, так и на контактных кольцах щетками различных марок, нами проводилось по трем основным направлениям:

- 1) Исследование микроструктуры коллекторных пленок.
- 2) Определение природы, ориентации и фазового состава пленок.
- 3) Измерение толщины поверхностных пленок.

Используемый для исследования микроструктуры коллекторных пленок электронный микроскоп УЭМБ-100 имеет диапазон электронно-оптического увеличения 250—150 000 и разрешаемое расстояние 15Å. Следовательно, можно различать детали на поверхностной пленке размером порядка нескольких атомов и достаточно точно определить структуру и морфологию пленок.

Определение природы и ориентации составляющих, а также фазового состава поверхностных пленок проводилось методом электронографического исследования. Возможности электронного микроскопа УЭМБ-100 позволяют проводить параллельное исследование поверхностных пленок, а именно, получение микроскопических снимков и осуществление микродифракции.

Количественный фазовый анализ коллекторных пленок, то есть

установление числа фаз и их содержания, производился нами методом рентгеноструктурного исследования с использованием установки УРС-50 И/М.

Как электронно-микроскопические и электронографические, так и рентгеноструктурные исследования поверхностных пленок проводились при съемке на прохождение на специально подготовленных образцах. При этом необходимо отделение поверхностных пленок от подложки без их разрушения.

Измерение толщины поверхностных пленок возможно также после их отделения от меди коллектора. Как показали исследования, наиболее перспективным методом измерения толщины коллекторных пленок является интерференционный метод, имеющий чувствительность  $10 \text{ \AA}$  для поверхности, равной  $10^{-4} \text{ мм}^2$ . В данном исследовании измерение толщины пленок проводилось с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4.

Основная трудность подготовки образцов для проведения указанных выше исследований заключается в возможности отделения тонких поверхностных пленок от меди коллектора. При отделении поверхностных пленок должны быть выполнены следующие условия:

1. Коллекторные пленки должны быть отделены без разрушения.
2. В процессе отделения пленки от подложки должны оставаться постоянными структура, поверхностное строение и фазовый состав коллекторной пленки.
3. Толщина коллекторной пленки до отделения от подложки и после отделения не должна изменяться.

В настоящее время для отделения окисных пленок металлов без их разрушения широкое применение получили электрохимические и химические методы. Анализ и опытная проверка многочисленных методик [3], разработанных для отделения пленок от медной подложки, показали, что некоторые методики применимы для отделения поверхностной пленки, образующейся на коллекторных и контактных кольцах. В данной работе использовались электрохимический и химический способы отделения политуры от меди коллектора.

Электрохимический метод базируется на анодном растворении меди под слоем политуры. Составы электролитов и условия анодного растворения меди, принятые при отделении поверхностной пленки с коллекторов и контактных колец, в настоящем исследовании представлены в табл. 1.

Таблица 1

№	Состав электролита	Катод	U (в)	Плотность тока ма/см <sup>2</sup>	Время, мин.	Температура, С°
1	Однонормальный раствор медного купороса	графит	8 ÷ 12	50 ÷ 100	2 ÷ 3	20°
2	70% раствор ортофосфорной кислоты в дистиллированной воде	графит	3 ÷ 6	50 ÷ 100	10 ÷ 12	20°
3	40% раствор ортофосфорной кислоты в метиловом спирте	графит	6 ÷ 10	20 ÷ 50	10 ÷ 15	20°
4	Ортофосфорная кислота d = 1,04, желатин 40 г	графит	12 ÷ 15	100 ÷ 200	1 ÷ 2	40 ÷ 50

Процесс отделения поверхностной пленки от ламелей коллектора и контактных колец химическим методом производился в 4÷5% растворе брома в метиловом спирте в течение 3÷5 мин.

Предварительно перед погружением в раствор (при использовании любого из указанных методов) производилось препарирование образца. Ламель коллектора или часть контактного кольца покрывалась инертной пленкой (цапонлак, парафин) так, чтобы лишь участки с политугой соприкасались с раствором. Чтобы усилить растворение меди под поверхностной пленкой, политура насакалась на квадратики размером 2÷4 мм. После погружения в раствор коллекторная пленка набухает, однако еще достаточно прочно связана с образцом. Поэтому непосредственное отделение производилось в промывочной жидкости, например, в метиловом спирте, используя плохую смачиваемость пленки. В некоторых случаях, например, при отделении очень тонких коллекторных пленок последние невозможно отделить в промывочной жидкости. Поэтому после извлечения из раствора, промывки и просушки на воздухе на участки коллекторной пленки, подлежащие отделению, наносился слой желатина, растворенного в теплой дистиллированной воде. Спустя 5÷10 мин. слой желатина затвердевает и легко стягивает поверхностную пленку с меди коллектора. При промывании затем в дистиллированной воде слой желатина легко растворяется. Применение желатина при отделении коллекторных пленок значительно облегчает процесс.

Использование указанных выше методов отделения пленки от подложки возможно лишь в том случае, если пленка не повреждена. В связи с этим, особое внимание уделялось подготовке коллектора и процессу наработки поверхностной пленки.

Наработка поверхностной пленки производилась на специальной установке, вращающиеся части которой были тщательно отбалансированы, амплитуда биений каждого из коллекторов не превышала 2,5 мк. Обработка коллекторов и контактных колец, насажденных на вал с напрессованными подшипниками, производилась алмазным инструментом. Чистота поверхности после алмазной обработки достигала 8—9 класса. Коллекторы и контактные кольца были выполнены из меди М1. После тщательной притирки щеток коллекторы работали в течение 120 часов без тока и 300 часов при плотности тока, равной 10 а/см<sup>2</sup>.

Для исследования применялись электрографитированные щетки марок ЭГ-4Э; ЭГ-14; ЭГ-63; ЭГ-74;

После наработки поверхностной пленки коллектор разделяется на отдельные ламели, политура с которых отделяется одним из рассмотренных выше методов.

Дальнейшая подготовка образцов определяется выбранным методом исследования.

Электронно-микроскопическое и электронографическое изучение поверхностной пленки проводилось в проходящем пучке электронов. Как показали исследования, структура и фазовый состав коллекторной пленки не изменялись при использовании различных способов отделения пленки от подложки.

С целью получения более полной информации из электронно-микроскопических снимков производилось исследование изображений как в светлом, так и в темном поле. Светлопольные микрофотографии дают изображение от всех кристаллов поверхностной пленки, через которую проходит неотклоненный пучок электронов. Контраст в изображении создается за счет различного поглощения электронов в участках пленки, имеющих различную плотность. Интерпретация светлопольных фотографий позволяет выявить картину распределения отдельных составляющих коллекторной пленки и общее количество кристаллов.

Темнопольные микрофотографии позволяют получить изображение только от части поверхности исследуемой коллекторной пленки, предварительно выбранной с помощью электронной дифракции. Интерпретация микрофотографий, полученных в темном поле, позволяет определить форму и размеры отдельных кристаллов при известном увеличении изображения.

На рис. 1 представлена светлопольная микрофотография поверхностной пленки, образованной щетками ЭГ-74. Снимок сделан при электронно-оптическом увеличении, равном 87000. Данное изображение достаточно полно отражает общую структуру поверхности пленки. Широкие темные (на позитиве) полосы представляют собой утолщенные участки пленки, состоящие из аморфизированного графита, смешанного с мелкокристаллической закисью меди  $Cu_2O$ . Темные частицы округлой формы — более крупные кристаллы  $Cu_2O$ .

Микроэлектронограмма с тонкого участка поверхностной пленки приведена на рис. 2. Расчет электронограммы показывает, что дифракционные кольца соответствуют линиям закиси меди  $Cu_2O$ .

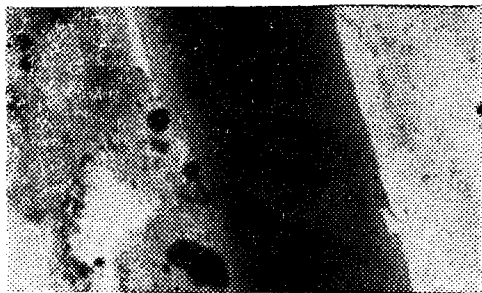


Рис. 1

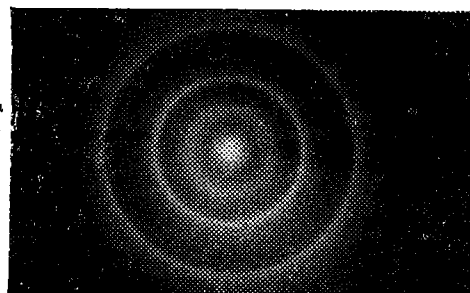


Рис. 2

Темнопольная микрофотография в свете яркого кольца на электронограмме приведена на рис. 3. Светлые (на позитиве) участки представляют собой частицы закиси меди  $Cu_2O$ . Электронно-оптическое увеличение равно 105 000. Кристаллы закиси меди, как видно из микрофотографии, имеют неправильную форму. Размеры кристалликов колеблются в пределах от 150 Å до 2000 Å.

Исследование поверхностных пленок, образованных щетками марки ЭГ-63, проводилось также при использовании различных способов отделения пленки от ламели коллектора. На рис. 4 представлена микрофотография пленки, отделенной электрохимическим методом в раство-

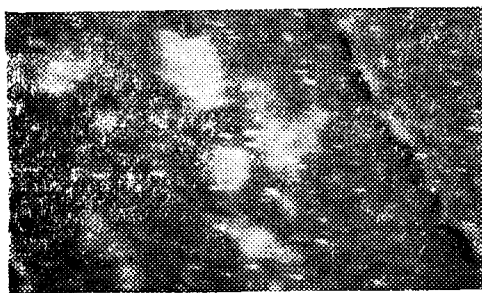


Рис. 3

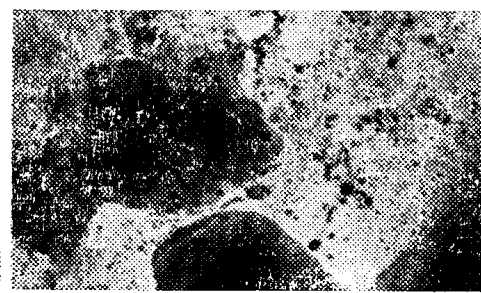


Рис. 4

ре медного купороса. Электронно-оптическое увеличение — 102 000. Анализ микрофотографии показывает, что структура пленки отличается значительной неоднородностью по толщине. Утолщенные полосы пленки вытянуты вдоль дорожки скольжения. На поверхности пленки видны темные чешуйки графита.

Микроэлектронограмма от отдельного участка пленки характеризуется наличием сплошных колец от мелкокристаллической закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  и точечной дифракции от кристаллов графита (рис. 5).

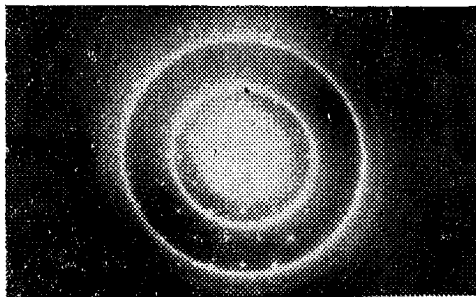


Рис. 5

Анализ проведенных электронно-микроскопических и электронографических исследований показал, что поверхностные пленки, образованные на коллекторах и контактных кольцах щетками различных марок, включают в основном закись меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  в мелкокристаллическом состоянии, а также аморфный и кристаллический графит. Размеры частиц закиси меди колеблются в широких пределах (от 200 Å до 2000 Å). Кристаллы графита имеют размеры (100 ÷ 4000 Å). На некоторых электронограммах встречаются линии с периодами 1,7 Å, 1,5 Å, которые можно отнести к кристаллической решетке окиси меди  $\text{CuO}$ . Однако эти линии встречаются редко и очень слабо выражены, поэтому можно считать, что окись меди  $\text{CuO}$ , если и имеется в коллекторных пленках, то в очень небольших количествах (не более 10%).

В подавляющем большинстве случаев на электронограммах отсутствуют линии с периодами 2,45 Å и 2,12 Å, что может быть объяснено ориентацией кристалликов  $\text{Cu}_2\text{O}$  перпендикулярно направлениям (111) к поверхности меди коллектора.

Линии аморфного графита практически не различаются на электронограммах в тех случаях, когда имеются четкие линии закиси меди. Это явление типично для смеси двух фаз, одна из которых более упорядочена [4]. Однако возможны случаи, когда линии закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  могут присутствовать с линиями мелкокристаллического графита.

Проведение количественного фазового анализа пленок осуществлялось рентгеноструктурным методом.

Задача рентгеновского фазового анализа заключается в определении картины интерференции интенсивностей интерференционных линий при взаимодействии рентгеновских лучей с исследуемым веществом.

Анализ коллекторных пленок, образованных щетками различных марок, проводился на ионизационной рентгеновской установке УРС-50 И/М, предназначенной для измерения абсолютных интенсивностей рентгеновских отражений.

Рентгеновский фазовый анализ начинается с качественного определения фаз, составляющих исследуемую поверхностную пленку. Определение компонентов, включенных в состав коллекторных пленок, производилось путем сравнения рассчитанных межплоскостных расстояний

и измеренных относительных интенсивностей интерференционных максимумов с теоретическими данными [5] для предполагаемых элементов или соединений.

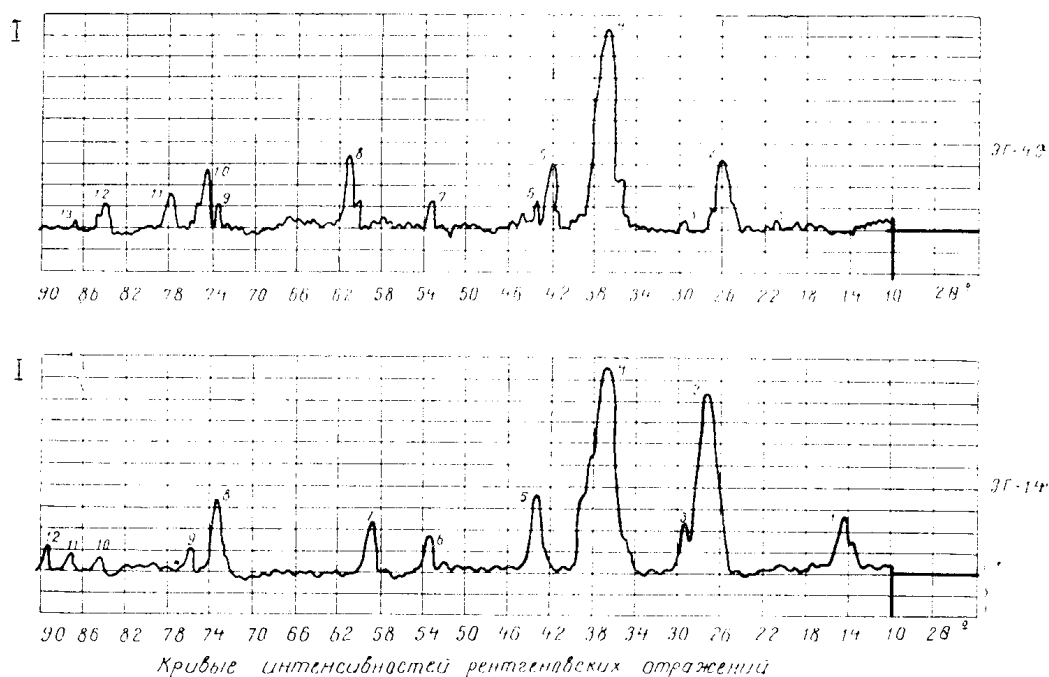


Рис. 6

На рис. 6 представлена запись кривых интенсивностей отражений, полученных на рентгеновской установке УРС-50 И/М от поверхностных пленок, образованных щетками ЭГ-4Э и ЭГ-14. По оси ординат отложены абсолютные значения интенсивностей рентгеновских отражений, по оси абсцисс — двойной угол отражения.

Анализ рентгенограмм и результатов их расчета показывает, что для исследованных поверхностных пленок интерференционные максимумы отражений соответствуют в большинстве случаев межплоскостным расстояниям закиси меди и графита. Интерференционные максимумы наблюдаются от всех основных плоскостей отражения (hkl). На рентгенограммах в небольших количествах встречаются линии, соответствующие межплоскостным расстояниям для окиси меди  $\text{CuO}$ , однако интенсивность этих линий очень слабая.

Таким образом, поверхностные пленки, образованные на коллекторах щетками различных марок, состоят, как правило, из закиси меди и графита, присутствующих в различных количествах в зависимости от марки щетки.

Рассматривая поверхностную пленку как двухфазную смесь, соотношение количеств закиси меди и графита в пленке можно определить методом гомологических пар. Интенсивность интерференционных линий каждой из фаз пропорциональна количеству этой фазы в поверхностной пленке и отражающей способности кристалла при отражении от данной плоскости (hkl).

Проведенный указанным методом количественный фазовый анализ исследованных коллекторных пленок позволил определить с достаточной точностью (10—15%) содержание закиси меди и графита в поверхностных пленках (табл. 2).

Таблица 2

№	Марка щетки	Содержание Cu <sub>2</sub> O, %	Содержание графита, %
1	ЭГ-4Э	55	45
2	ЭГ-14	62	38
3	ЭГ-63	67	33
4	ЭГ-74	70	30

Как видно из табл. 2, наибольшее содержание закиси меди имеют коллекторные пленки, образованные твердыми электрографитированными щетками (ЭГ-74, ЭГ-63). Количество закиси меди в поверхностных пленках, сформированных мягкими электрографитированными щетками ЭГ-4Э, значительно меньше, однако содержание графита и в этом случае не достигает 50%.

Большое количество закиси меди во всех исследованных поверхностных пленках требует при изучении явлений в скользящем щеточном контакте учитывать полупроводящие свойства коллекторных пленок. Однако в этом случае необходимо знать толщину поверхностной пленки.

Электронно-микроскопические и электронографические исследования коллекторных пленок показали, что их толщина может колебаться в широких пределах по ширине дорожки скольжения.

Гравиметрическим методом можно измерить лишь среднее значение толщины поверхности пленок на площади не менее 10 мм<sup>2</sup>. Точность метода не превышает 25÷30%. Использование данного метода определения толщины коллекторных пленок практически невозможно при неизвестном содержании отдельных составляющих пленки. Поэтому измерению толщины пленок должны предшествовать сложные исследования по количественному определению содержания компонентов в коллекторных пленках.

Измерение толщины поверхностных пленок производилось нами интерференционным методом на микроинтерферометре Линника МИИ-4, который позволяет определять толщины пленок в пределах от 300 Å до 15000 Å. В поле зрения микроинтерферометра наблюдаются одновременно интерференционные полосы и исследуемый участок поверхностной пленки. Поверхностная пленка помещена на стеклянную подложку и покрыта тонким слоем алюминия для повышения отражающей способности. На границе слоя (пленка — стекло) меняется разность хода между интерферирующими лучами, в результате чего интерференционные полосы смещаются. При измерении величина искривления интерференционной полосы выражается в долях интервала между интерференционными полосами. Величина интервала между полосами, а также смещение интерференционных полос определялись с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-1-15.

Интерференционная картина, полученная от коллекторной пленки, образованной щетками ЭГ-74, представлена на рис. 7.

Как показали расчеты интерференционных картин, толщина коллекторных пленок на различных участках колеблется в широких пределах. Результаты измерений толщины коллекторных пленок, образованных щетками различных марок, представлены в табл. 3. Измерения проводились в трех, различных по толщине, точках коллекторной пленки.

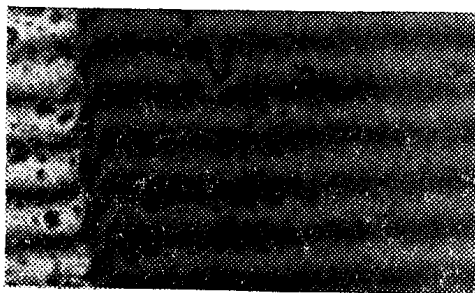


Рис. 7

Таблица 3

№	Марка щетки	Толщина пленки $\overset{\circ}{\text{A}}$			
		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_{\text{ср}}$
1	ЭГ-74	600	2700	5000	2760
2	ЭГ-63	480	1300	3500	1750
3	ЭГ-14	360	810	2000	1050
4	ЭГ-4Э	270	540	1000	600

Анализ табл. 3 показывает, что для всех исследованных пленок их толщина претерпевает значительные изменения по ширине дорожки скольжения. Пленки, образованные щетками ЭГ-4Э, значительно тоньше пленок, созданных щетками ЭГ-74, хотя условия наработки и методика подготовки образцов были одинаковыми.

Таким образом, твердые электрографитированные щетки создают коллекторные пленки большей толщины, нежели мягкие щетки.

При исследовании пленок, образованных щетками разных полярностей, интерференционным методом существенного различия в толщине политуры под катодными и анодными щетками не обнаружено. Толщина пленки в различных точках исследуемого участка в обоих случаях претерпевала значительные изменения.

В этой связи необходимо отметить, что различный уровень контактного падения напряжения под анодно- и катоднополяризованной щетками нельзя объяснить влиянием толщины поверхностных пленок. Тем более, что сопротивление тела поверхностной пленки незначительно.

На наш взгляд, различия, обусловленные полярностью щетки, определяются толщиной запирающего слоя, образующегося между поверхностной пленкой и медью коллектора или контактного кольца.

### Выводы

1. Электронно-микроскопические, электрографические и рентгеноструктурные исследования позволяют с достаточной точностью определять структуру, фазовый состав и строение поверхностных пленок, образующихся на коллекторах и контактных кольцах.

2. Коллекторные пленки состоят, как правило, из мелкокристаллической закиси меди и графита, встречающегося как в аморфном состоянии, так и в виде ориентированных кристаллов.

3. Для количественного определения содержания фаз в поверхност-



ной пленке целесообразно применять рентгеновский фазовый анализ. Исследования, проведенные методом гомологических пар, показали, что электрографитированные щетки формируют коллекторные пленки со следующим содержанием закиси меди: ЭГ-4Э — 55%, ЭГ-14 — 62%, ЭГ-63 — 67%, ЭГ-74 — 70%.

4. Наиболее перспективным методом измерения толщины поверхностных пленок является интерференционный метод, при использовании которого обнаружено, что толщина коллекторных пленок, образованных щетками различных марок, колеблется в пределах: ЭГ-4Э —  $270 \div 1000 \text{ \AA}$ , ЭГ-14 —  $360 \div 2000 \text{ \AA}$ , ЭГ-63 —  $480 \div 3500 \text{ \AA}$ , ЭГ-74 —  $600 \div 5000 \text{ \AA}$ .

Различия, обусловленные полярностью щетки, определяются не толщиной поверхностной пленки, а толщиной запирающего слоя, образованного между пленкой и медью коллектора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Б. Грановский, В. С. Титов. Электронно-микроскопическое изучение поверхностной пленки коллекторов электрических машин. «Электротехника», № 1, 1968.
  2. В. С. Бенар. Окисление металлов. Т. 1, Изд-во «Металлургия», 1968.
  3. П. Жаке. Электролитическое и химическое полирование. «Металлургиздат», 1959.
  4. З. Г. Пинкслер. Дифракция электронов. Изд-во АН СССР, 1950.
  5. Л. И. Миркин. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. «Физматгиз», 1961.
-