

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ивановский государственный химико-технологический университет

А.Э. Козловский

АТЛАС МИКРОСТРУКТУР  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Учебно-наглядное пособие  
по материаловедению

Иваново 2013

УДК 620.17

Козловский, А.Э. Атлас микроструктур металлических сплавов: учебно-наглядное пособие по материаловедению/ А.Э. Козловский; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2013. – 102 с.

В атласе приведены макро- и микроструктуры металлов и сплавов, исследованных при помощи металлографического микроскопа. Изложена техника металлографических исследований. Дано описание основных элементов микроструктуры стали и чугуна. Показано влияние термической обработки на структуру железоуглеродистых сплавов. Приведены структуры основных промышленных цветных сплавов. Предложены к решению задачи по металлографии.

Предназначен для студентов дневной и заочной формы обучения по направлению подготовки бакалавров 151000 – Технологические машины и оборудование.

Ил. 75.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензент

доктор технических наук В.Н.Блиничев

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

© Козловский А.Э., 2013

© Ивановский государственный химико-технологический университет, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование структуры металлов и сплавов, являющееся основой современного металловедения, осуществляется как прямыми, так и косвенными методами.

К числу прямых методов относятся: 1) исследование макроструктуры невооруженным глазом по виду изломов или шлифованных и протравленных макрошлифов; 2) исследование микроструктуры при помощи оптического микроскопа с увеличением до 2000 раз, а также с применением электронного микроскопа с увеличением до 25000 раз и более; 3) исследование атомно-кристаллической структуры с помощью рентгенографического анализа, позволяющего различать расстояния порядка  $10^{-10}$  м.

К числу косвенных методов относятся: магнитный, дилатометрический, электрометрический и другие физические методы исследования, которые хотя и не дают прямого изображения структуры, но все же позволяют вскрыть кинетику происходящих в ней превращений.

Кроме того, существует ряд вспомогательных методов исследования структуры путем определения твердости и микротвердости, механических и технологических свойств, а также проведения химического и спектрального анализа.

В атласе приведены: макроструктуры металлов и сплавов, наблюдаемые невооруженным глазом, и большое количество микроструктур, исследованных при помощи металлографического микроскопа, преимущественно оптического. Этот метод исследования является наиболее распространенным в лабораториях высших технических учебных заведений и особенно на производстве, где он успешно используется при разработке новых и совершенствования существующих технологических процессов термической обработки, а также при борьбе с браком и при работах над улучшением качества продукции. Одновременно приводятся также и электронные микрофотографии, позволяющие исследовать мельчайшие детали микроструктуры, неразличимые под оптическим микроскопом.

## 1. ТЕХНИКА МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Обширный опыт исследования микроструктуры металлов и сплавов, особенно при больших увеличениях, например, в 500, 1000, 2000, 10000, 20000 раз и более, показал, что точность и результаты микроскопического анализа в значительной мере зависят от техники изготовления микрошлифов. Особенно ярко это проявляется при применении электронного микроскопа, когда результаты исследования могут оказаться неверными из-за плохого изготовления как микрошлифа, так и слепка с него. Изготовление микрошлифа состоит из ряда последовательных операций: вырезки образца, подготовки его поверхности, шлифования, полирования и травления.

### **Вырезка образцов, их размеры, запрессовка в пластмассу и предварительная подготовка поверхности**

Выбор места вырезки образца для изготовления микрошлифа следует производить после осмотра исследуемого металла, особенно его макроструктуры и излома, определения твердости и технологических проб.

При исследовании причин поломки той или иной детали машины, ее износа, а также при выявлении пороков металлов образцы (микрошлифы) следует вырезать таким образом, чтобы сечение излома, поверхности износа или порока попали в плоскость шлифа. При исследовании проката или поковок необходимо брать шлифы вдоль и поперек прокатки или направления деформации при ковке. В случае исследования изделий, подвергнутых термической обработке (в особенности поверхностному упрочнению путем высокочастотной закалки), химико-термической обработке, наклепу, а также в случае исследования обезуглероженных сталей образцы следует брать так, чтобы в плоскость шлифа попали как поверхностные, так и срединные слои изделия.

При вырезке образцов необходимо сделать эскиз детали, отметив на нем места вырезки образцов и указать, какое сечение взято вдоль или поперек волокна металла. Обычно образцы для микрошлифов отрезают ножовкой. Твердые и хрупкие материалы можно отламывать ударами молотка, либо отрезать образцы при сильном охлаждении водой тонким абразивным кругом; можно также отрезать образцы и электроискровым методом. Нагрев образца при вырезке, способный вызвать отпуск закаленных сплавов и, следовательно, изменить их структуру, должен быть исключен.

Наиболее удобными размерами образцов для изготовления микрошлифов являются: площадь основания около 12x12 мм и высота 10 мм; если шлиф цилиндрический, то при той же высоте диаметр основания должен быть около 12 мм. В случае особой трудности деления образца на части можно изготавливать шлифы и больших размеров. Однако

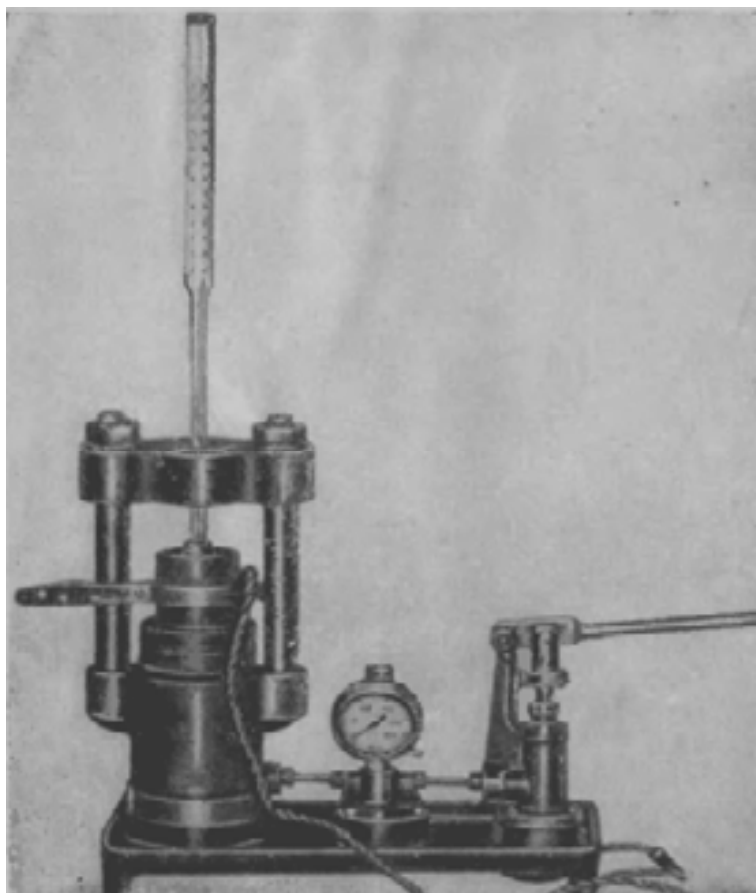


четыре отдельных шлифа площадью 15x15 мм можно изготовить значительно быстрее и лучше, чем один шлиф площадью 30x30 мм.

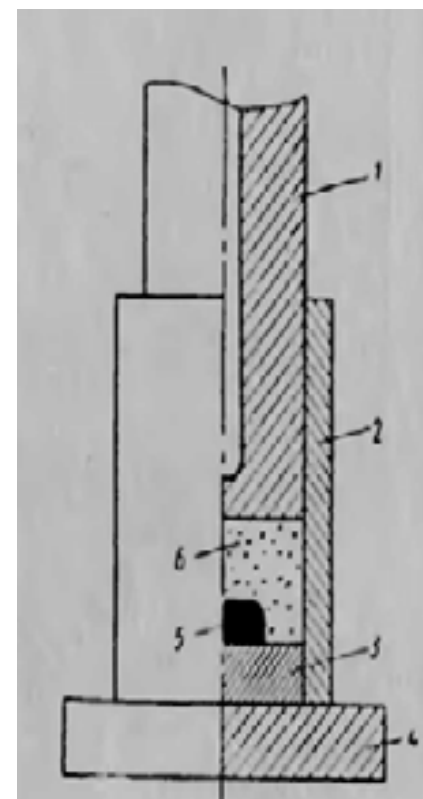
При изготовлении образцов, плохо устанавливающихся на микроскопе или неудобных для изготовления, например, малого размера, а также при изготовлении образцов из листов или проволоки следует применять зажимы или запрессовывать образцы в прозрачную пластмассу. Запрессовка образцов, из которых изготавливаются микрошлифы, производится с помощью небольшого ручного гидравлического пресса (рис. 1, а) с пресс-формой, обогреваемой электрическим током. В поршень пресс-формы вставляется термометр. Пресс снабжается дополнительным приспособлением для выпрессовки залитых образцов (микрошлифов). Пресс-форма (рис. 1, б) имеет следующие основные детали: поршень 1 с отверстием для термометра, втулку 2, шайбу 3 и опорную плиту 4.

Материалом для запрессовки служит технический безэмульсионный акрилатный порошок 6 с температурой плавления 80—90 °С, которым засыпается образец (микрошлиф) 5. Запрессовка образца в пластмассу производится при нагреве примерно до 100—110 °С и давлении 5 МПа; после охлаждения до комнатной температуры залитый образец-микрошлиф выпрессовывается.

Исследуемую плоскость образца обрабатывают напильником, причем поверхность должна быть ровной, без видимых завалов. При опиливании надо умеренно нажимать на напильник, чтобы на шлифе не образовывались чрезмерно глубокие царапины, или плоскость шлифа предварительно шлифуют абразивным кругом (шлифы твердых материалов – электрокорундовым абразивным кругом средней твердости, например, С1 или С2 и средней зернистости). Во избежание отпуска плоскости шлифа образцов из закаленной стали необходимо при обработке шлифовальным кругом предотвратить нагрев исследуемой поверхности образца выше 150 °С, для чего рекомендуется непрерывно охлаждать образец водой. На рис. 2, б показана структура закаленной стали, изменившаяся в троостит отпуска (темная игольчатая структура) вследствие нагрева поверхности образца выше 400 °С. Действительная структура была мартенситной (рис. 2, а).



а)



б)

Рис. 1. Пресс для запрессовки микрошлифов в прозрачную пластмассу: а – общий вид; б – схема пресс-формы

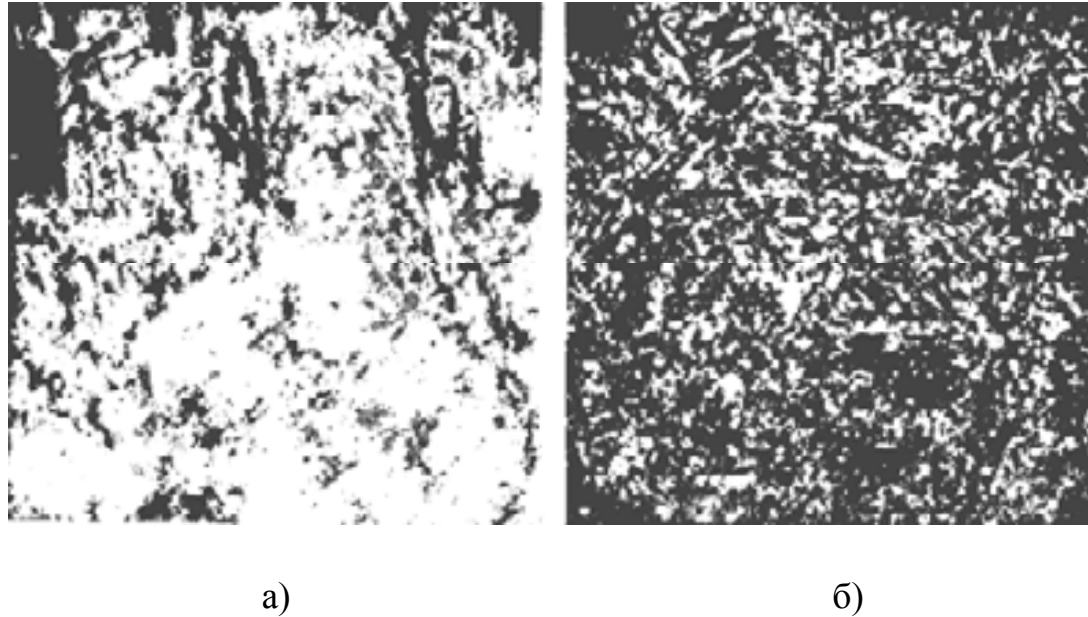


Рис. 2. Микроструктура закаленной стали; x500: а — микрошлиф отрезан шлифовальным кругом от изделия при непрерывном охлаждении водой; б — микрошлиф отрезан шлифовальным кругом от изделия без охлаждения, т. е. на воздухе

### **Шлифование, полирование и травление**

Шлифование и полирование не должны деформировать и искажать структуру на поверхности образца, разрушать и вырывать непрочные элементы структуры, например, графит и неметаллические включения в стали. При шлифовании пользуются шлифовальной бумагой с постепенно уменьшающимся размером зерна. Бумагу кладут на плоскую чугунную плиту или толстое шлифованное стекло размером не меньше листа шлифовальной бумаги. При

изготовлении большого количества шлифов шлифование можно производить на станках, при этом бумагу наклеивают на горизонтальные металлические диски диаметром 250—300 мм, вращаемые электродвигателем с числом оборотов 600—700 в минуту. При шлифовании необходимо обращать особое внимание на то, чтобы нажим на образец был плавным, и вся его поверхность полностью соприкасалась с бумагой. Плоскость шлифа должна быть ровной, без закругленных («заваленных») краев. Зерна абразива одного номера бумаги ни в коем случае не должны попадать на бумагу другого номера.

На шлифовальной бумаге образец следует шлифовать в направлении, перпендикулярном к штрихам, оставшимся после обработки напильником или абразивным кругом, до полного исчезновения этих штрихов. Затем на бумаге следующего номера образец шлифуют в направлении, перпендикулярном к предыдущему, также до уничтожения прежних штрихов и т. д. Получающиеся при этом очень тонкие и ровные штрихи облегчают и сокращают время последующего полирования.

Отшлифованный и промытый образец полируют на плоском диске, вращающемся от электродвигателя с числом оборотов в минуту не более 600. Диск должен быть покрыт туго натянутым, плотным и мягким с небольшим ворсом сукном или войлоком, либо фетром, который смачивают дистиллированной водой со взмученным мельчайшим порошком окиси алюминия. Отработанную взмученную окись алюминия собирают и вновь используют для полирования.

Окись алюминия должна быть мелко измельчена, просеяна и отмучена. Лучше ее готовить методом обжига из алюмоаммиачных или алюмоаммонийных квасцов. Обжиг производится при 1050 °С в течение 4 часов в графитовых тиглях или ваннах из нержавеющей стали, которые заполняются до половины, потому что в процессе обжига объем квасцов увеличивается в два раза. Тигли или ванны закрывают асбестом. При обжиге необходимо иметь вытяжную вентиляцию для удаления выделяющихся газов. Порошок окиси алюминия, полученный обжигом квасцов, используют многократно, что обеспечивает улучшение качества полирования. Целесообразно использовать отстойник для отмучивания мелкого и чистого порошка окиси алюминия, измельченного в шаровой мельнице и просеянного через сита. Небольшое количество порошка, взболтанного с водой, постепенно вливают через воронку 1 в стеклянный прибор (рис. 3). Через трубку 2 в прибор поступает непрерывный поток воды из водопровода или бака; скорость потока воды регулируют краном или зажимом. Поток воды увлекает взвешенные частицы окиси алюминия; самые крупные из них оседают в баллоне 5, а более мелкие – в баллоне 4. Частицы требуемой степени зернистости собираются в бутылку через трубку 5. Отмученный порошок пропускают еще 1-2 раза через прибор. Крупные частицы можно снова перемалывать.

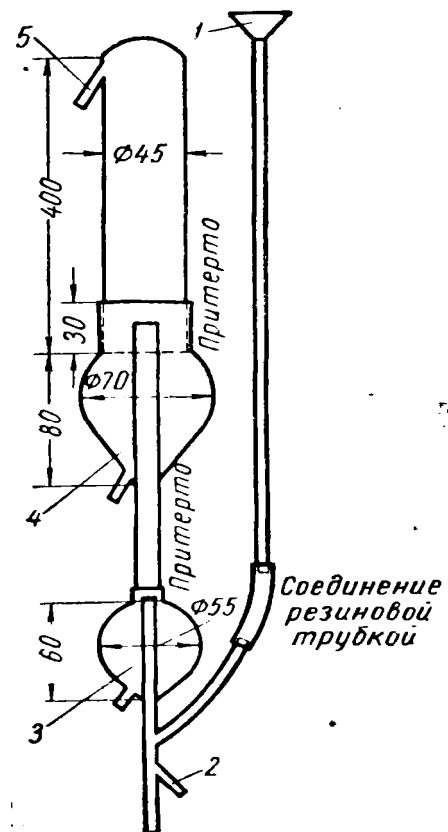
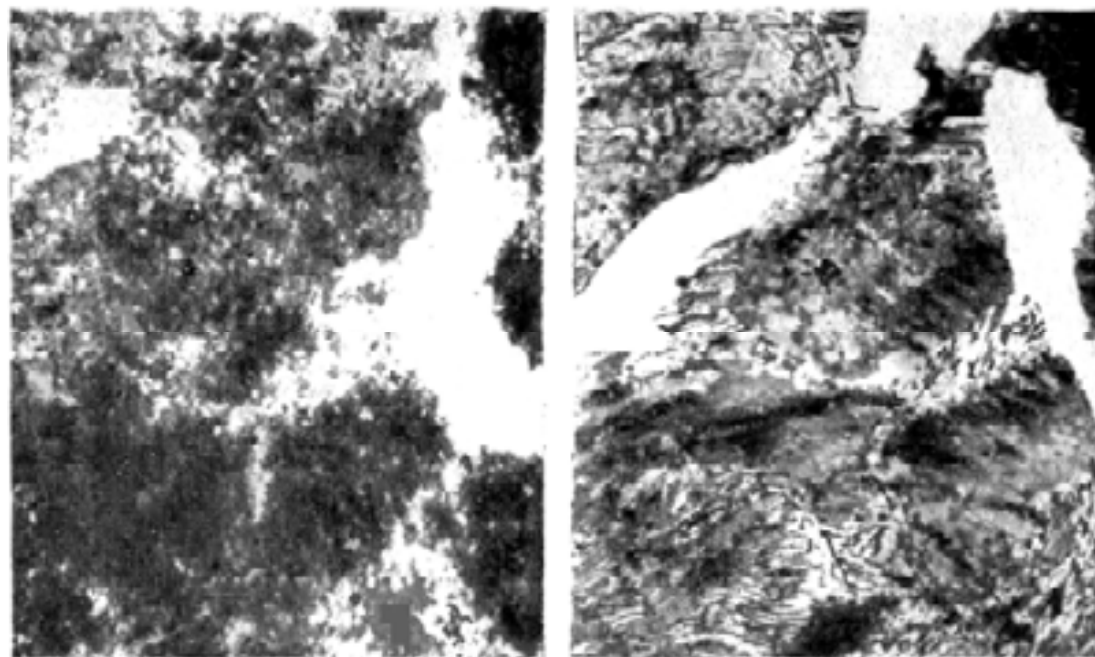


Рис. 3. Схема отстойника для отмучивания окиси алюминия

Кроме наиболее часто применяемой окиси алюминия, для полирования микрошлифов мягких металлов применяют окись магния, а в заводских лабораториях (при полировании шлифов из стали и чугуна) – окись хрома, которая дает несколько худшие результаты, чем окись алюминия. При изготовлении микрошлифов из твердых сплавов применяют алмазную пыль, которая является наилучшим полировочным материалом.



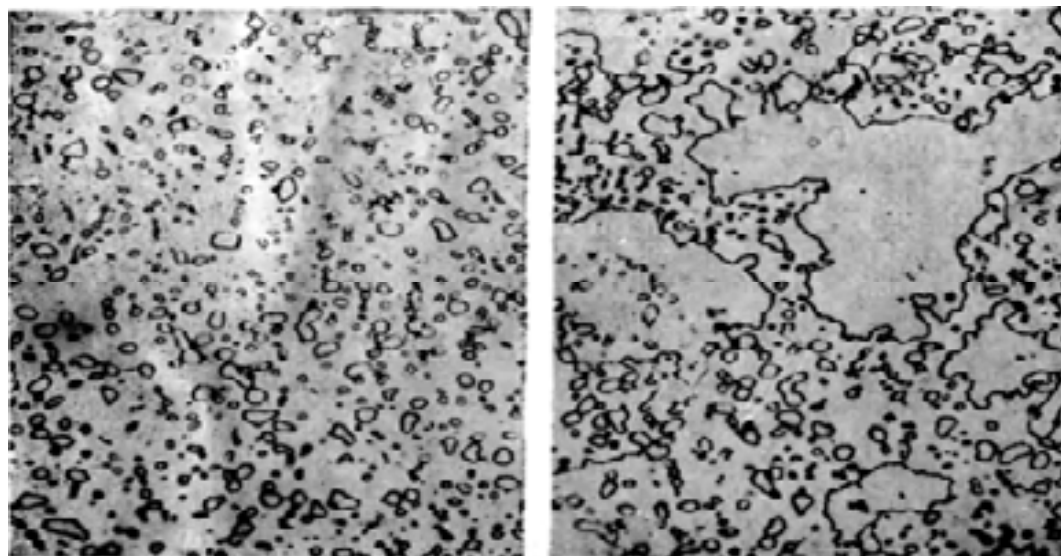
а)

б)

Рис. 4. Влияние пленки деформированного металла на микроструктуру;  $\times 1000$ : а – при первоначальном (однократном) травлении наблюдается замедленное действие реактива и искажение микроструктуры; б – то же, после переполирования и повторного травления обнаруживается истинная микроструктура

При полировании микрошлиф слегка прижимают к поверхности диска, чтобы он касался ее всей своей плоскостью, и постепенно поворачивают. Частицы окиси алюминия должны срезать риски на поверхности микрошлифа, а не стирать и замазывать деформированным металлом поверхность микрошлифа; особенно это важно при полировании мягкого материала. При полировании алюминия рекомендуется применять суспензию полировального порошка в мыльном растворе. Процесс полирования зависит от твердости, восприимчивости к

наклепу и других особенностей материала, но не должен продолжаться более 3-5 минут, пока не исчезнут последние штрихи, оставшиеся после шлифования. При более продолжительном полировании на поверхности микрошлифа получаются выбоины, непрочные элементы микроструктуры выкрашиваются, а вся поверхность покрывается мелкокристаллической пленкой деформированного, перемешанного с оксидами и нитридами металла, который плохо поддается травлению.



а)

б)

Рис. 5. Сравнение травления спиртовыми растворами;  $\times 1000$ : а – равномерное 5%-ным раствором пикриновой кислоты; б – неравномерное 4%-м раствором азотной кислоты

Такая пленка (рис. 4, а), искажающая внешний вид микроструктуры металла, может быть удалена последующим травлением и полированием, после которого обнаруживается действительная структура металла (рис. 4, б). При исследовании графитных или других неметаллических включений они наблюдаются под микроскопом на поверхности микрошлифов до травления обычно при увеличении в 100 раз, в большинстве же случаев микроструктура металлов и сплавов выявляется только после химического травления.

Для выявления микроструктуры стали, чугуна и цветных сплавов путем химического травления применяют различные реактивы (табл. 1). Многие из них представляют собой слабые спиртовые растворы или просто слабые водные, уменьшающие скорость травления.

Если в результате шлифования и полирования на поверхности микрошлифа образовалась пленка деформированного металла (рис. 6, а), плохо поддающаяся травлению, то вначале реактив действует медленно, а после удалении этой пленки интенсивность травления увеличивается. Повторные переполирование и травление, проводимые осторожно во избежание повреждения хрупких элементов структуры (неметаллических включений и графита), облегчают получение микрошлифов хорошего качества.

При травлении чистых металлов или твердых растворов, например феррита, реактив вначале воздействует на границы зерен (рис. 6, б), обладающие наибольшим запасом свободной поверхностной энергии и химически весьма активные. При дальнейшем более сильном травлении начинается интенсивное растворение реактивом поверхности зерен, обращенных к плоскости шлифа химически неустойчивыми плоскостями (вследствие анизотропии). Зерна же, обращенные к плоскости шлифа химически устойчивыми плоскостями, растворяются реактивом гораздо меньше. Свет, падающий на поверхность шлифа чистого металла, отражаясь под углом, выявляет как границы, так и уступы между зернами и обнаруживает различное окрашивание зерен (рис. 6, в).

При травлении многофазных сплавов, например, стали, сначала также реактивом растворяются (протравливаются) границы между фазами и зернами, а затем менее стойкие фазы – феррит; цементит же хуже поддается растворению (травлению) и образует выступы (рис. 6, г).

Косые лучи света, падающие на плоскость микрошлифа, также выявляют его структуру, создавая тени. Чем мельче и разнороднее структура, тем быстрее она травится; чем больше увеличение микроскопа, тем слабее должен быть протравлен шлиф. Для травления стали и чугуна обычно реактив наливают в фарфоровую чашку, шлиф берут щипцами и чистой промытой полированной поверхностью погружают на несколько секунд в реактив. Продолжительность выдержки различна для разных структур. Например, перлитные структуры протравливаются быстро, а ферритные медленно. После травления шлиф промывают сильной струей воды, на 1-2 секунды погружают в чистый спирт и высушивают фильтровальной бумагой, после чего, рассматривая шлиф под микроскопом, определяют, достаточно ли выявлена структура. Если структура выявилась недостаточно, шлиф протравливают вторично. При соответствующей практике степень протравливания можно определить невооруженным глазом.



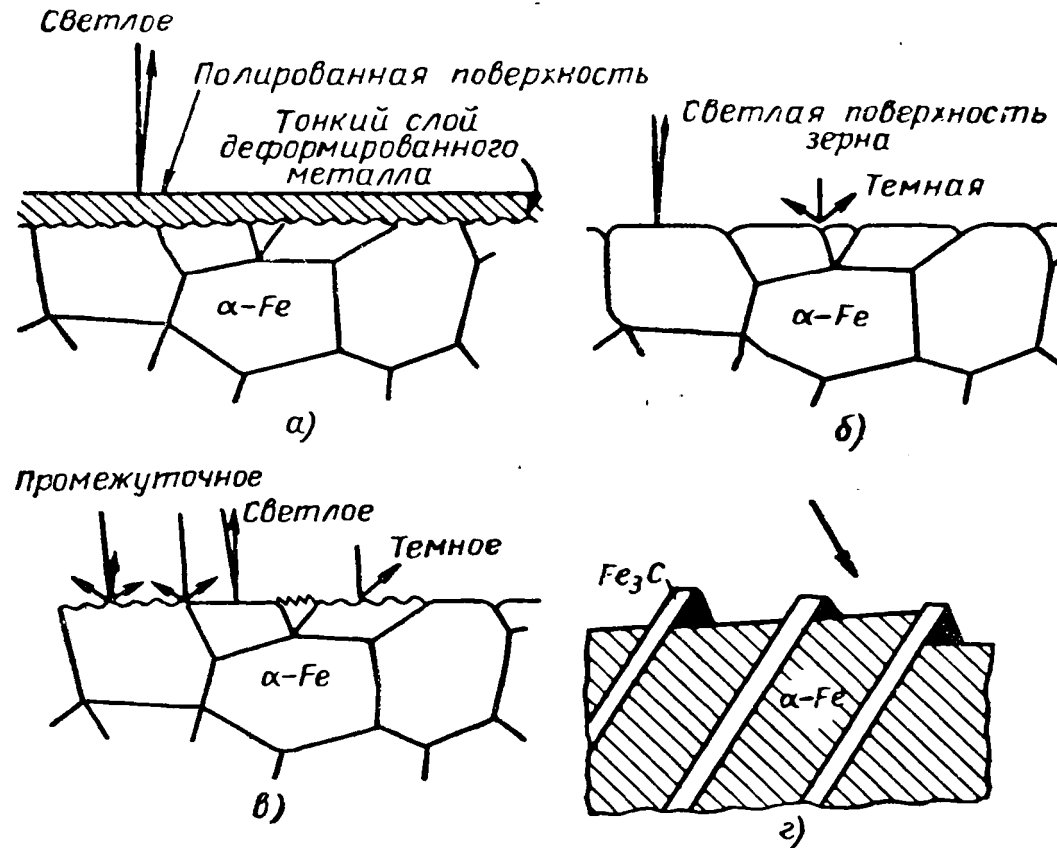


Рис. 6. Схема выявления микроструктуры при травлении: а – недостаточное травление не удалило слой деформированного металла, образовавшегося на поверхности микрошлифа при полировании; б – легкое травление растворило слой деформированного металла и выявило границы зерен благодаря их повышенной склонности к травлению; в – сильное травление подействовало на различно ориентированные зерна различно: одни стали темнее, другие – светлее; г – разная растворимость цементита ( $Fe_3C$ ) и феррита ( $\alpha$ -Fe) в реактиве и искажение размеров пластинок цементита и границ между ними и ферритом при травлении

При травлении шлифов из цветных сплавов в отдельных случаях поверхность микрошлифа протирают ваткой, смоченной реактивом, для удаления продуктов травления, загрязняющих поверхность.

Пикрат натрия применяют подогретым до 60-100 °С. Шлиф погружают в реактив, налитый в фарфоровую чашку, и выдерживают при подогревании 20-30 минут. Электролитическое травление с успехом применяют для выявления структуры аустенитных сталей и некоторых цветных металлов. Постоянный ток получают от селенового выпрямителя, при этом образец служит анодом, а катод изготовляют из нержавеющей стали.

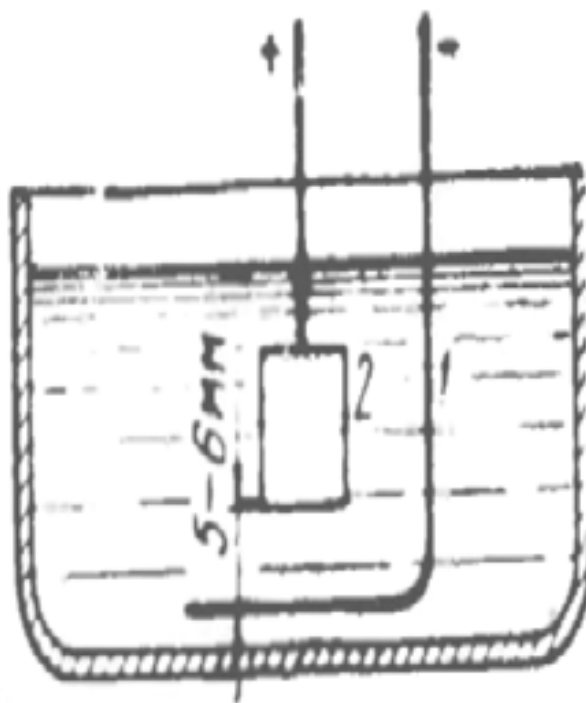


Рис. 7. Схема ванны для электролитического травления

Травление осуществляют следующим образом. На дно большой фарфоровой чашки (рис. 7) кладут пластинку 1 из аустенитной стали типа X18H9T толщиной 1—2 мм, согнутую под прямым углом. Наливают в чашку 1%-й раствор щавелевой кислоты в воде и погружают в нее шлиф 2 так, чтобы его полированная поверхность находилась от поверхности пластины нержавеющей стали на расстоянии 5—6 мм. Затем соединяют шлиф с плюсом, а пластинку нержавеющей стали — с минусом селенового выпрямителя. Процесс травления микроструктуры аустенита стали X18H9T продолжается от 5 до 60 секунд и обычно дает хорошие результаты.

При электролитическом травлении пикратом натрия этот способ травления проводится также при комнатной температуре, без подогрева; выдержка составляет около 60 секунд. Катодно-вакуумное травление требует специальной аппаратуры, зато позволяет получить микрошлифы без окраски и загрязнения их продуктами травления с хорошими границами фаз, независимо от химической активности последних и без выкрашивания и вымывания графита и неметаллических включений.

При катодно-вакуумном травлении микрошлиф помещается в вакуумную трубку с сильно разреженным инертным газом аргоном или криптоном. Провод от отрицательного полюса постоянного тока высокого напряжения соединяется с микрошлифом, который служит катодом, а от положительного — с анодом из алюминия, находящемся напротив катода на расстоянии примерно 100 мм. Под влиянием высокого напряжения поверхность микрошлифа подвергается бомбардировке ионами аргона, которые выбивают атомы с его поверхности. Выбитые атомы металла перемещаются через разреженный газ и откладываются на стенках вакуумной системы. Для устранения нагрева микрошлифа его держатель охлаждают водой.

Катодно-вакуумное травление применяется для шлифов сплавов циркония, урана, никеля, алюминия, меди, нержавеющей стали и других сплавов. Особенно оно полезно при исследованиях под электронным микроскопом. Например, применение катодно-вакуумного травления позволило хорошо выявить блочную структуру (рис. 8, а и б) циркониевого сплава, содержащего 98,4% Ti, 1,4% Sn, 0,05% Ni, 0,05% Fe и 0,06% Cr и отожженного при 700 °С.

Для катодно-вакуумного травления применяется та же аппаратура, что и при отнении слепков для электронного микроскопа или специальное оборудование, состоящее в основном из источника постоянного тока высокого напряжения, диффузионного насоса, механического насоса, вакуумной аппаратуры и др. Для травления макроструктуры стали обычно применяется реактив из 50% соляной кислоты и 50% воды, который применяется нагретым до 70-80°С. В случае необходимости выявления в макроструктуре стали закаленной зоны применяется 10%-й раствор азотной кислоты в воде при комнатной температуре.

Таблица 1

Название	Состав	Назначение и особенности применения
<b>Для стали и чугуна</b>		
5%-й раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте	Пикриновой кислоты 5 г, этилового спирта 100 см <sup>3</sup>	Обеспечивает равномерное травление, дает структуру с тонкими деталями, не загрязняет феррит продуктами травления; очень хорошо выявляются карбиды и перлит (рис. 5, а)
2%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Азотной кислоты 2 см <sup>3</sup> , этилового спирта 100 см <sup>3</sup>	Действует контрастно, хорошо выявляет колонии перлита, отличает мартенсит от феррита, выявляет зерна феррита, но хуже (рис. 5, б), чем пикриновый реактив, обеспечивает равномерность травления
4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Азотной кислоты 4 см <sup>3</sup> , этилового спирта 100 см <sup>3</sup>	Хорошо выявляет структуру закаленной стали: мартенсит и троостит закалки
Раствор соляной и пикриновой кислоты в этиловом спирте	Соляной кислоты 5 см <sup>3</sup> , пикриновой кислоты 1 г	Для выявления величины зерна закаленной и отпущенной стали, лучшие результаты – после 15-минутного отпуска шлифа при 200-250°C
10%-й раствор щавелевой кислоты в воде	Щавелевой кислоты 10 г, воды 100 см <sup>3</sup>	Для электролитического травления нержавеющей стали, когда шлиф является анодом, а пластинка из нержавеющей стали – катодом при напряжении 6 В
Пикрат натрия	Пикриновой кислоты 2 г, едкого натра 25 г, воды 100 см <sup>3</sup> (едкий натр медленно добавляют к раствору пикриновой кислоты в воде)	Для окрашивания цементита и карбидов в темный цвет. Применяется при электролитическом травлении, когда шлиф является анодом, а пластинка нержавеющей стали – катодом, при напряжении тока 6 В в течение 40 секунд
Смесь кислот с водой	Азотной кислоты 5 см <sup>3</sup> , соляной кислоты 50 см <sup>3</sup> , воды 50 см <sup>3</sup>	Хорошо выявляет структуру хромистой нержавеющей стали. Применяется нагретым до 50-60°C

Название	Состав	Назначение и особенности применения
<b>Для сплавов алюминия</b>		
0,5%-й раствор плавиковой кислоты в воде	Плавиковой кислоты 0,5 см <sup>3</sup> , воды 100 см <sup>3</sup>	Применяется для литейных сплавов и дуралюминов путем протирания поверхности шлифа ваткой, смоченной реактивом, в течение 15 секунд
1%-й раствор едкого натра в воде	Едкого натра 1 г, воды 100 см <sup>3</sup>	Применяется для дуралюмина путем погружения шлифа на 10-60 секунд в реактив и последующей промывки горячей водой и сушки (нельзя удалять продукты травления с поверхности микрошлифа)
<b>Для сплавов меди</b>		
Аммиак и перекись водорода	Водного раствора аммиака 5 частей, перекиси водорода (8%-й) 2-5 частей, воды 5 частей	Для латуней и бронз; употребляется в свежеприготовленном виде; рекомендуется медленное протирание ваткой, смоченной реактивом
8%-й раствор хлорной меди в аммиаке	Хлорной меди 8 г, аммиака 100 см <sup>3</sup>	Хороший реактив для меди и ее сплавов
5%-й раствор хлорного железа в 10%-м растворе соляной кислоты	Хлорного железа 5 г, соляной кислоты 10 см <sup>3</sup> , воды 100 см <sup>3</sup>	Для меди, латуни и бронзы; хорошо выявляется эвтектоид α+δ в бронзе
<b>Для баббитов и сплавов магния</b>		
4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Азотной кислоты 4 см <sup>3</sup> , этилового спирта 100 см <sup>3</sup>	Применяется путем погружения шлифов в реактив и последующей промывки в струе воды

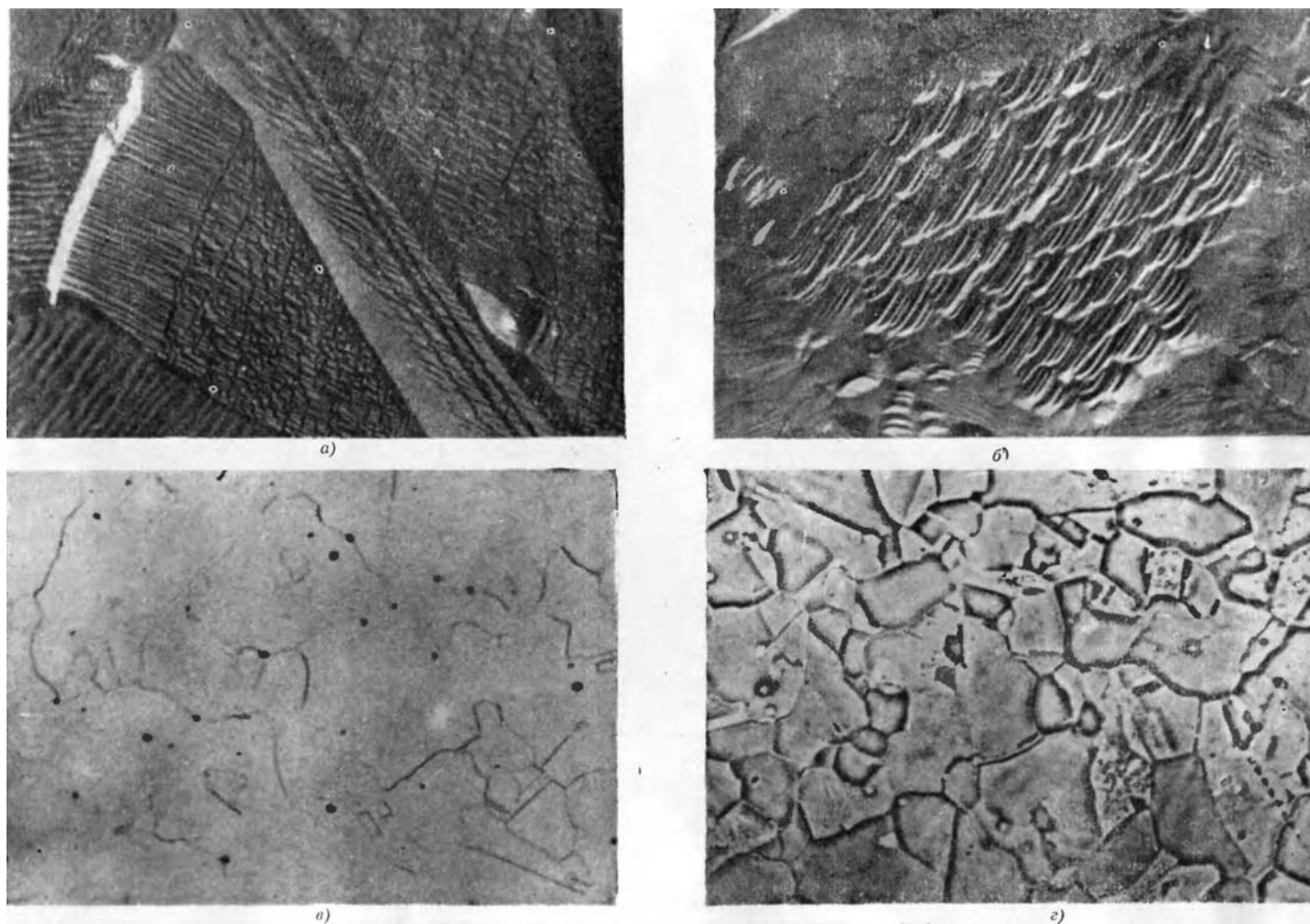


Рис. 8. Микроструктура после катодно-вакуумного травления: а — блочная структура циркониевого сплава, выявленная бомбардировкой ионами криптона при напряжении 4000 В,  $\times 2000$ ; б — то же;  $\times 4500$ ; в — никель, протравленный бомбардировкой ионами аргона в течение 2 часов, при напряжении 1800 В и силе тока 25 мА, обычное освещение,  $\times 250$ ; г — то же при фазоконтрастном освещении

## Микрофотографирование

Микрофотографии, приведенные в настоящем атласе, выполнены при прямом освещении, которое обеспечивает воспроизведение мельчайших деталей микроструктуры (рис. 9, а). Освещение с помощью призмы хотя и дает более контрастное и яркое изображение, но не может передать всех деталей структуры при увеличениях больше 100 раз (рис. 9, б).

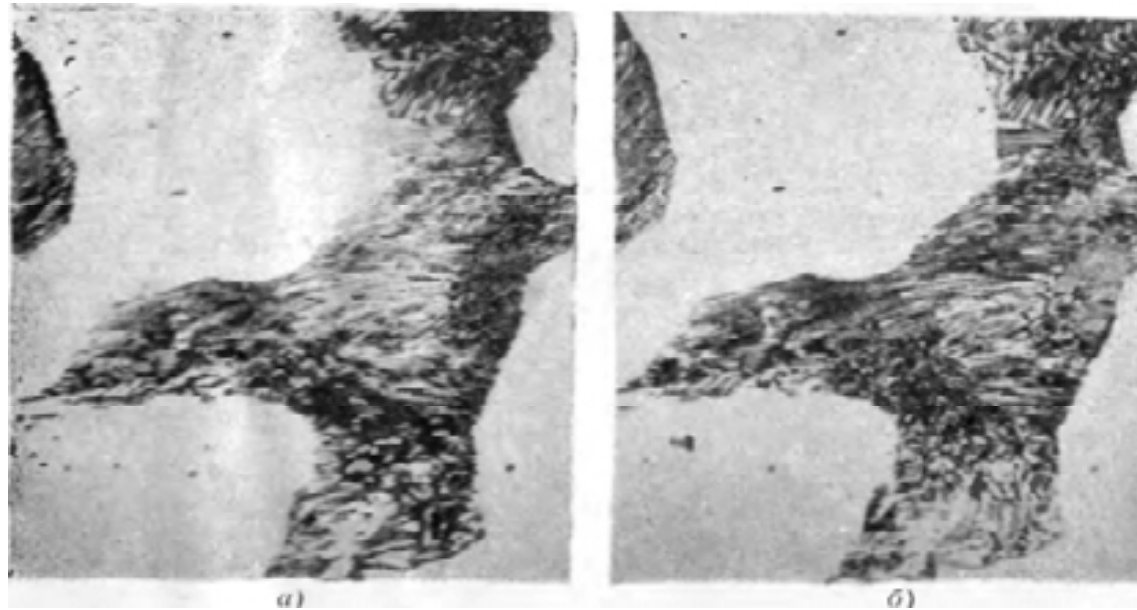


Рис. 9. Влияние освещения на выявление деталей микроструктуры;  $\times 1000$ ; а — при помощи призмы; б — при помощи тонкой стеклянной пластинки

Больших увеличений следует добиваться применением сильных объективов (рис. 10, а), а не заменой окуляров, так как последние только увеличивают размер изображения, а новых деталей при увеличении не выявляют (рис. 10, б).

При рассмотрении и особенно при фотографировании микроструктуры необходимо устранять толчки и дрожание микроскопа. Для этого металлографические микроскопы подвешиваются на пружинах и имеют резиновые прокладки. При дрожании микроскопа фотографическое изображение получается смазанным.

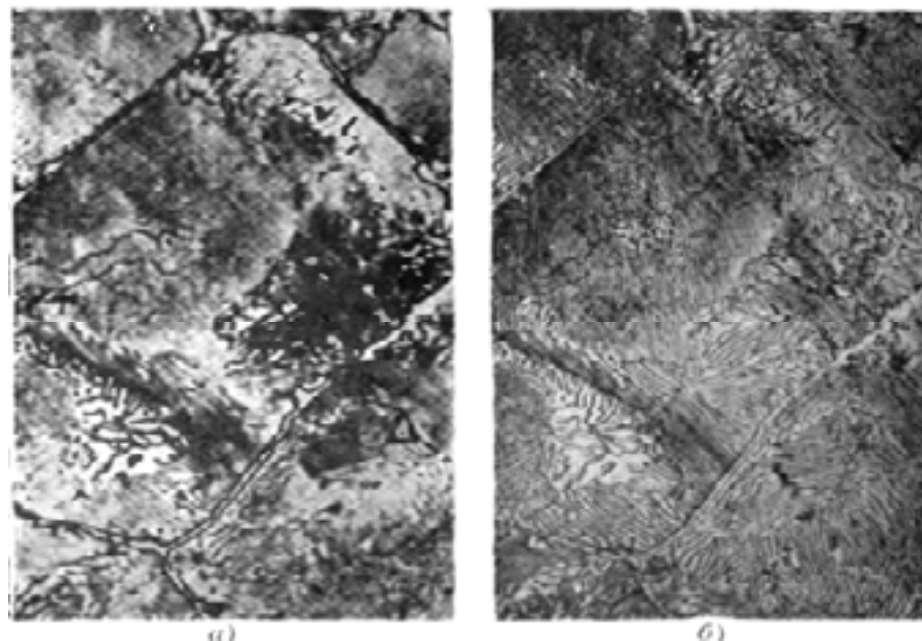


Рис. 10. Влияние выбора объектива и окуляра на выявление деталей микроструктуры; х500: а — слабый объектив и сильный окуляр; б — сильный объектив и слабый окуляр



Особое внимание следует обратить на правильный выбор источника света, обеспечивающего постоянное и достаточно сильное освещение. Для обеспечения четкой передачи на микрофотографиях мельчайших деталей, почти неуловимых для человеческого глаза, а также достаточной контрастности изображения необходимо, во-первых, добиваться правильного и равномерного освещения поверхности микрошлифа; во-вторых, применять желтые или зеленые светофильтры в комбинации с изоортохроматическими пластинками, так как оптика микроскопов в отношении хроматической абберации обычно исправляется в отношении желто-зеленых лучей, как наиболее удобных для человеческого глаза.

Наводить на фокус при фотографировании микроструктур надо очень тщательно, особенно при применении объективов с большими увеличениями; недостаточная резкость деталей микроструктуры при наводке усиливается при фотографировании, и снимок получается неясным и размазанным. При наводке на фокус рекомендуется пользоваться не матовым, а обыкновенным стеклом, применяя лупу и включая предварительно светофильтр. Все изображение, особенно в центре, должно быть совершенно резким и отчетливым.

Длительность экспозиции определяют опытным путем, снимая несколько повторных снимков одного и того же микрошлифа. Особенно удобно это делать, пользуясь специальной кассетой. Фазоконтрастная микроскопия, осуществляемая при помощи оптического микроскопа с особым приспособлением к осветителю, позволяет различать самую незначительную разницу в высоте между структурными элементами на поверхности микрошлифа (рис. 8, в и г), например всего в  $50 \cdot 10^{-8}$  см, т. е. порядка размеров атомов и молекул.

## 2. ОПИСАНИЕ МИКРОСТРУКТУР

### Основные элементы микроструктуры стали и чугуна

**Феррит.** Микроструктура феррита как твердого раствора углерода, марганца, кремния, фосфора, хрома и других элементов в  $\alpha$ -железе состоит из светлых зерен (рис. 11). Лучшим реактивом для травления феррита является 4%-ный раствор азотной кислоты в спирте. Четкое выявление границ зерен получается после ряда повторных полировок, сопровождаемых травлением.

**Аустенит.** Микроструктура аустенита как твердого раствора углерода и других элементов в  $\gamma$ -железе (рис. 12) состоит из светлых зерен с характерными двойниками. Для лучшего выявления микроструктуры аустенита рекомендуется при изготовлении микрошлифов применять электролитическое полирование и электролитическое травление.

**Цементит.** Микроструктура цементита как химического соединения железа с углеродом  $Fe_3C$ , содержащего 6,67% С или твердого раствора железа и других элементов на его основе имеет светлый выпуклый вид, например, выделившийся в виде сетки и игол из аустенита вторичный цементит (рис. 13) в неотожженной (сырой) и высокоуглеродистой (заэвтектоидной) стали. При травлении обычными реактивами, ввиду химической стойкости цементита, он слабо разъедается и имеет так же, как и феррит, светлый вид. Отличить его от феррита можно или по его высокой твердости, или путем травления пикратом натрия, который окрашивает цементит в темный цвет (при этом феррит не окрашивается).

Цементит также наблюдается в структуре в виде полос первичного цементита (рис. 14, а), выделившегося из жидкого сплава, и в форме мелкой сетки или частичек третичного цементита (рис. 14, б), выделившегося из феррита.

**Перлит.** Эвтектоид, состоящий из мелких различной величины пластинок цементита, расположенных в феррите, называется пластинчатым перлитом (рис. 15). В случае, если цементит расположен в виде мелких зерен цементита различной величины в феррите, то такая структура называется зернистым перлитом (рис. 16). В чистых сплавах железа с углеродом перлит содержит 0,8% С. В сталях и чугунах, содержащих кремний, марганец и другие элементы, перлит содержит меньше углерода. Пластины и зерна цементита своеобразно отражают свет, и поверхность протравленного микрошлифа напоминает перламутр, что дало основание назвать эту микроструктуру перлитом.

Особенно хорошо пластинки цементита в перлите можно наблюдать под электронным микроскопом (рис. 17), где ясно видны тонкие пластинки цементита, наклоненные под углом к поверхности микрошлифа.

Весьма хорошим реактивом, обеспечивающим равномерное и четкое выявление структуры перлита, является 5%-й раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте, который хорошо растворяет феррит, не загрязняет его продуктами травления, а на цементит почти не оказывает воздействия.

**Ледебурит.** Ледебурит, или цементитная эвтектика, состоит в момент образования из выделений аустенита, расположенных в цементите, а после охлаждения ниже  $A_{r1}$  — из выделений перлита в цементите (рис. 18).

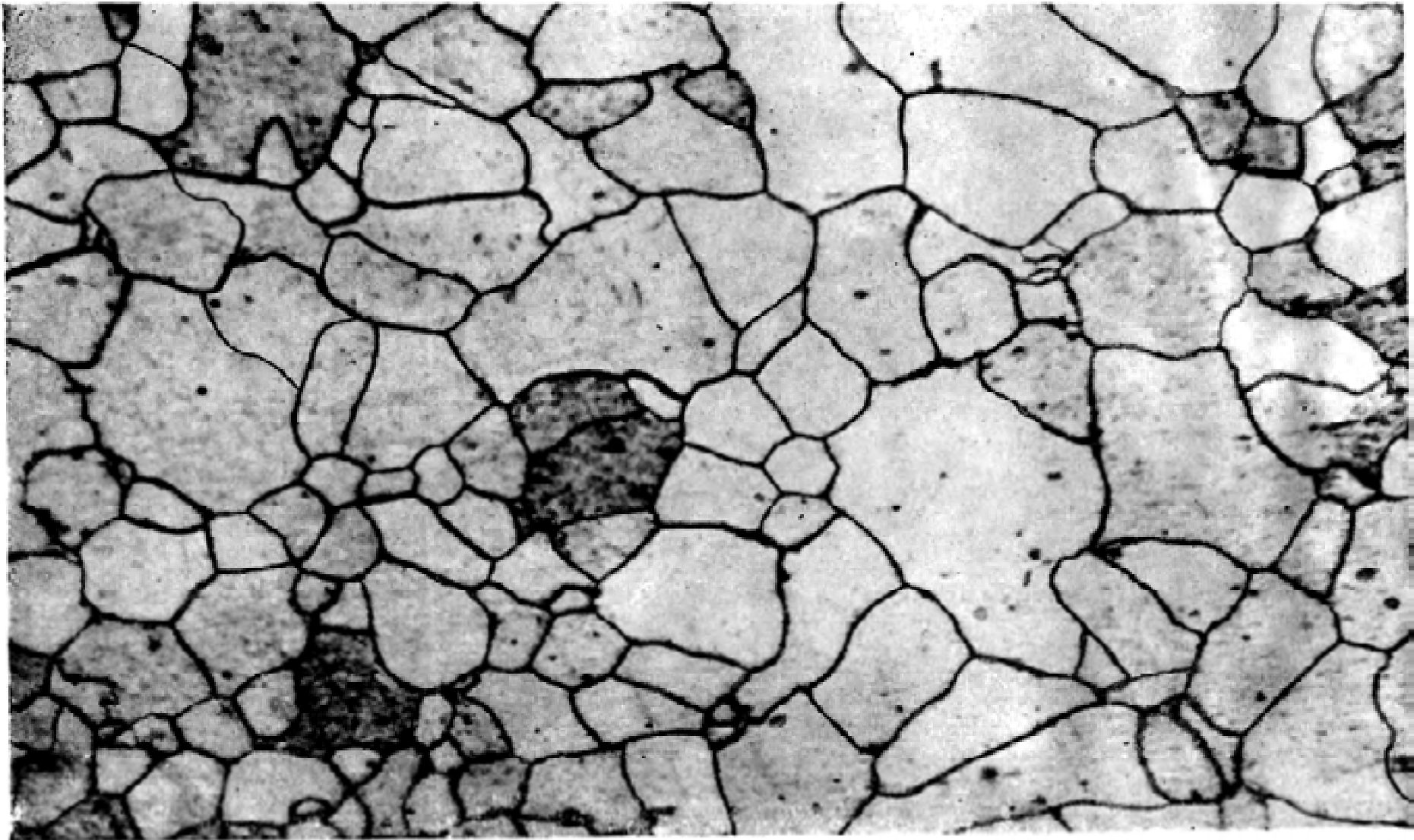


Рис 11. Феррит;  $\times 500$ . Светлые зерна  $\alpha$ -железа, которое может содержать в твердом растворе до 0,006% углерода, а также некоторое количество марганца, кремния, фосфора, хрома и других элементов

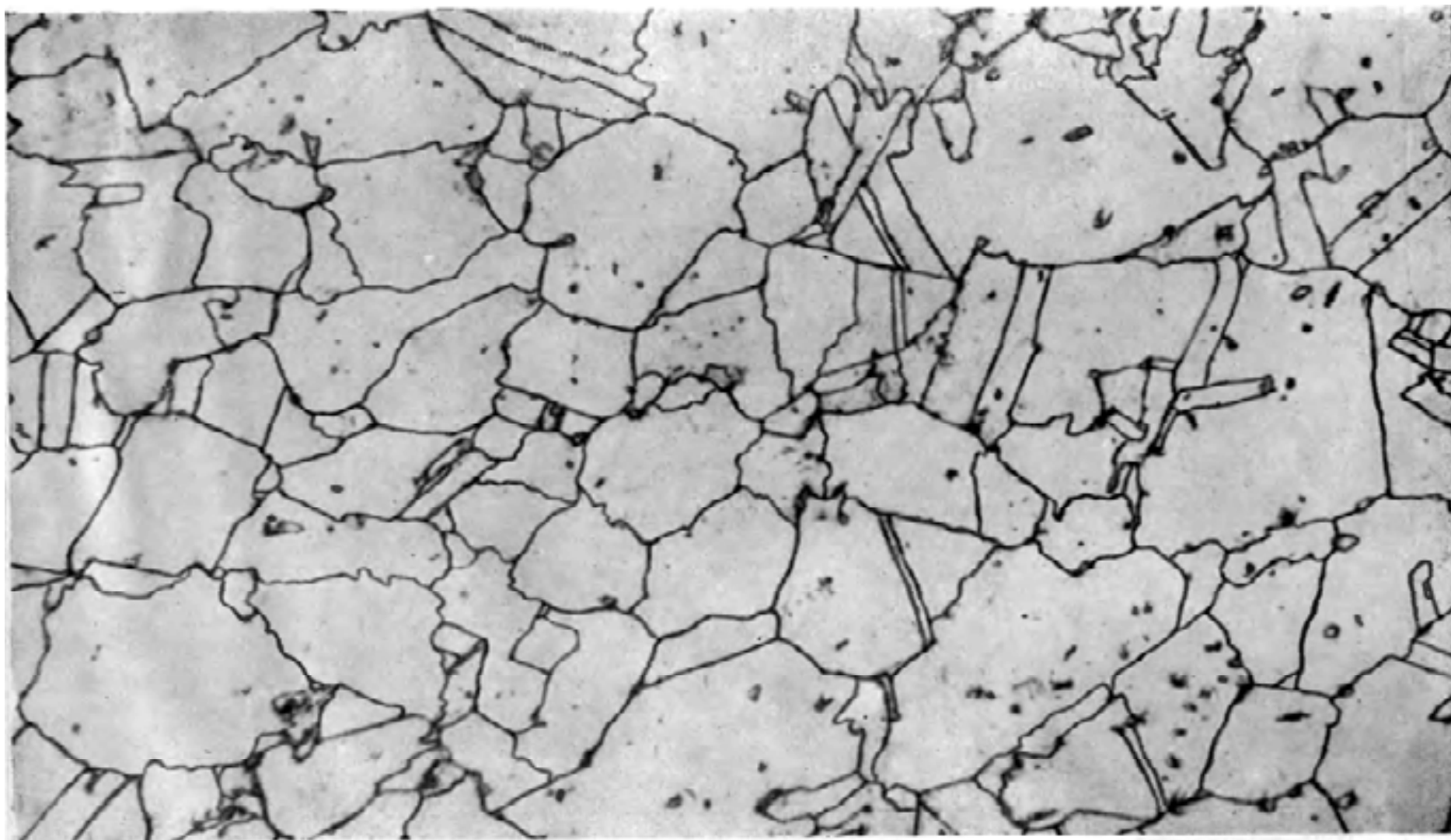


Рис. 12. Аустенит; x500. Светлые зерна с характерными двойниками кристалла твердого раствора углерода и других элементов в  $\gamma$ -железе

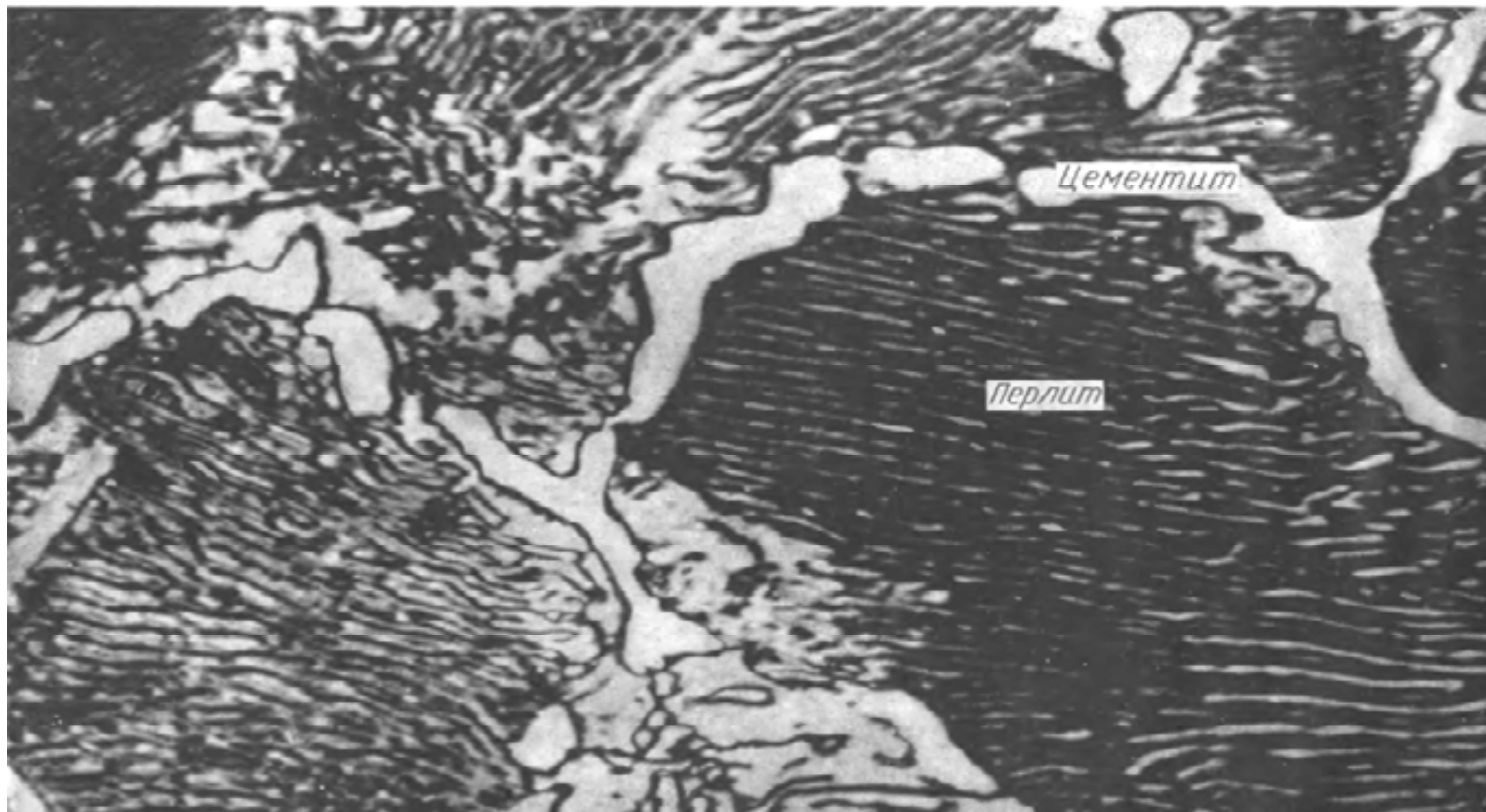
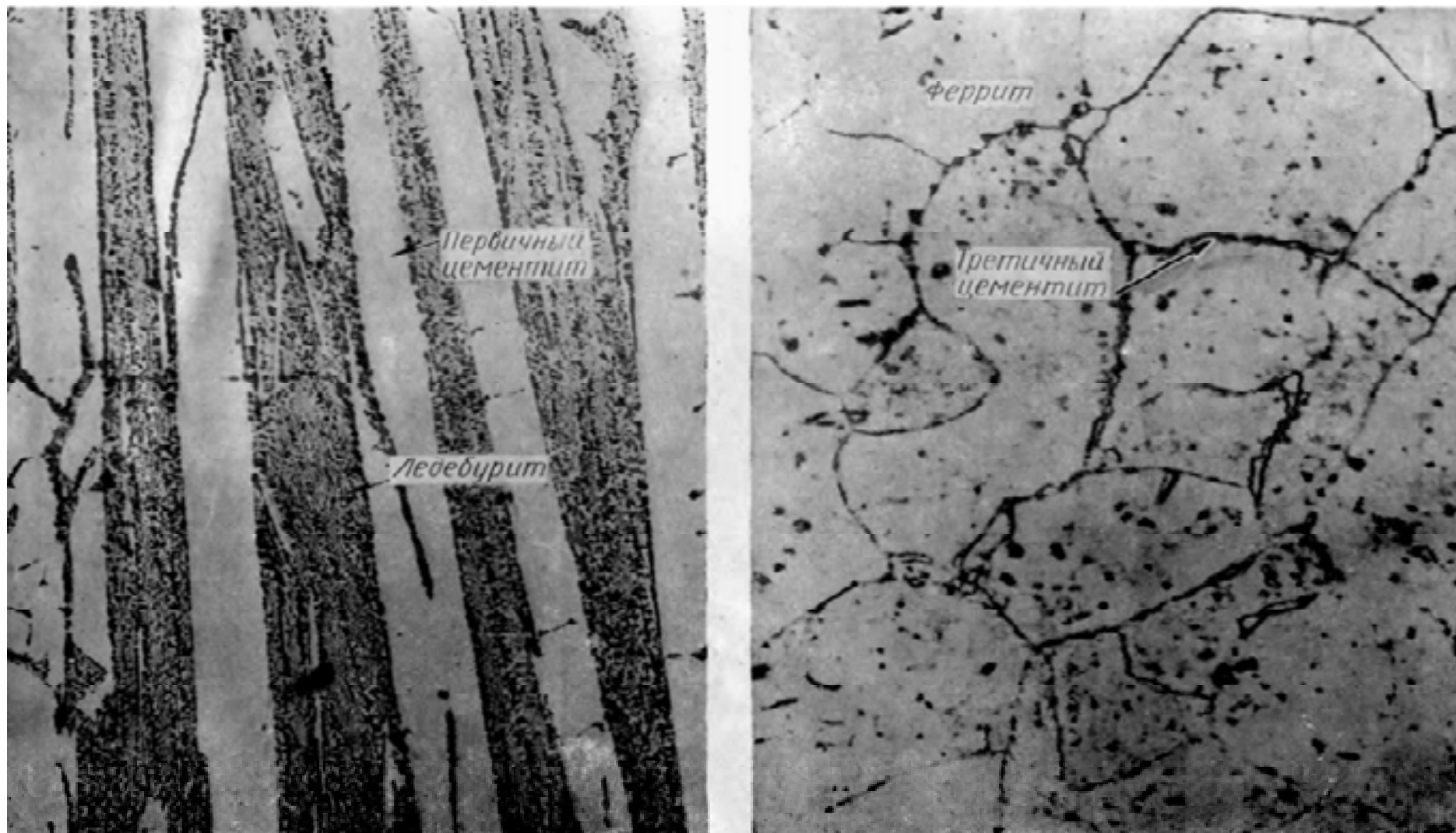


Рис. 13. Цементит вторичный в неотожженной (заэвтектоидной) стали;  $\times 1000$ . Светлая сетка –  $\text{Fe}_3\text{C}$ , который может содержать в твердом растворе железо, марганец, хром и другие элементы



а)

б)

Рис. 14. Цементит: а — первичный (массивные включения в заэвтектическом чугуна); x200; б — третичный (мелкие включения и сетка в техническом железе); x1500



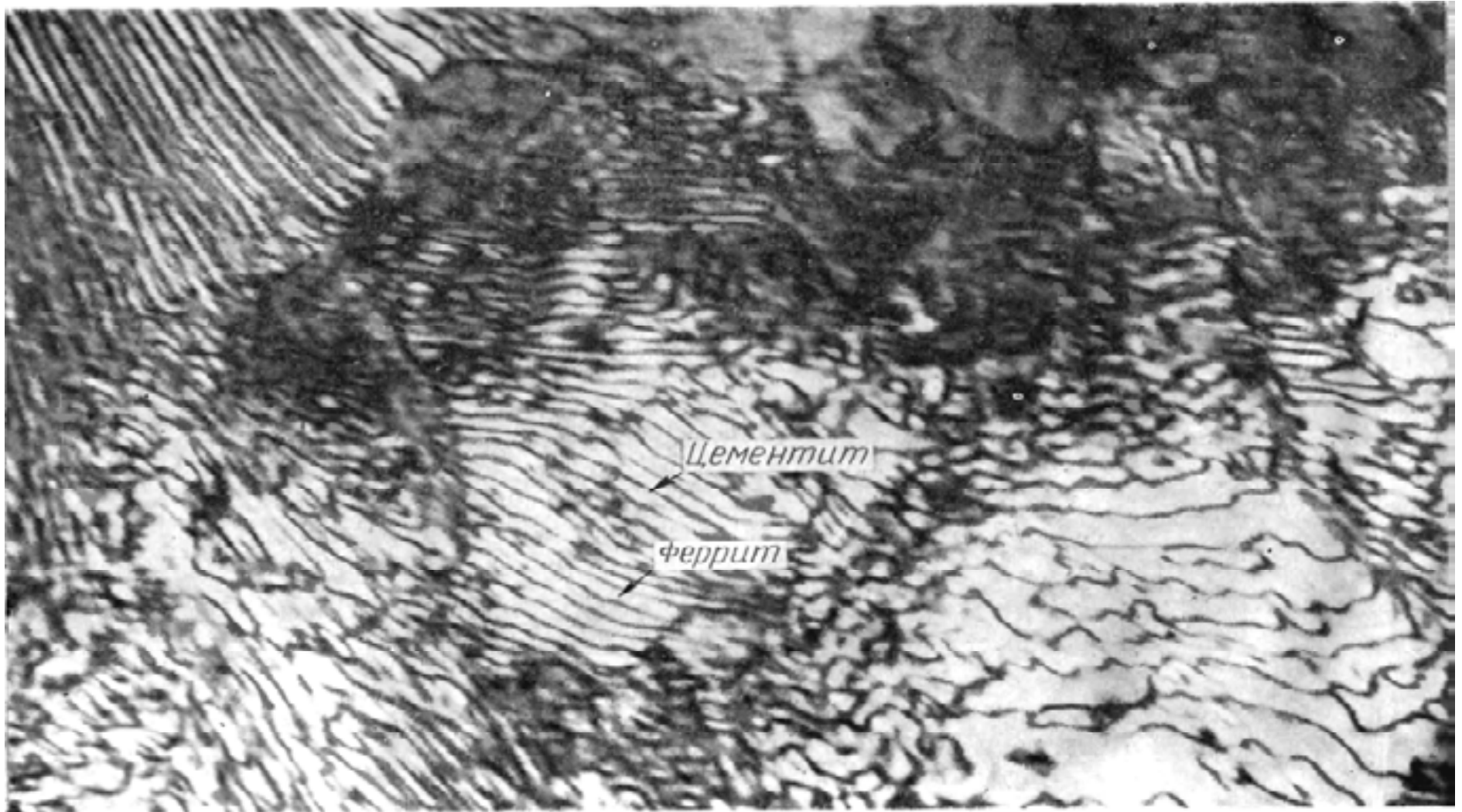


Рис. 15. Перлит пластинчатый;  $\times 2000$ . Эвтектоид, состоящий из тонких пластинок цементита, расположенных в ферритной основе



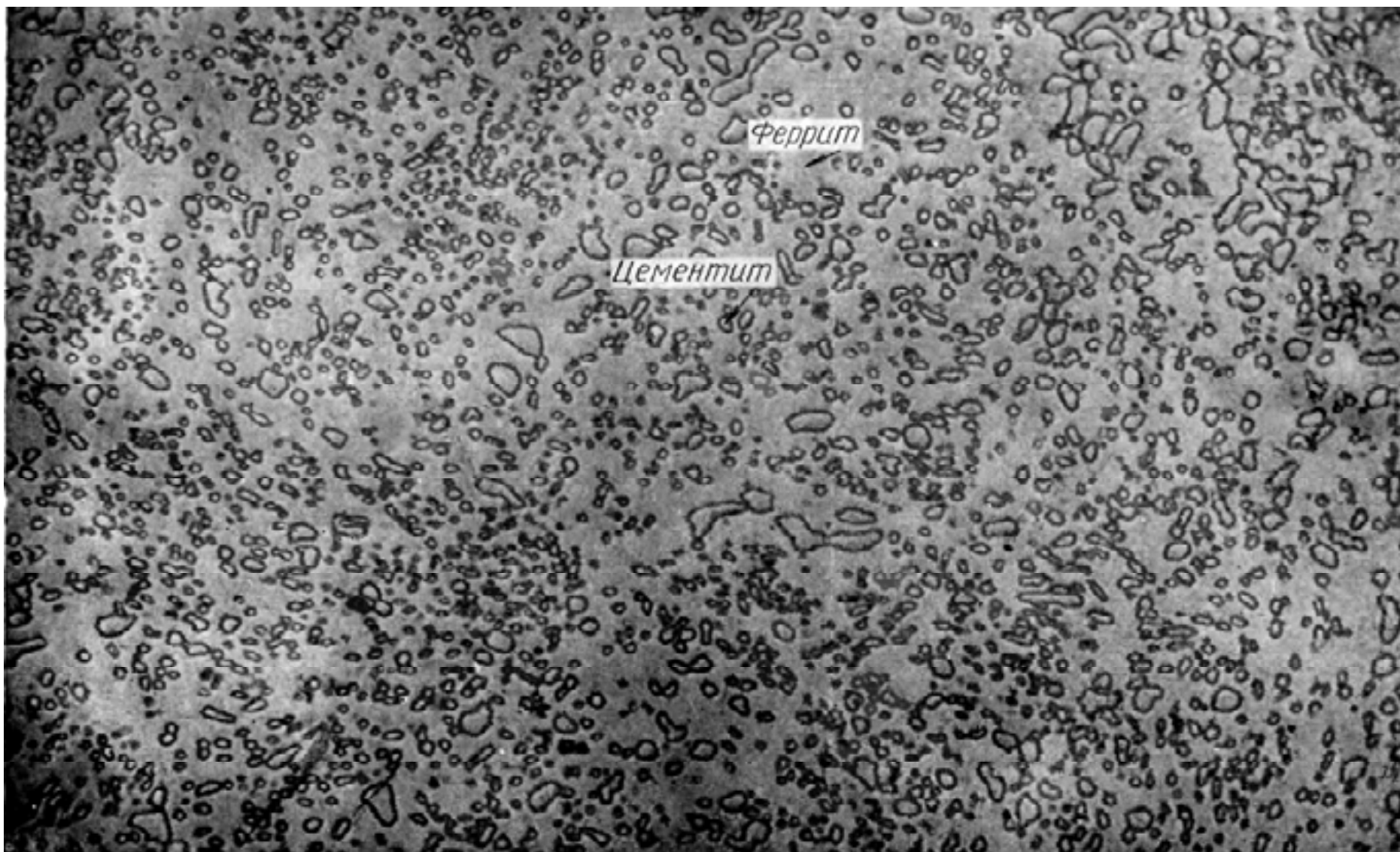


Рис. 16. Перлит зернистый; x2000. Эвтектоид, состоящий из мелких зернышек цементита, расположенных в ферритной основе

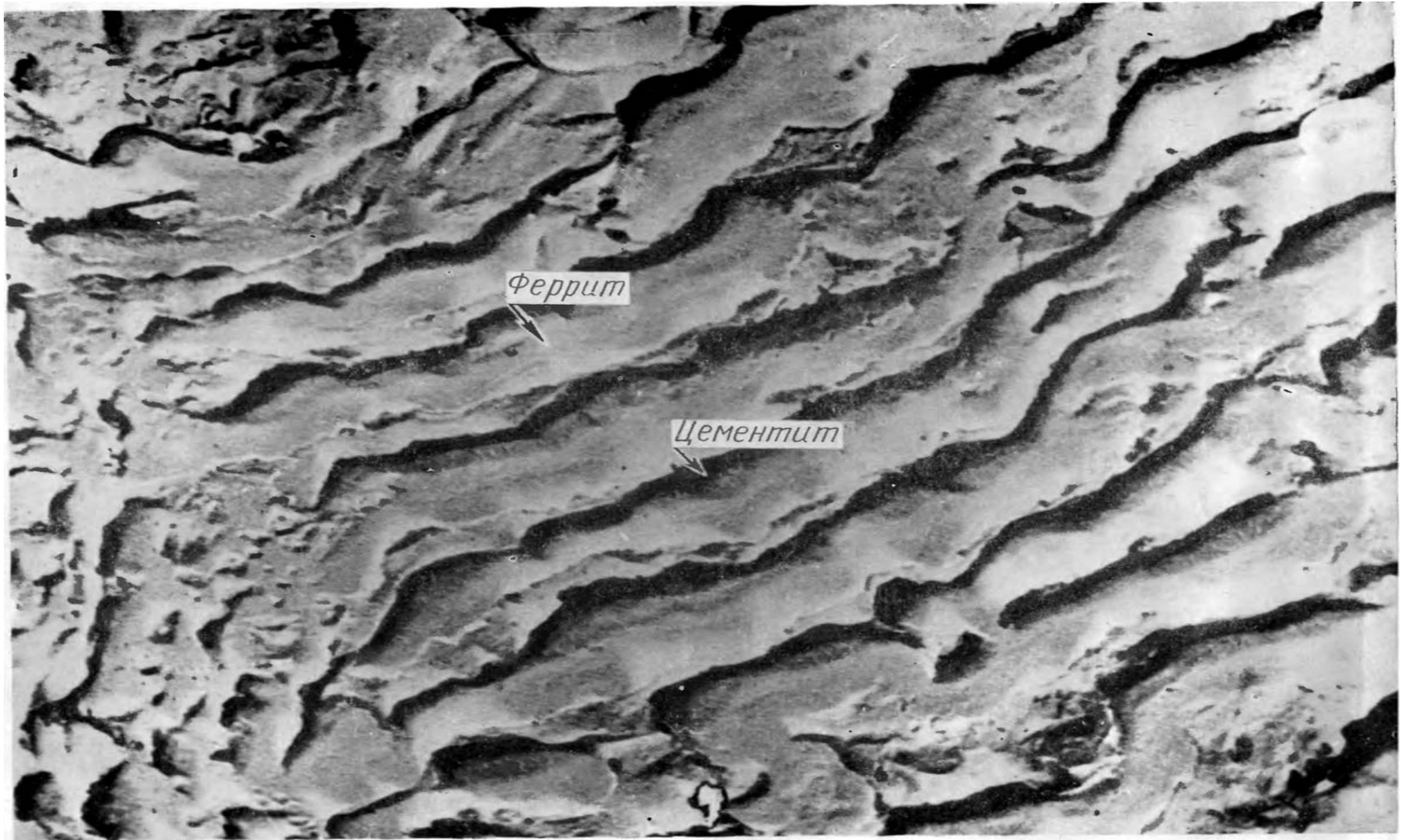


Рис. 17. Перлит пластинчатый;  $\times 30000$ . Эвтектоид, состоящий из тонких пластин цементита, наклоненных под углом к поверхности микрошлифа и расположенных в ферритной основе

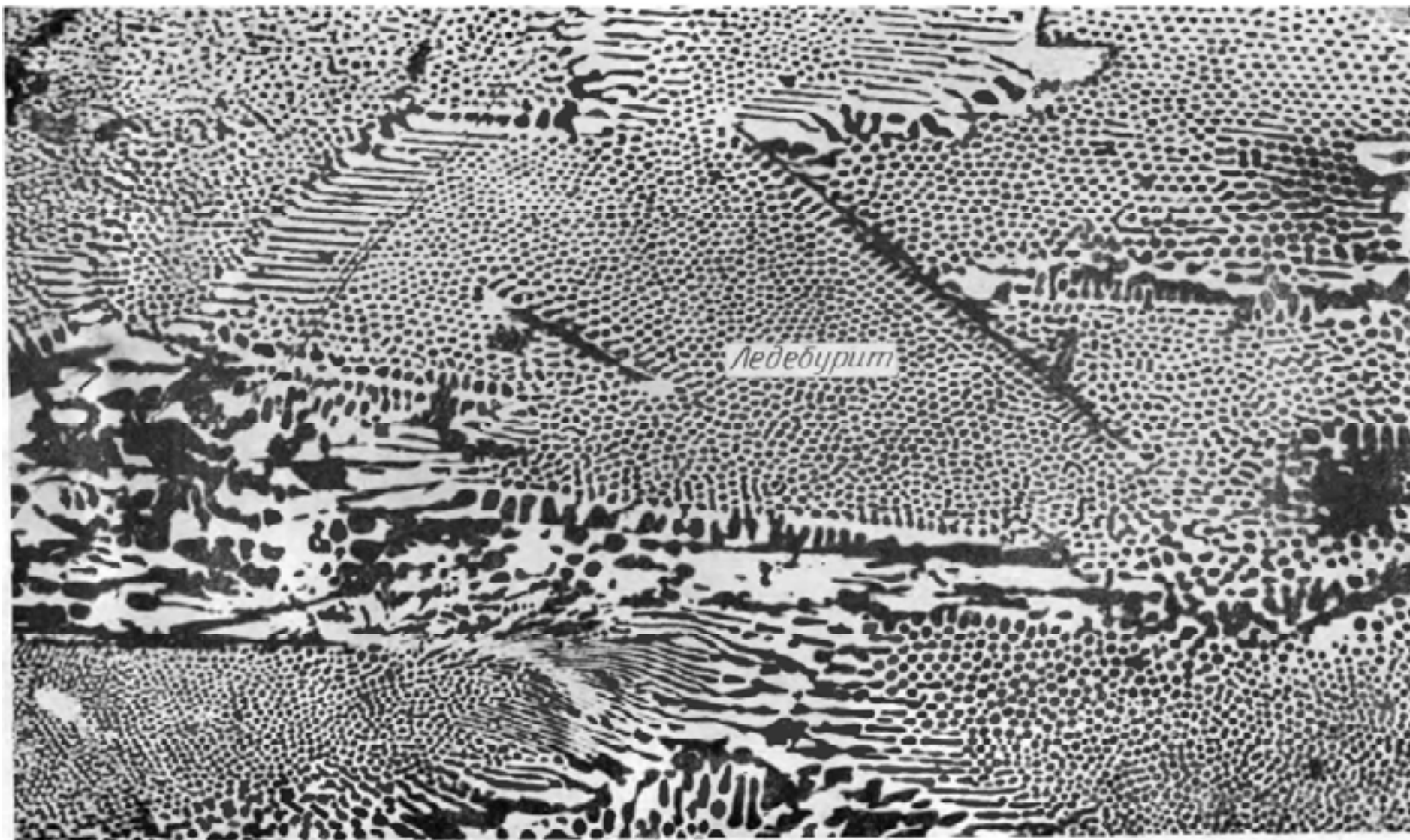


Рис. 18. Ледобурит; x500. Эвтектика из характерных округлых темных включений перлита, расположенных в светлой цементитной основе

## Макро- и микроструктура углеродистой стали

**Влияние углерода.** Микроструктура медленно охлажденной (после прокатки или отжига, или после нормализации) стали, содержащей до 0,8% С, состоит из феррита и перлита. Сталь с 0,1% С имеет очень много светлых участков структуры – феррита, а темных – перлита – очень мало (рис. 19, а). С увеличением в стали до 0,2% С количество феррита начинает уменьшаться, а перлита увеличиваться (рис. 19, б). С дальнейшим увеличением содержания в стали углерода – от 0,3 до 0,8% – количество феррита в структуре постепенно уменьшается, а перлита возрастает (рис. 20, а, б; 21, а; 22, а). При содержании в стали 0,8% С ее микроструктура состоит из одного перлита (рис. 15). У стали с содержанием углерода больше 0,8%, например при 1,2% С, прокатка которой была закончена при излишне высокой температуре, микроструктура состоит из темных зерен перлита и светлой сетки цементита (рис. 21, б).

**Эталоны микроструктуры стали.** Для количественной оценки микроструктуры стали установлен ряд эталонных шкал. Для определения количественного соотношения перлита и феррита при увеличении в 100 раз предусмотрена следующая шкала (рис. 22, а): балл 1 (100/0), 2 (95/5), 3 (85/15), 4 (75/25), 5 (65/35), 6 (50/50), 7 (35/65), 8 (20/80), 9 (5/95), 10 (0/100). Эта шкала пригодна для оценки соотношения перлита и феррита в структуре, независимо от характера перлитных участков (пластинчатый или зернистый, или смешанный) или от их дисперсности (измельченности), что устанавливается дополнительно на основании сопоставления с другими шкалами.

Дисперсность (измельченность) пластинчатого перлита оценивается по десятибалльной шкале (рис. 22, б). Шкалы для зернистого и смешанного перлита приведены в разделе инструментальных сталей.

**Пороки микроструктуры стали.** При перегреве стали или при медленном охлаждении стального литья получается крупнозернистость (рис. 23, а), которая сильно понижает ударную вязкость стали и повышает температуру перехода ее в хрупкое состояние. При этом феррит в микроструктуре стали может расположиться не только по границам крупных зерен, но и по кристаллографическим плоскостям самих зерен (рис. 23, б). Такая структура носит название видманштеттовой и характеризуется низкими механическими свойствами.

Крупнейшим пороком микроструктуры стали является обезуглероживание ее поверхности (рис. 24, а), а также строчечность (рис. 24, б), когда полосы феррита чередуются с полосами перлита. Строчечность создает неоднородные механические свойства вдоль и поперек прокатки, ухудшает обрабатываемость стали резанием и вызывает массовый брак при холодной штамповке. Особенно вредна строчечность, связанная с неметаллическими включениями.

**Неметаллические включения.** При изготовлении микрошлифов для выявления неметаллических включений при шлифовании и полировании необходимо строго соблюдать все предосторожности, чтобы сохранить неметаллические включения и не выкрошить их. Как видно из рис. 25, неметаллические включения бывают простые и сложные по структуре; особенно важно, являются ли они пластичными или хрупкими. Неметаллические включения опасны тем, что около них происходит концентрация напряжений и начинается разрушение металла, наиболее опасны здесь хрупкие, твердые, не поддающиеся деформациям включения, например, окись алюминия ( $Al_2O_3$ ), хрупкие силикаты и т. д.

**Эталоны неметаллических включений.** Для количественной оценки наиболее распространенных и типичных неметаллических включений предусмотрены особые шкалы их эталонов: оксиды, сульфиды, пластичные силикаты, хрупкие силикаты, глобулярные включения, точечные включения. Некоторые из них приведены на рис. 26.

**Пороки макроструктуры стали.** Качество стали в значительной мере определяется ее макроструктурой, определяемой путем травления поперечных сечений (темплетов) заготовки, обжатой из слитков на блюминге. Макроструктура стали должна быть однородной и плотной, без значительных пороков.

К числу типичных пороков макроструктуры стали (рис. 27) относятся остатки усадочной раковины, зональная ликвация (ликвационный квадрат), пористость общая и центральная, подкорковые пузыри и флокены.

**Поломки изделий вследствие пороков макро- и микроструктуры.** Очень часто поломки изделий в эксплуатации и брак в производстве (закалочные трещины, недостаточная твердость, плохая обрабатываемость) обуславливаются пороками их макро- и микроструктуры.

Например: смещенная усадочная раковина вызвала продольное расслоение головки рельса (рис. 28, а); надрыв полосы сегрегата, заполнявшего газовый пузырь, вызвал большую поперечную трещину усталости (рис. 28, б), которая занимала большую часть сечения головки рельса, но не выходила на ее поверхность, следуя за конфигурацией головки. Волосовина (рис. 28, в), возникшая из газового, подкоркового пузыря, заполненного сегрегатом, вызвала хрупкий поперечный излом рельса (рис. 28, г). Флокены вызвали усталостную трещину в коленчатом вале (рис. 29, а) и поперечную усталостную трещину в головке рельса (рис. 29, б), которая вышла на его поверхность. Неметаллические включения, окись алюминия  $Al_2O_3$  (глинозем), вызвали продольное расслоение головки рельса по усталостной трещине (рис. 29, в и г). Такие поломки, как и закалочные трещины, происходят вследствие концентрации напряжений в месте пороков макро- и микроструктуры.



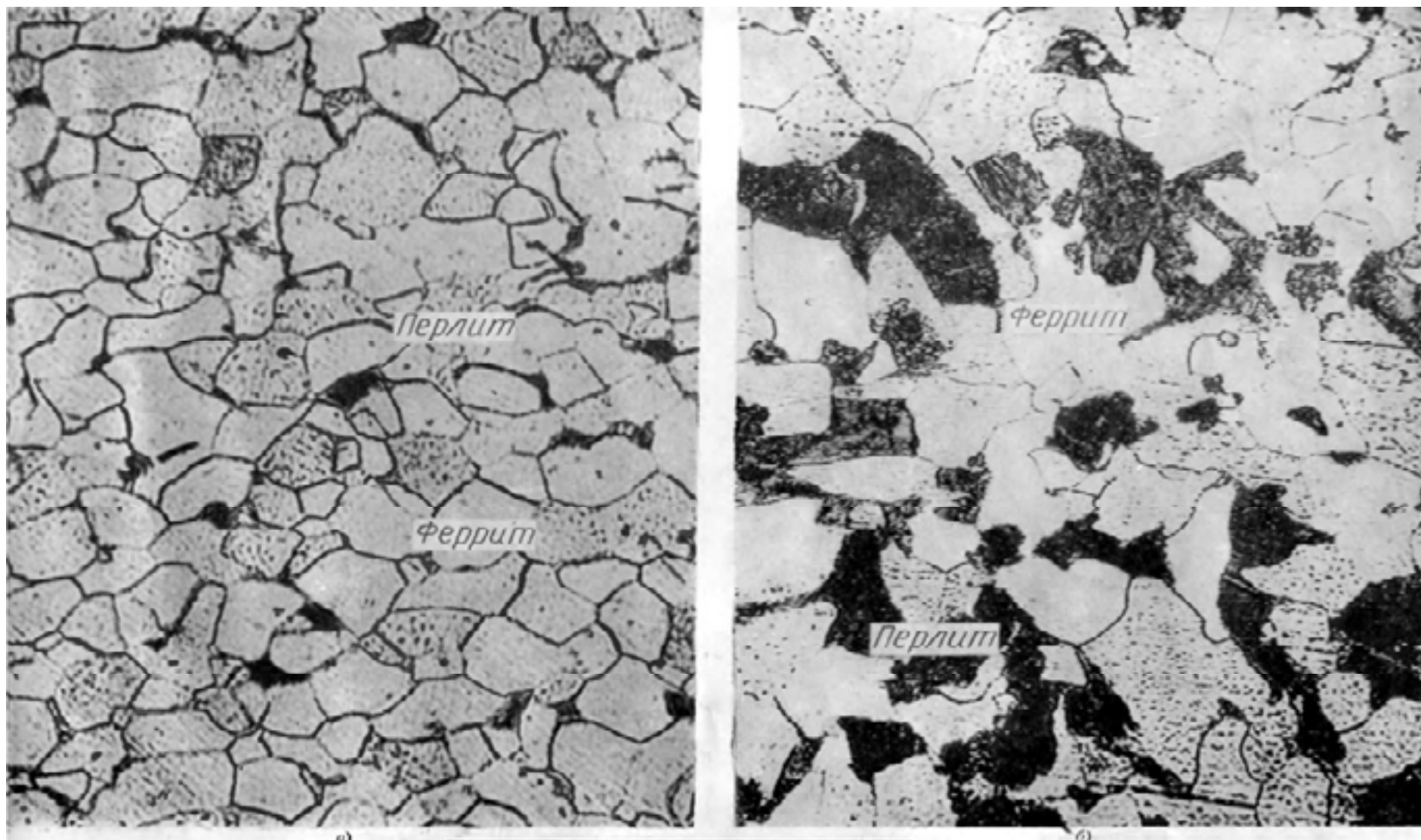
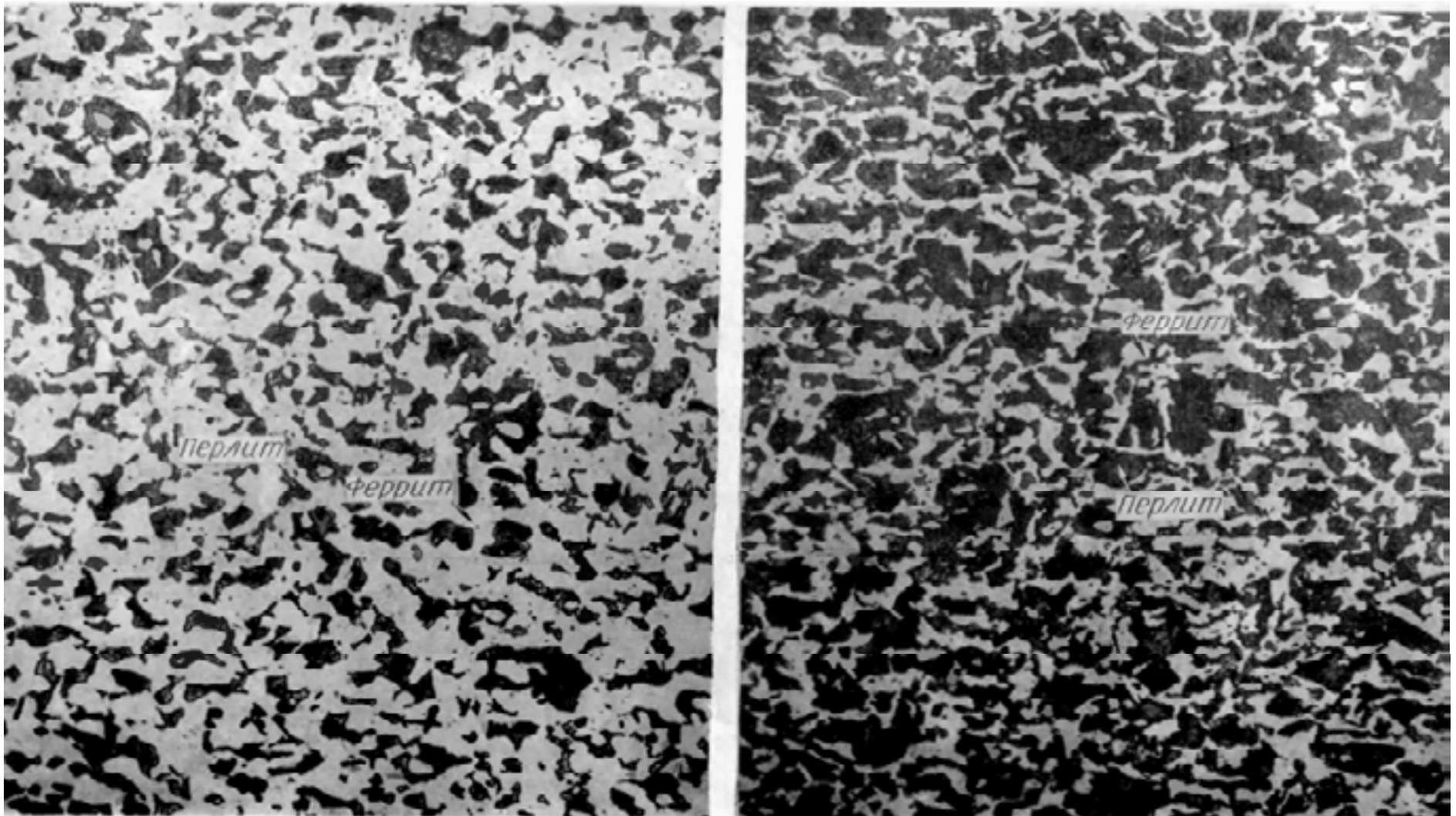


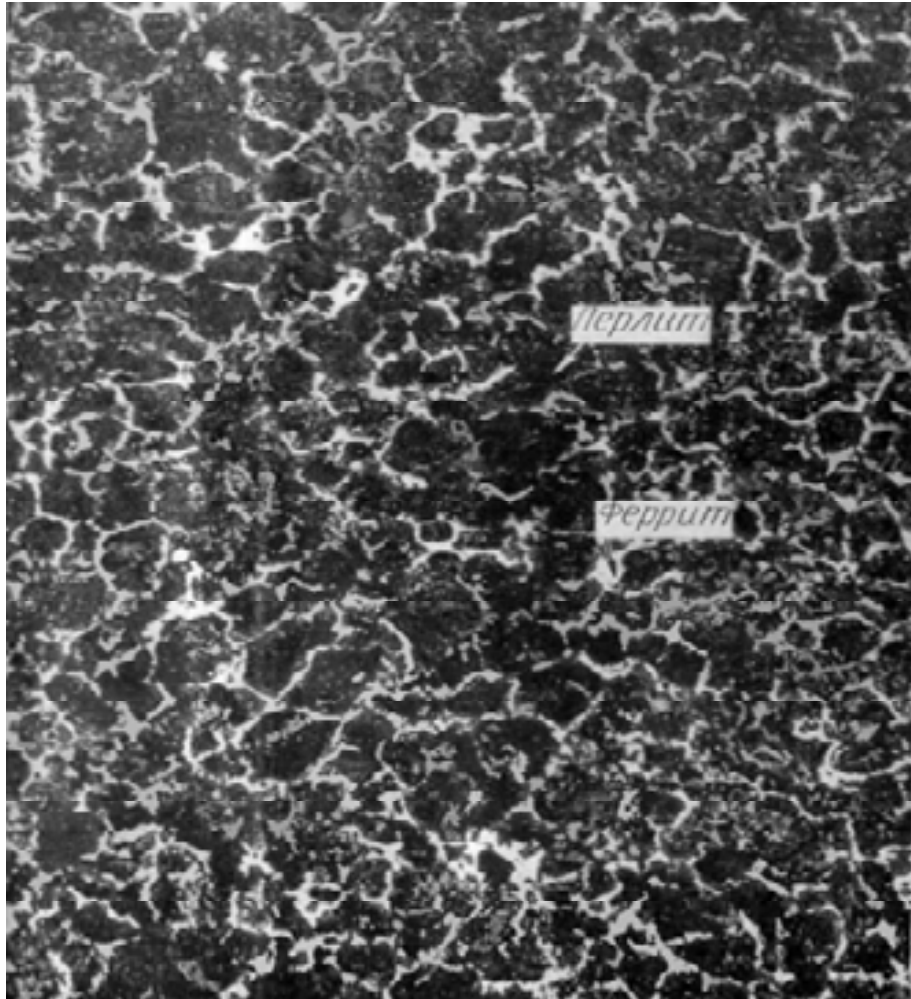
Рис. 19. Сталь;  $\times 200$ : а — с 0,1% С; б — с 0,2% С. Светлые поля — феррит, темные — перлит



а)

б)

Рис. 20. Сталь;  $\times 200$ : а — с 0,3% С; б — с 0,4% С. Светлые поля – феррит, темные – перлит



а)



б)

Рис. 21. Сталь;  $\times 200$ ; а — с 0,6% С (темные поля — перлит и светлая сетка феррита); б — с 1,2% С (темные поля — перлит и светлая сетка цементита)



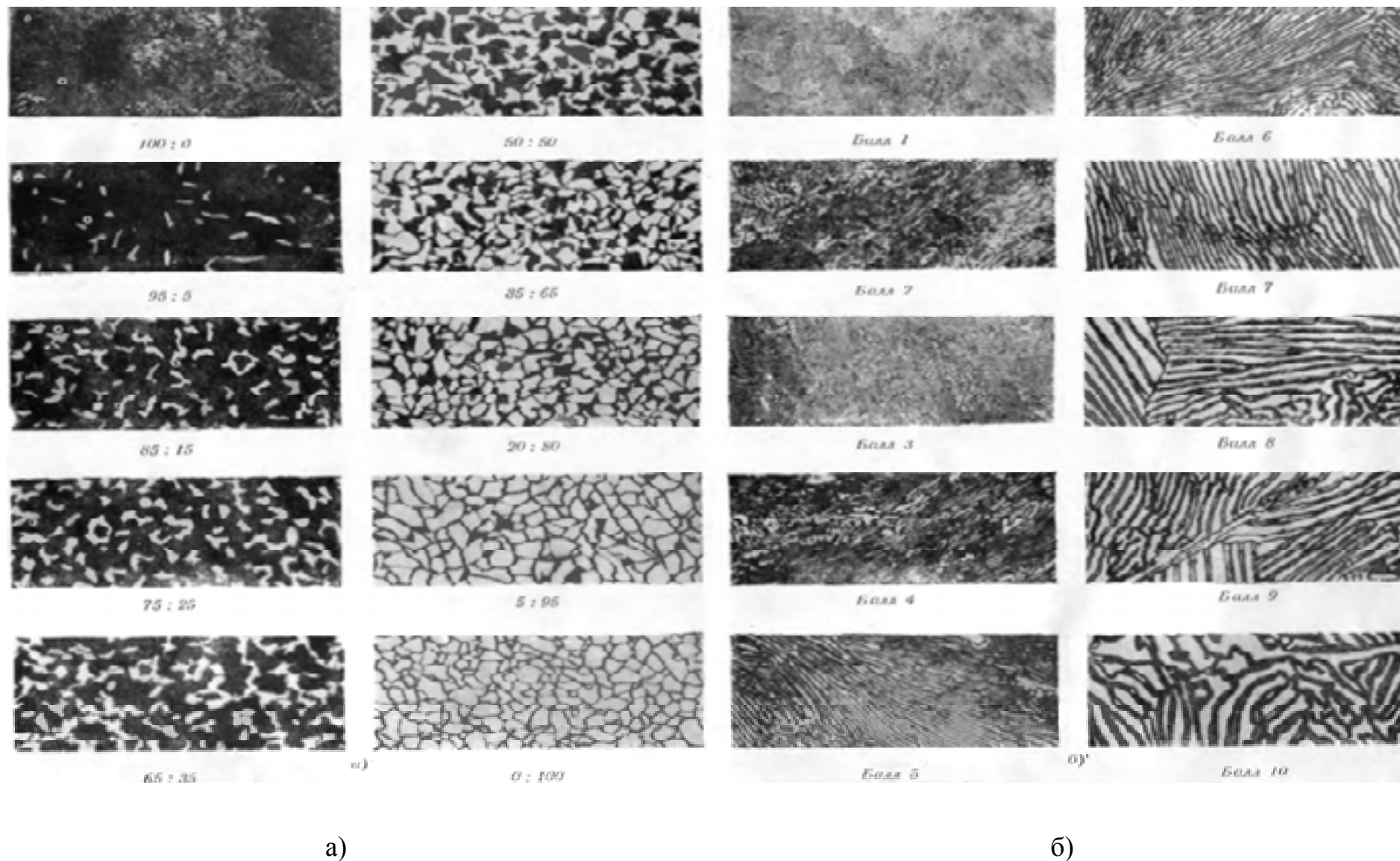
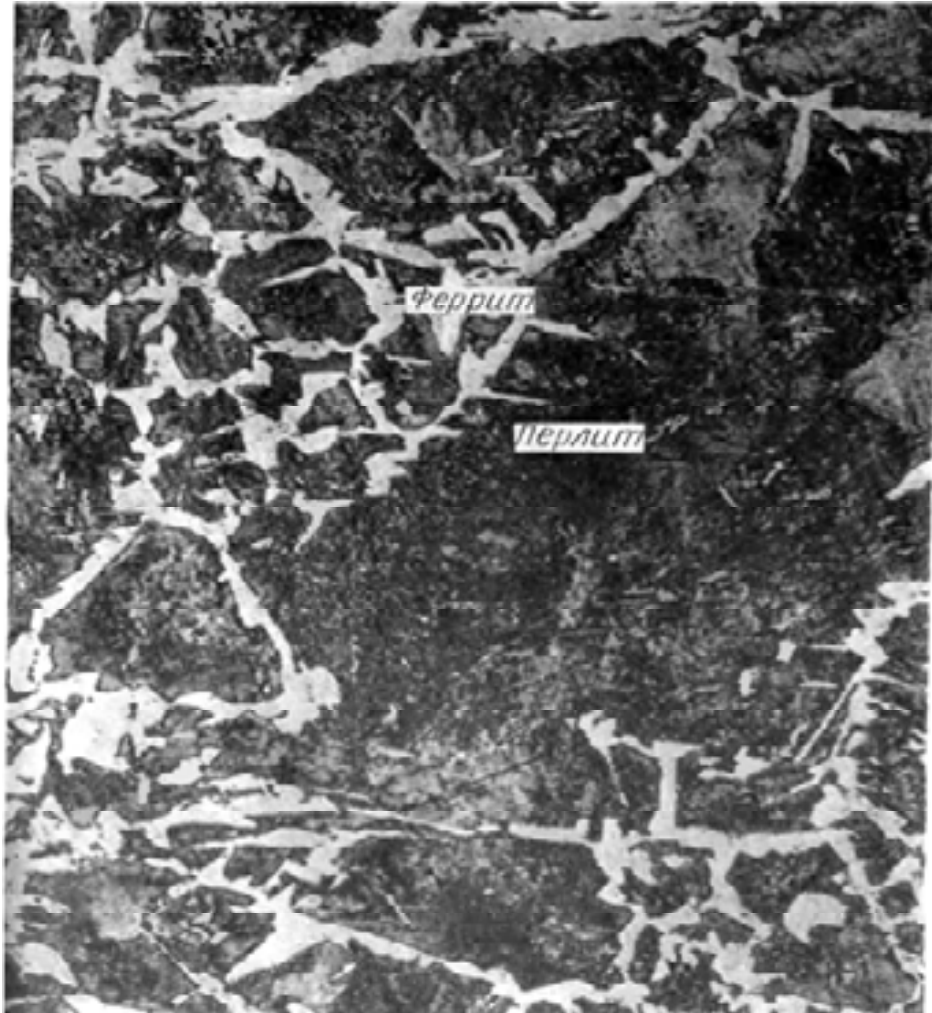


Рис. 22. Эталоны микроструктуры стали: а – соотношение перлита и феррита,  $\times 100$ ; б – дисперсность (измельченность) пластинчатого перлита,  $\times 1000$

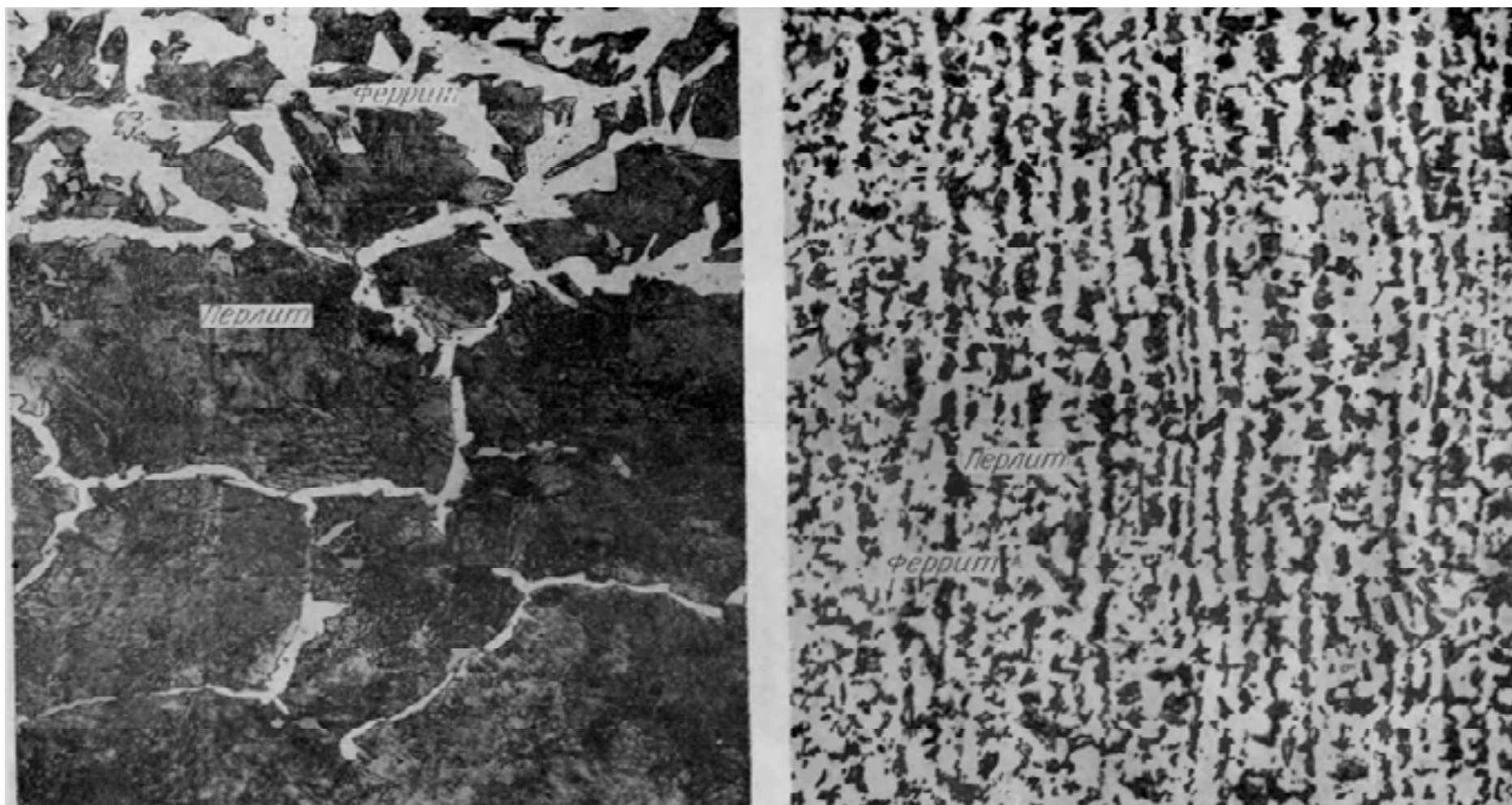


а)



б)

Рис. 23. Пороки микроструктуры стали;  $\times 200$ : а – крупнозернистая структура стали; б – видманштеттова структура стали



а)

б)

Рис. 24. Пороки микроструктуры стали; x200: а – обезуглероживание поверхности стали; б – строчечная структура стали

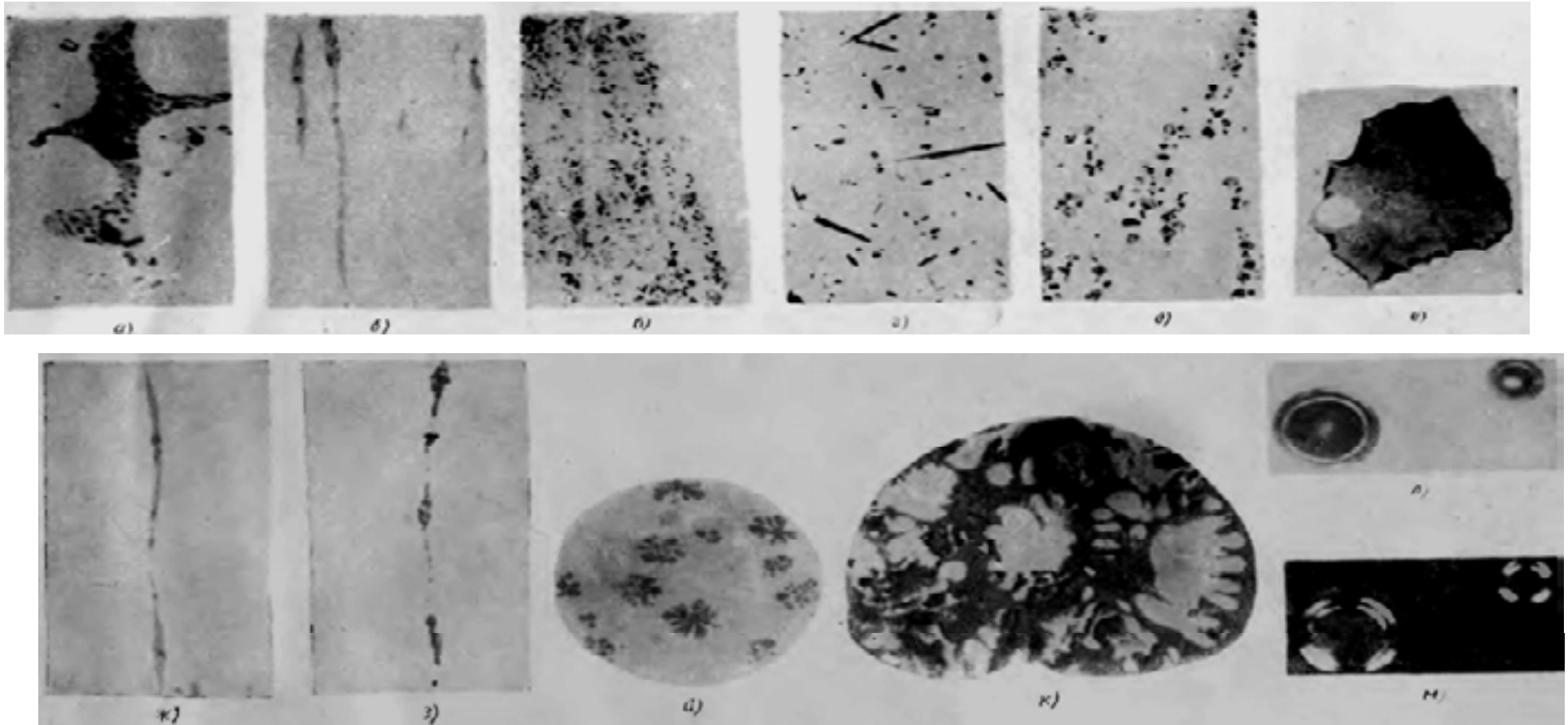


Рис. 25. Неметаллические включения в стали: а – эвтектика FeS–Fe, x1000; б – деформированный пластичный MnS, x500; в – твердая и хрупкая окись алюминия  $Al_2O_3$ , x500; г – нитрид алюминия AlN, x500; д – нитрид титана TiN, x500; е – силикатное включение, содержащее никель, x500; ж – пластичный силикат, x100; з – хрупкий силикат, x100; и – файялит ( $2FeO \cdot SiO_2$ ) с выделившейся двуокисью кремния, x500; к – файялит с выделившейся закисью железа, x200; л – кремнезем ( $SiO_2$ ) при обычном освещении, x500; м – кремнезем в поляризованном свете, x500

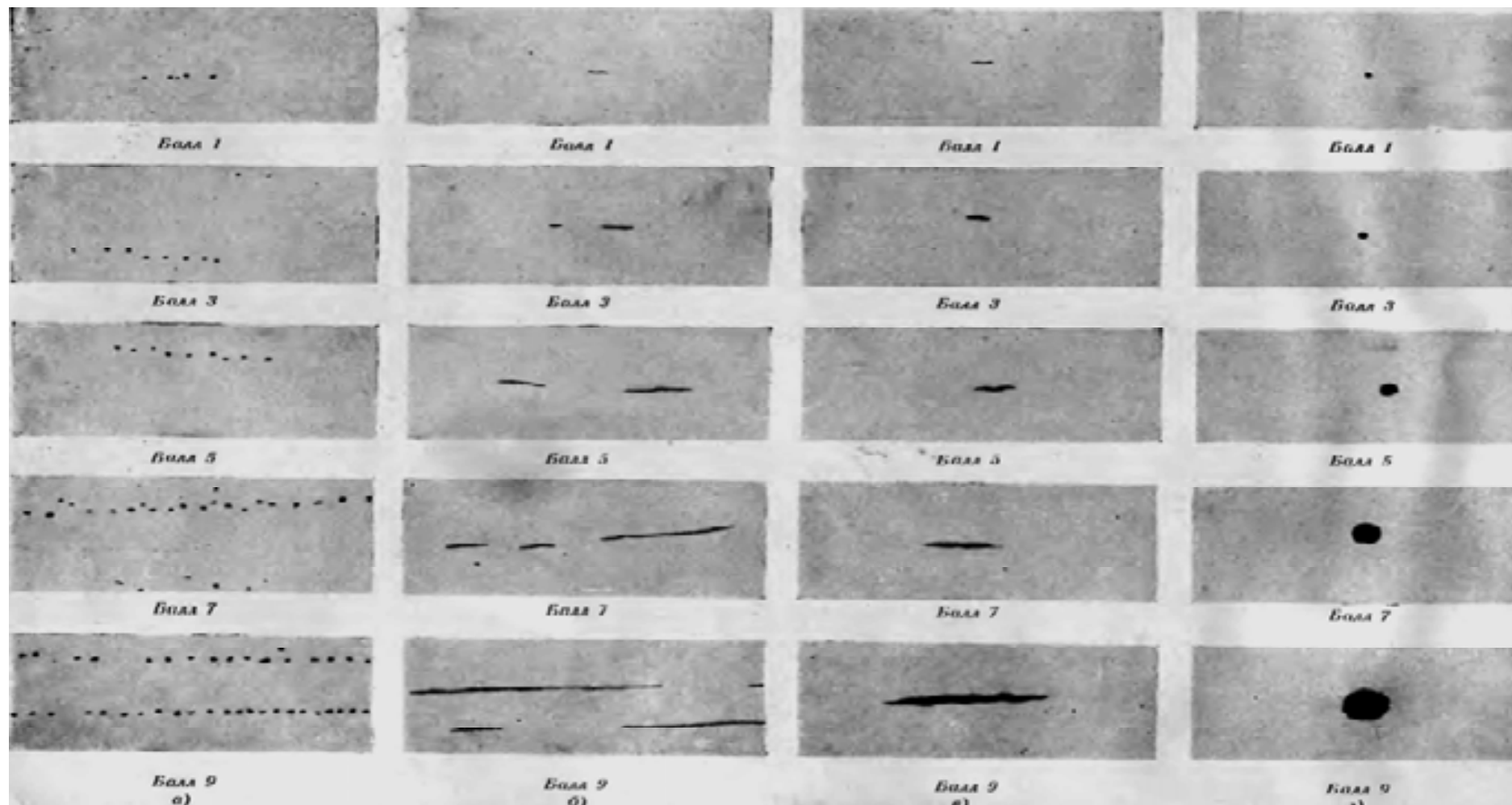


Рис. 26. Эталонные неметаллические включения;  $\times 100$ : а – оксиды; б – сульфиды; в – пластичные силикаты; г – глобулярные включения



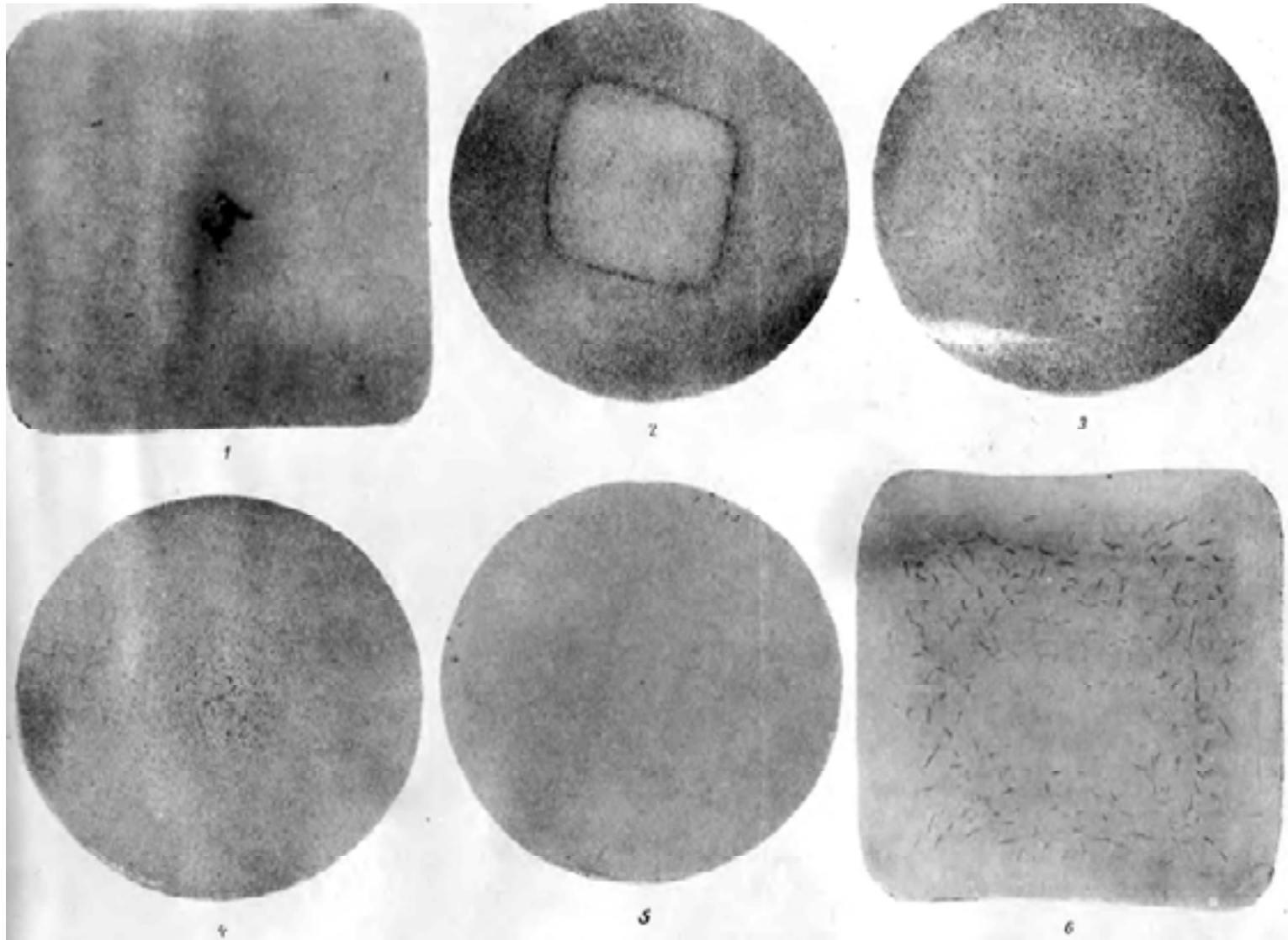


Рис. 27. Пороки макроструктуры стали: 1 – остатки усадочной раковины; 2 – ликвационный квадрат; 3 – общая пористость; 4 – центральная пористость; 5 – подкорковые пузыри; 6 – флокены

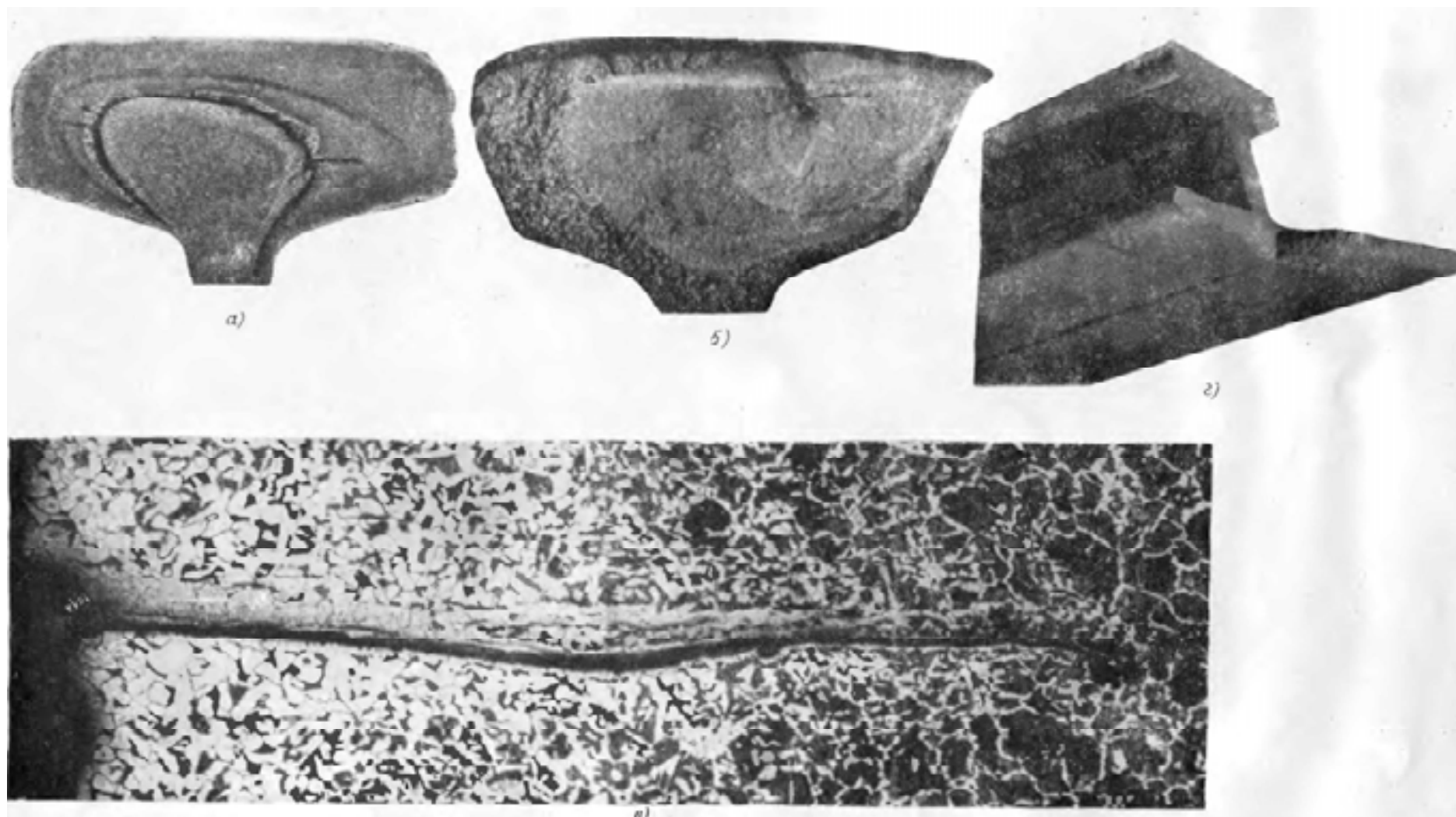
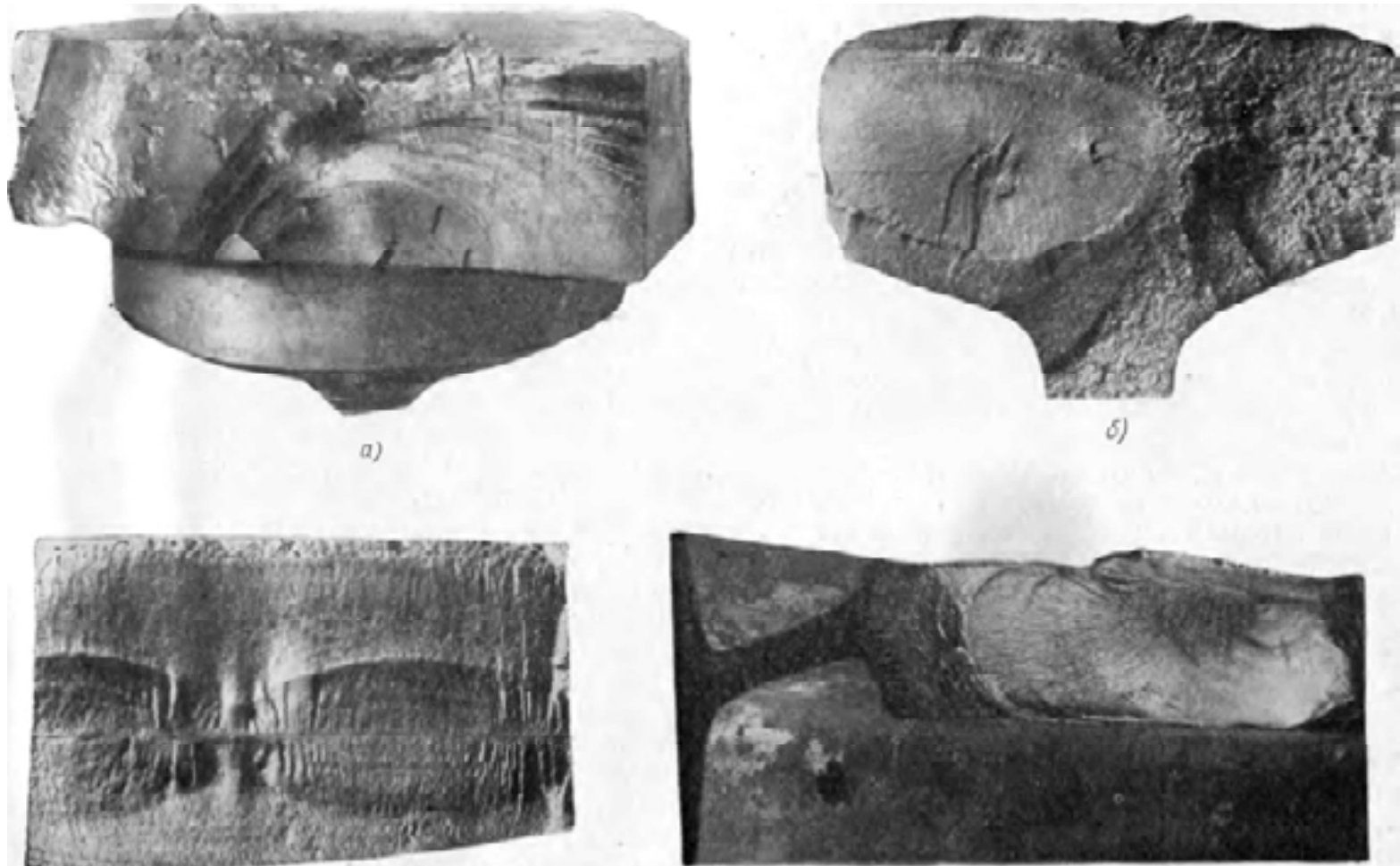


Рис. 28. Поломки изделий вследствие пороков макро- и микроструктуры стали: а – продольное расслоение головки рельса по остаткам смещенной усадочной раковины; б – поперечный излом усталости, возникший в месте газового пузыря, заполненного сегрегатом, в – микроструктура стали, где находится волосовина; г – хрупкий поперечный излом от волосовины (раскатанного подкоркового пузыря, заполненного сегрегатом)



в)

г)

Рис. 29. Поломки изделий вследствие пороков макро- и микроструктуры стали: а — усталостный излом коленчатого вала, возникший от флокена на поверхности щеки вблизи галтели; б — поперечный излом усталости у рельса, возникший в месте флокена; в — продольное расслоение головки рельса, образовавшееся от включений окиси алюминия  $Al_2O_3$  (глинозема); г — то же, что и в, но расслоение завернуто вниз, переходя в поперечную трещину



## Микроструктура чугуна

**Графит.** Графит в чугуне является кристаллической разновидностью углерода, обладающей гексагональной решеткой со слоистым расположением атомов или твердым раствором железа и других элементов на его основе. Под микроскопом графит имеет черный (темный) вид.

Для серого чугуна лучшими являются мелкие, завихренные включения пластинчатого графита (рис. 30, а). Крупные и прямолинейные графитные включения (рис. 30, б), разделяющие металлическую основу и резко понижающие предел прочности на растяжение серого чугуна, являются недопустимыми.

В высокопрочном магниевом чугуне графитные включения имеют шаровидную форму (рис. 31, а), а в ковком – хлопьевидную (рис. 31, б).

Приготовление микрошлифов с графитом в структуре требует особой осторожности, чтобы не вырвать и не вымыть порошкообразного графита. Графит удобнее наблюдать на светлой металлической основе до травления.

**Металлическая основа серого чугуна.** После травления микроструктура серого чугуна может оказаться перлитной (рис. 32, а), отвечающей высокой твердости, износостойкости и вместе с тем удовлетворительной обрабатываемости резанием.

Наличие феррита в металлической основе (рис. 32, б) снижает механические свойства серого чугуна и особенно его твердость и износостойкость.

Ферритная микроструктура серого чугуна (рис. 33, а) ведет к недопустимо низкой твердости и износостойкости.

Перлитно-цементитная металлическая основа чугуна (рис. 33, б) делает чугун твердым и ухудшает его обрабатываемость режущим инструментом, а крупные выделения цементита вызывают отбел и препятствуют его обработке резанием.

Подобным же образом действуют и выделения фосфидной эвтектики в чугуне, которые очень тверды: тройная фосфидная эвтектика  $Fe_3P - Fe_3C - Fe$  (рис. 34, а) и двойная  $Fe_3P - Fe$  (рис. 34, б).

**Микроструктура низкоуглеродистого модифицированного чугуна.** Этот чугун до модифицирования имеет микроструктуру (рис. 35, а), состоящую из перлита и цементита. После модифицирования чугуна смесью 75%-го ферросилиция и алюминия его микроструктура (рис. 35, б) состоит из мелких, завихренных, равномерно распределенных графитных включений в перлитной металлической основе.

**Микроструктура высокопрочного магниевого чугуна.** Чугун до модифицирования имеет микроструктуру серого чугуна с пластинчатым графитом (рис. 36, а). После добавки лигатуры из магния с 75%-м ферросилицием его микроструктура состоит из перлита, феррита и шаровидного графита (рис. 36, б).

**Эталоны микроструктуры чугуна.** Для количественной оценки микроструктуры чугуна предусматривается ряд эталонных шкал, как для графитных включений, так и для металлической основы.

Количественная оценка микроструктуры отливок, как из серого, так и из высокопрочного чугуна по графиту до травления и по металлической основе после травления производится буквенно-цифровыми баллами путем сравнения с эталонными шкалами.

Для графита предусмотрены шкалы: по форме – характеру распределения графитных включений в структуре (рис. 37, а); преимущественной их длине (рис. 37, б); диаметру шаровидного графита (рис. 37, в).

Для металлической основы предусмотрены шкалы: по дисперсности перлита (рис. 38, а); соотношению перлита и феррита в сером чугуне (рис. 38, б); соотношению перлита и феррита в высокопрочном чугуне (рис. 38, в); соотношению цементита и перлита и соотношению фосфидной эвтектики и перлита (рис. 38, г).

Все эти шкалы снабжены соответствующими буквенно-цифровыми обозначениями.

**Микроструктура ковкого чугуна.** Микроструктура белого чугуна, из которого путем отжига получается ковкий чугун, состоит из перлита и отдельных выделений ледебурита и структурно свободного цементита (рис. 39, а). Отжиг при 950 °С с целью проведения первой стадии графитизации (графитизации структурно свободного цементита и ледебурита) дает структуру (рис. 39, б), состоящую из хлопьевидного графита, окруженного ферритом, и перлита. Вторая стадия графитизации (графитизация цементита, входящего в состав перлита) происходит при 735 °С и дает структуру (рис. 39, в), состоящую из хлопьевидного графита и зерен феррита. Такая структура отличается хорошей пластичностью и вязкостью.

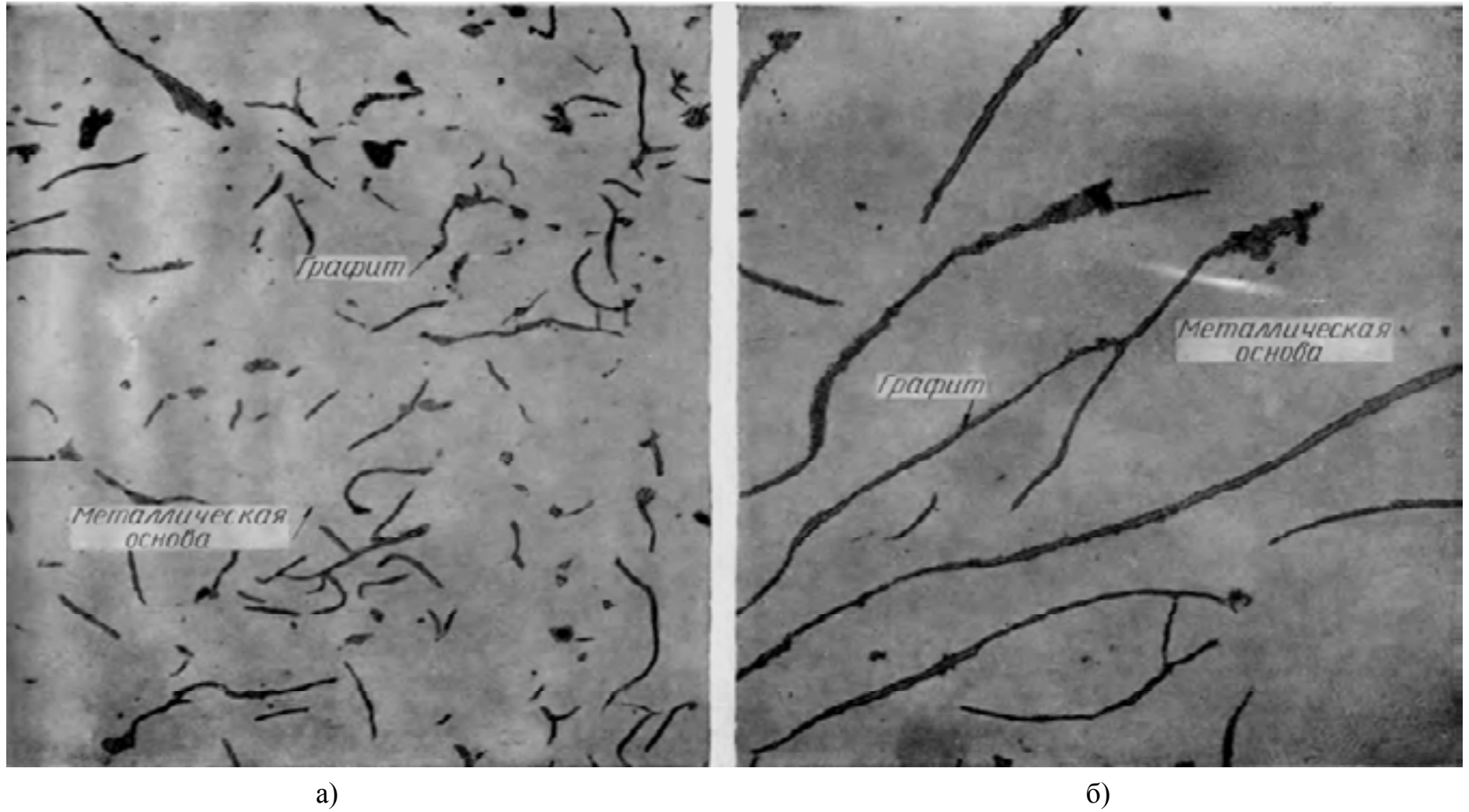
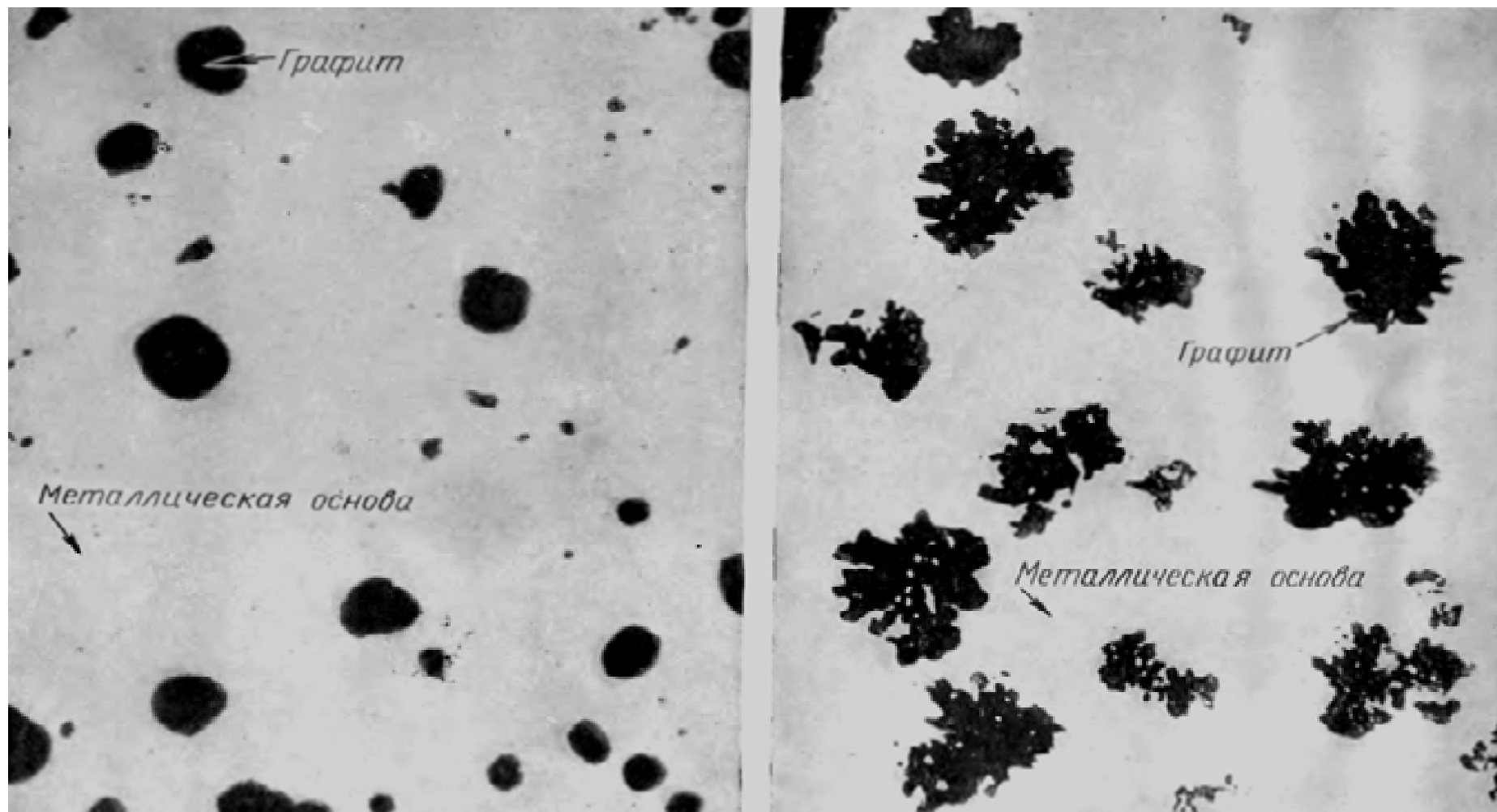


Рис. 30. Включения пластинчатого графита, до травления; x200: а – мелкие завихренные в сером чугуна с высокими механическими свойствами; б – крупные прямолинейные в сером чугуна с очень низкими механическими свойствами



а

б

Рис. 31. Графитные включения в микроструктуре чугуна до травления: а – шаровидные в высокопрочном; х200; б – хлопьевидные в ковком; х500

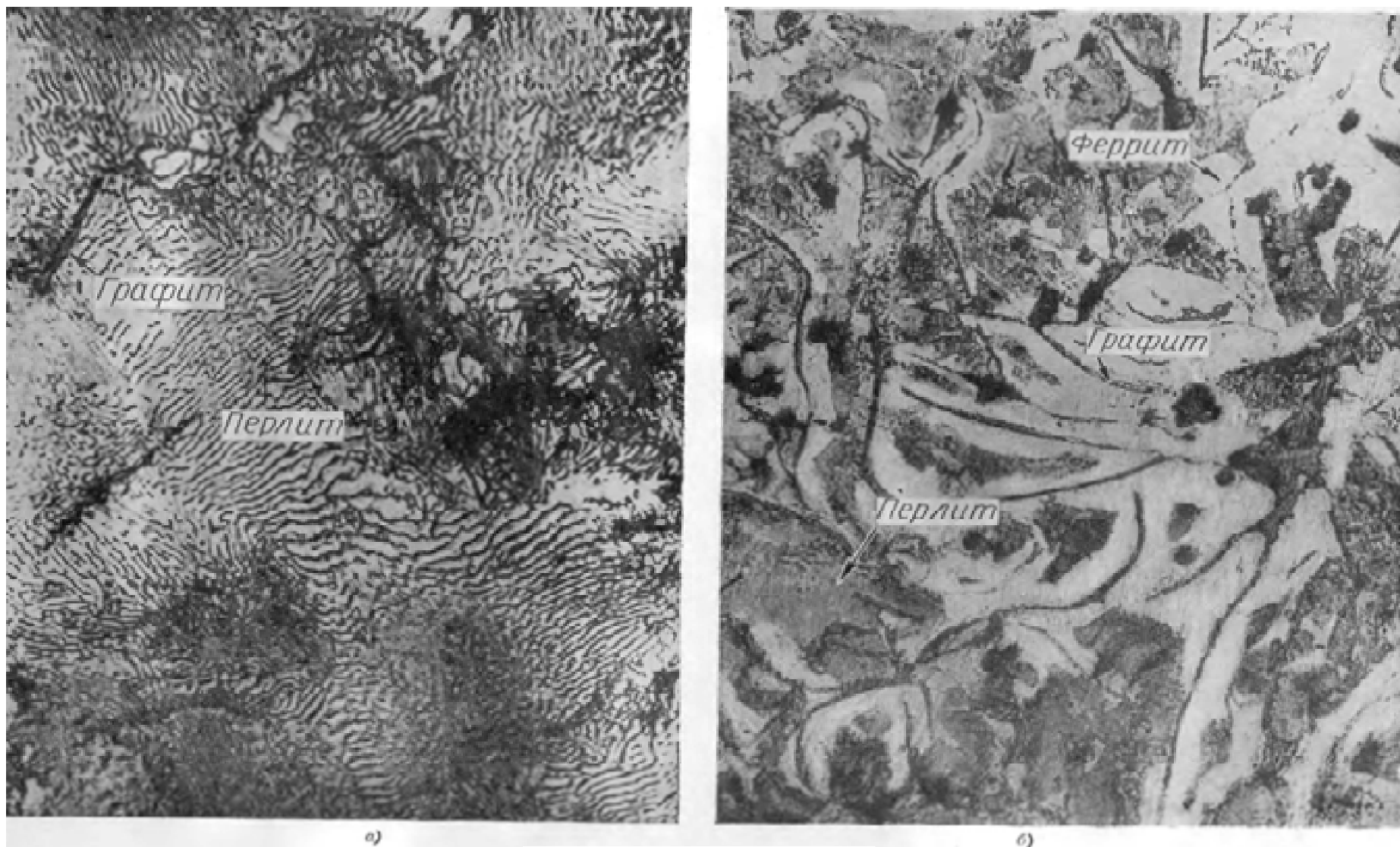


Рис. 32. Серый чугун после травления: а – перлитно-графитная микроструктура, отвечающая высокой твердости и износостойкости;  $\times 1000$ ; б – перлитно-феррито-графитная микроструктура, отвечающая пониженной твердости и износостойкости,  $\times 200$

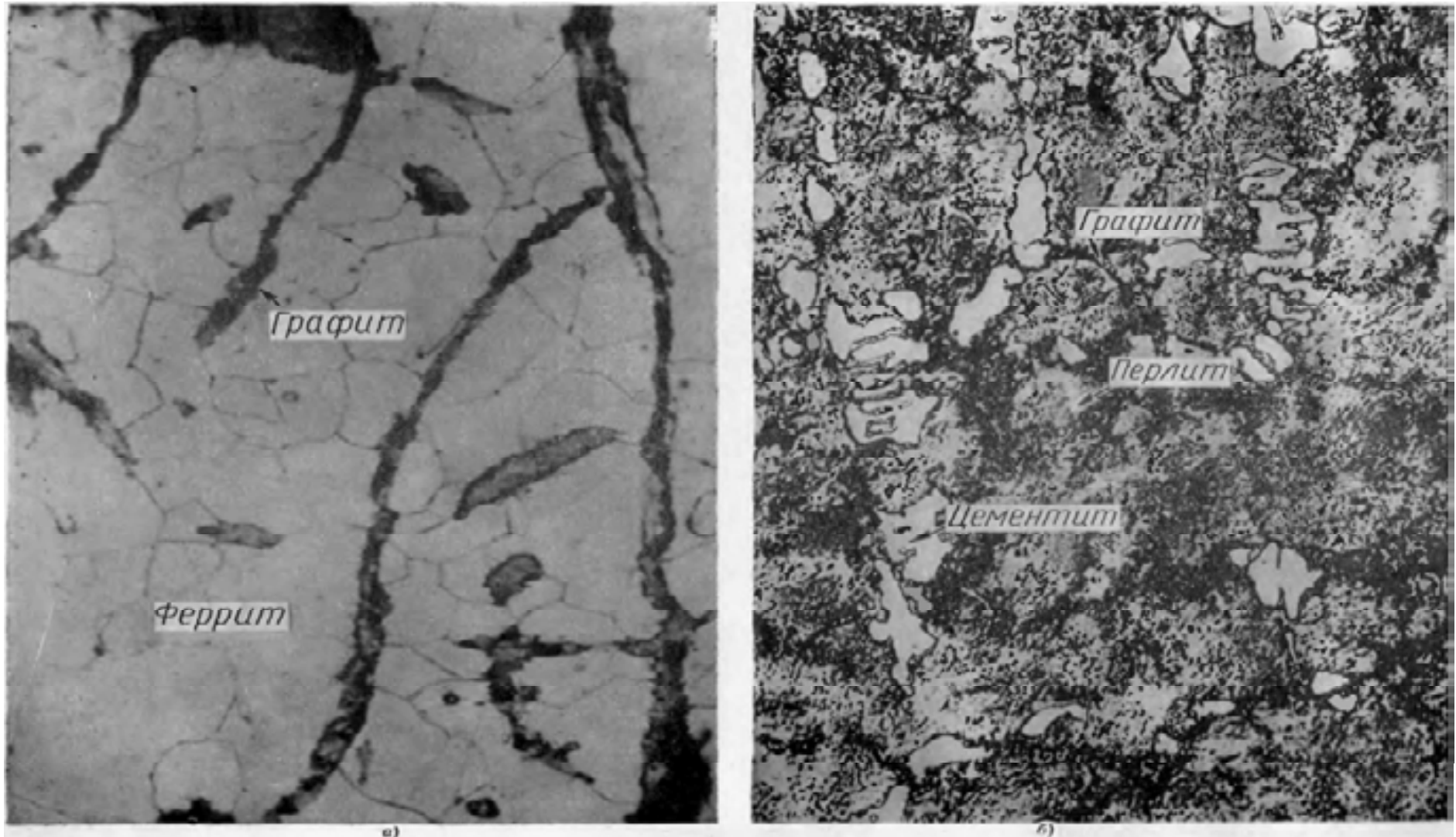
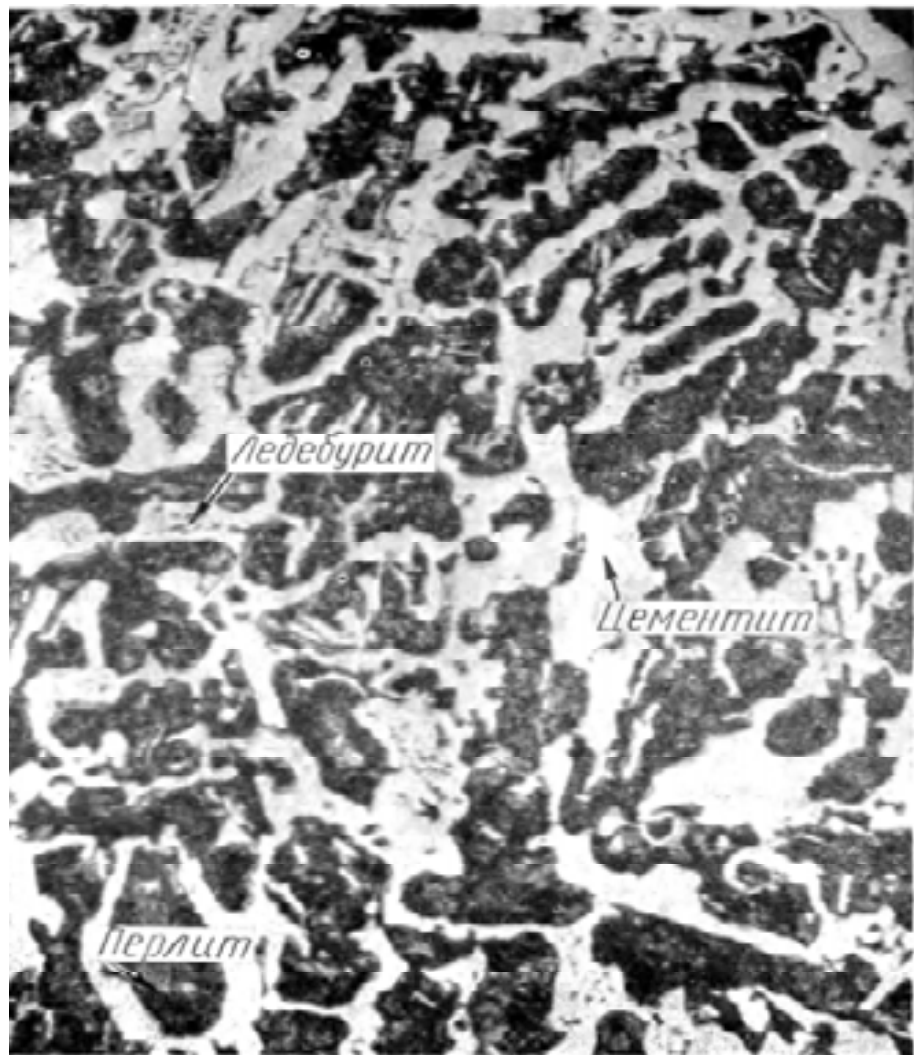


Рис. 33. Серый чугун: а – феррито-графитная микроструктура, отвечающая очень низкой твердости и износостойкости; х500; б – цементито-перлитно-графитная микроструктура, отвечающая очень плохой обрабатываемости режущим инструментом; х200



Рис. 34. Фосфидная эвтектика в сером чугуна, отличающаяся износостойкостью, твердостью и хрупкостью; x1000: а – тройная ( $\text{Fe}_3\text{P} - \text{Fe}_3\text{C} - \text{Fe}$ ); б – двойная ( $\text{Fe}_3\text{P} - \text{Fe}$ )





а)



б)

Рис. 35. Низкоуглеродистый чугун; x200: а – микроструктура до модифицирования (цементит и перлит); б – то же, но после модифицирования ферросилицием (графит и перлит)



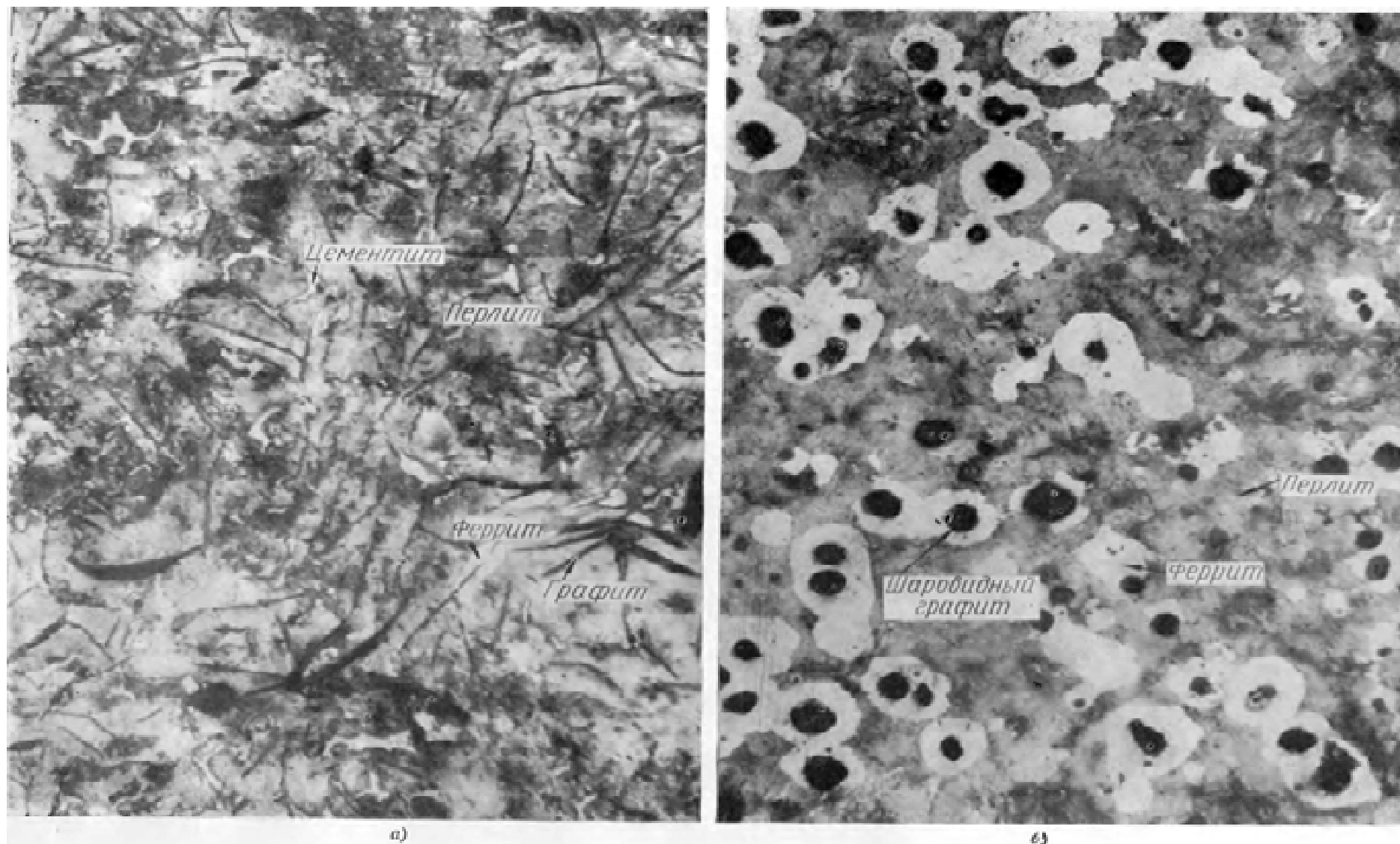


Рис. 36. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом; x200: а – микроструктура до модифицирования; б – то же после модифицирования лигатурой магния с ферросилицием – шаровидный графит, феррит и перлит

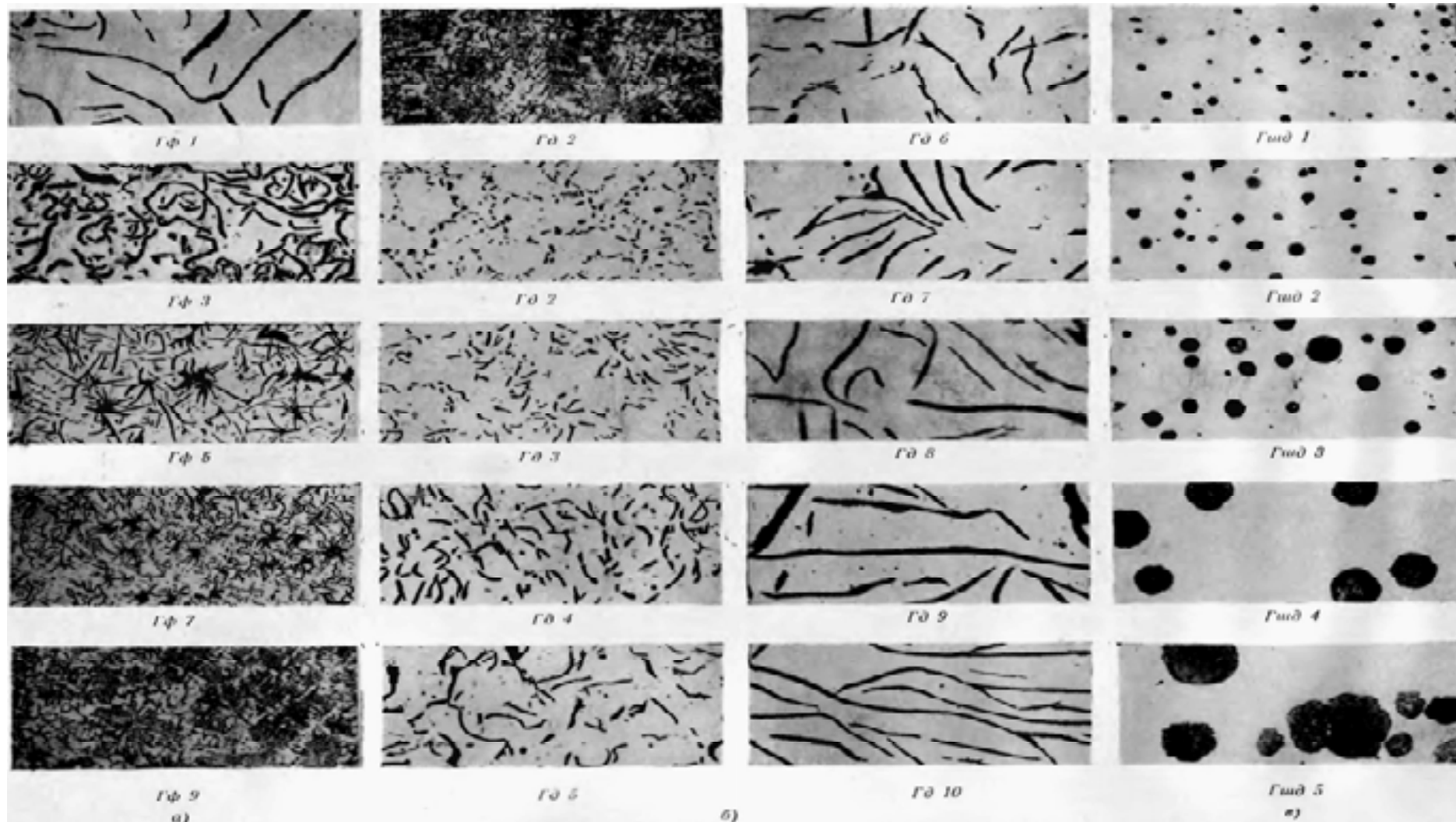


Рис. 37. Эталоны микроструктуры чугуна – шкалы для классификации графитных включений; x100: а – форма (характер их распределения в структуре); б – размеры пластинчатого графита (преимущественная длина); в – размеры шаровидного графита

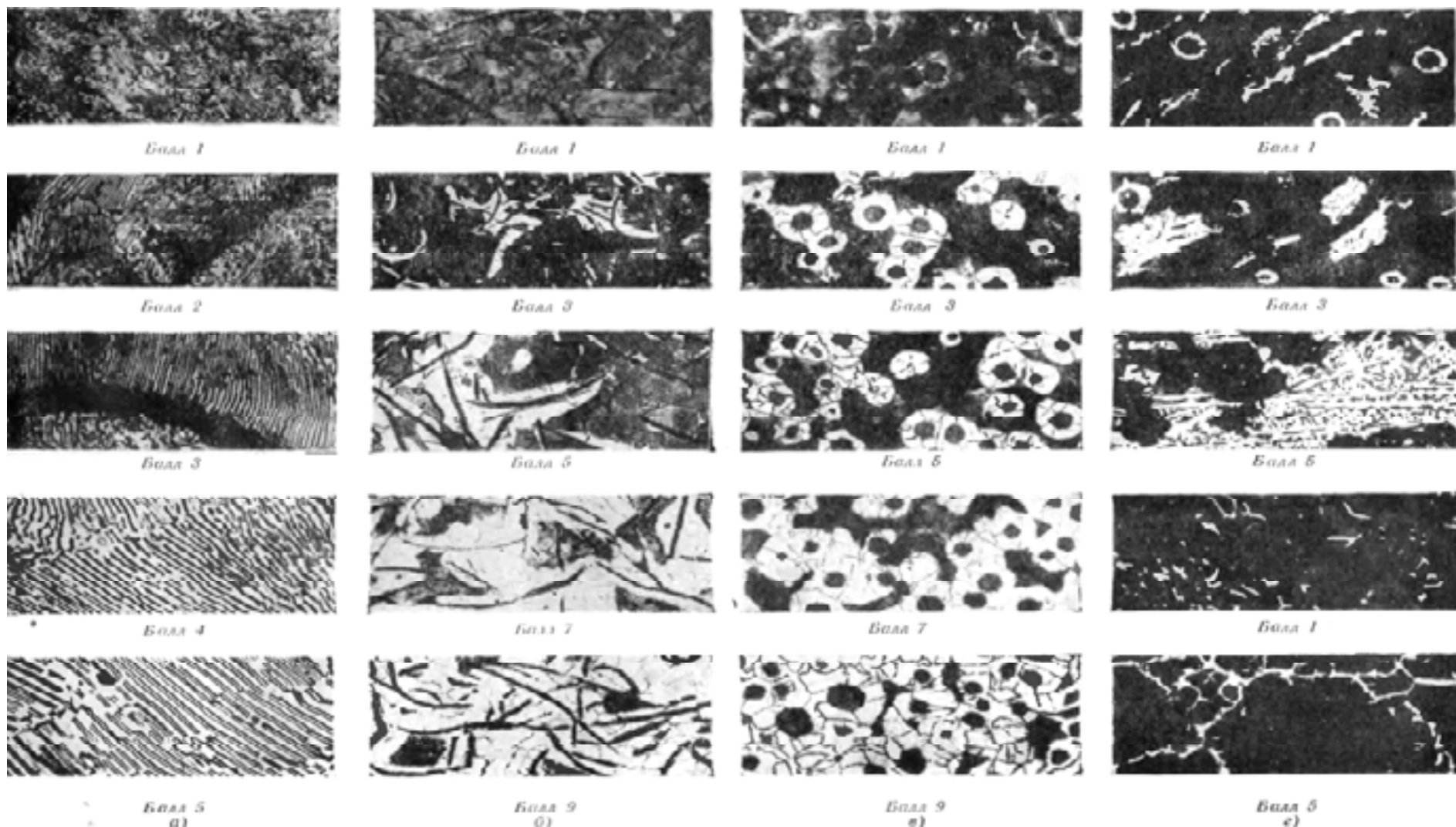


Рис. 38. Эталоны микроструктуры чугуна – шкалы для классификации структуры металлической основы: а – дисперсность перлита,  $\times 1000$ ; б – соотношение перлита и феррита в сером чугуне;  $\times 100$ ; в – соотношение перлита и феррита в высокопрочном чугуне,  $\times 100$ ; г – количество цементита или ледебурита;  $\times 100$

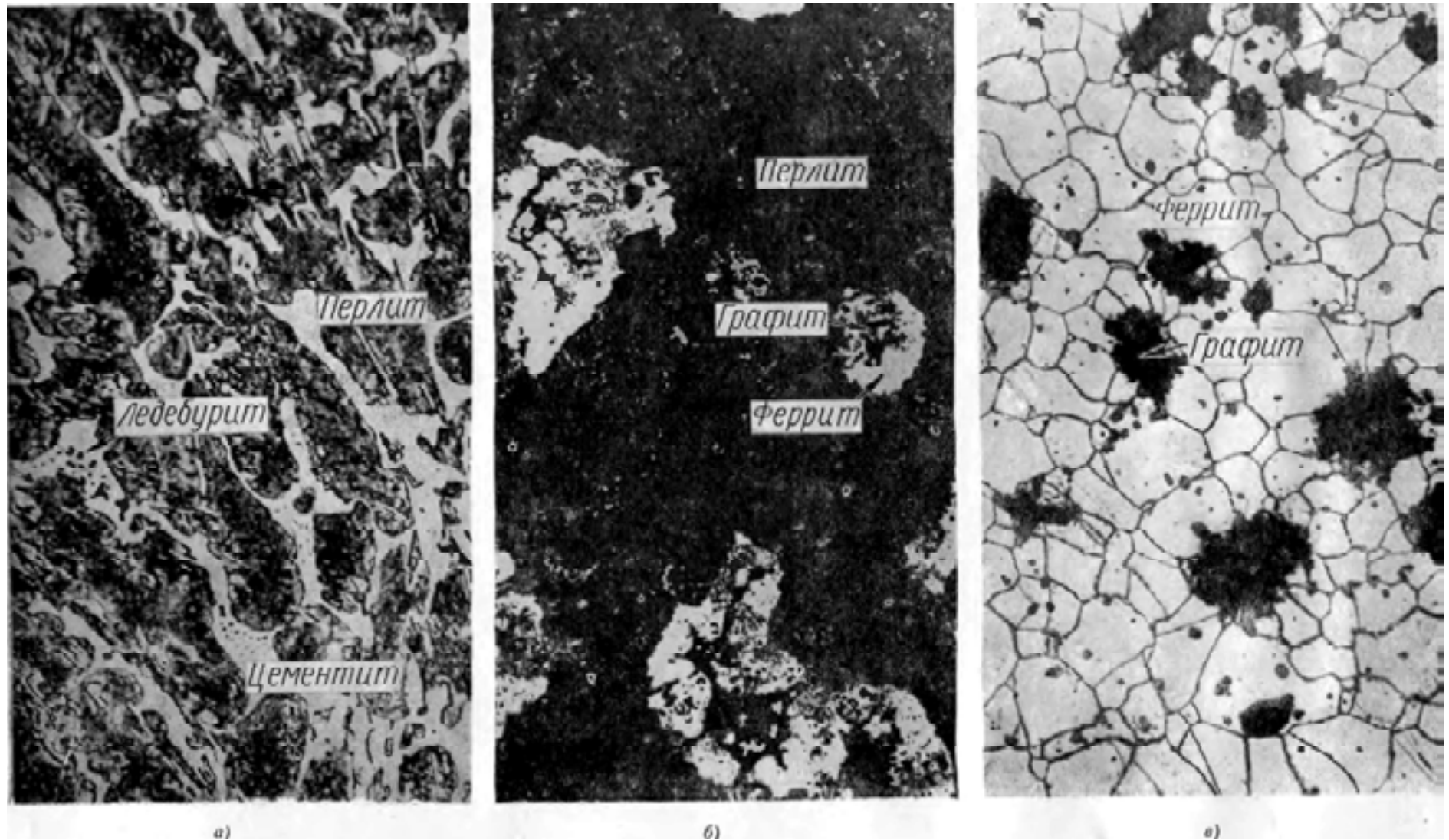


Рис. 39. Ковкий чугун;  $\times 250$ : а – до отжига (белый доэвтектический чугун); б – после отжига (после первой стадии графитизации); в – после отжига (после второй стадии графитизации)

## Микроструктура стали после закалки и отпуска

**Мартенсит и продукты его отпуска.** Под оптическим микроскопом мартенсит имеет светлое игольчатое строение (рис. 40). Чем мельче иглы мартенсита, тем выше его свойства. Под электронным микроскопом мартенсит (рис. 41, а) имеет однородную структуру твердого раствора.

Мартенсит является структурой закаленной стали и представляет собой пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе с тетрагональной решеткой. При невысокой температуре отпуска (120, 180, 200°C) электронная микроструктура отпущенного при этих температурах мартенсита (рис. 41, б, в, г) уже показывает в его структуре выделения мельчайших частичек. В остаточном же аустените, устойчивом до 260 °С, таких частичек не наблюдается. Отпущенный мартенсит – это уже не однородный твердый раствор, а механическая смесь частичек  $\epsilon$ -карбида и низкоуглеродистого мартенсита.

При температуре отпуска 260 °С заканчивается превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит и он исчезает из электронной микроструктуры (рис. 41, д).

Дальнейшее повышение температур отпуска до 320 °С вызывает образование троостита отпуска, электронная микроструктура которого (рис. 41, е) обнаруживает уже частички цементита.

**Сравнение продуктов изотермического превращения аустенита с продуктами отпуска мартенсита.** На рис. 42 приведены характерные примеры оптических и электронных микроструктур продуктов изотермического превращения аустенита стали с 0,8% С.

Под оптическим микроскопом троостит закалки наблюдается в виде темной игольчатой структуры (рис. 43, а), а троостит отпуска в виде очень темных сфероидов (рис. 43, в).

Под электронным же микроскопом эта разница обнаруживается еще ярче: троостит закалки имеет ясно выраженную пластинчатую структуру (рис. 43, б), а в структуре троостита отпуска наблюдаются зернышки и характерные короткие пластинки цементита (рис. 43, г).

Под оптическим микроскопом сорбит закалки имеет тонкопластинчатую структуру (рис. 44, а), а сорбит отпуска – светлую игольчатую (рис. 44, в).

Под электронным микроскопом в сорбите закалки (рис. 44, б) наблюдаются крупные пластинки цементита; в сорбите же отпуска частички цементита имеют зернистую или близкую к зернистой форму (рис. 44, г).

**Бейнит.** Верхний бейнит под оптическим микроскопом имеет типичную темную перистую структуру (рис. 45, а), а нижний бейнит – игольчатую (рис. 45, б).

Под электронным микроскопом верхний бейнит, образовавшийся при 370 °С, имеет структуру, состоящую из ферритной основы и внедренных в нее коротких пластинок с округлыми краями и зернышек твердого структурного элемента (рис. 46, а).

Электронная микроструктура нижнего бейнита (рис. 46, б) состоит из низкоуглеродистой мартенситной основы с внедренными в нее более мелкими, чем у верхнего бейнита, зернышками и более короткими пластинками из твердого структурного элемента.

**Мартенсит и остаточный аустенит.** Микроструктура закаленной высокоуглеродистой легированной стали (рис. 47, а) состоит из темных игл мартенсита и светлых полей аустенита.

**Мартенсит и феррит.** Микроструктура стали, нагретой для закалки выше нижней критической точки  $A_{C1}$  (727 °С), но ниже  $A_{C3}$ , когда феррит не мог полностью раствориться в аустените, после закалки состоит из мартенсита и сетки феррита (рис. 47, б).

**Мартенсит и троостит закалки.** Присутствие троостита закалки в мартенсите у структуры закаленной стали (рис. 47, в) указывает на недостаточную скорость охлаждения при закалке, например, в теплой воде, и может послужить причиной брака из-за низкой твердости закаленных изделий.

**Эталонные микроструктуры стали для термической обработки.** Для количественной оценки микроструктуры стали, предназначенной для термической обработки, приведены: шкала величины зерна стали (рис. 48, а); укрупненная шкала игольчатости мартенсита (рис. 48, б); укрупненная шкала для соотношения мартенсита и троостита закалки (рис. 48, в).



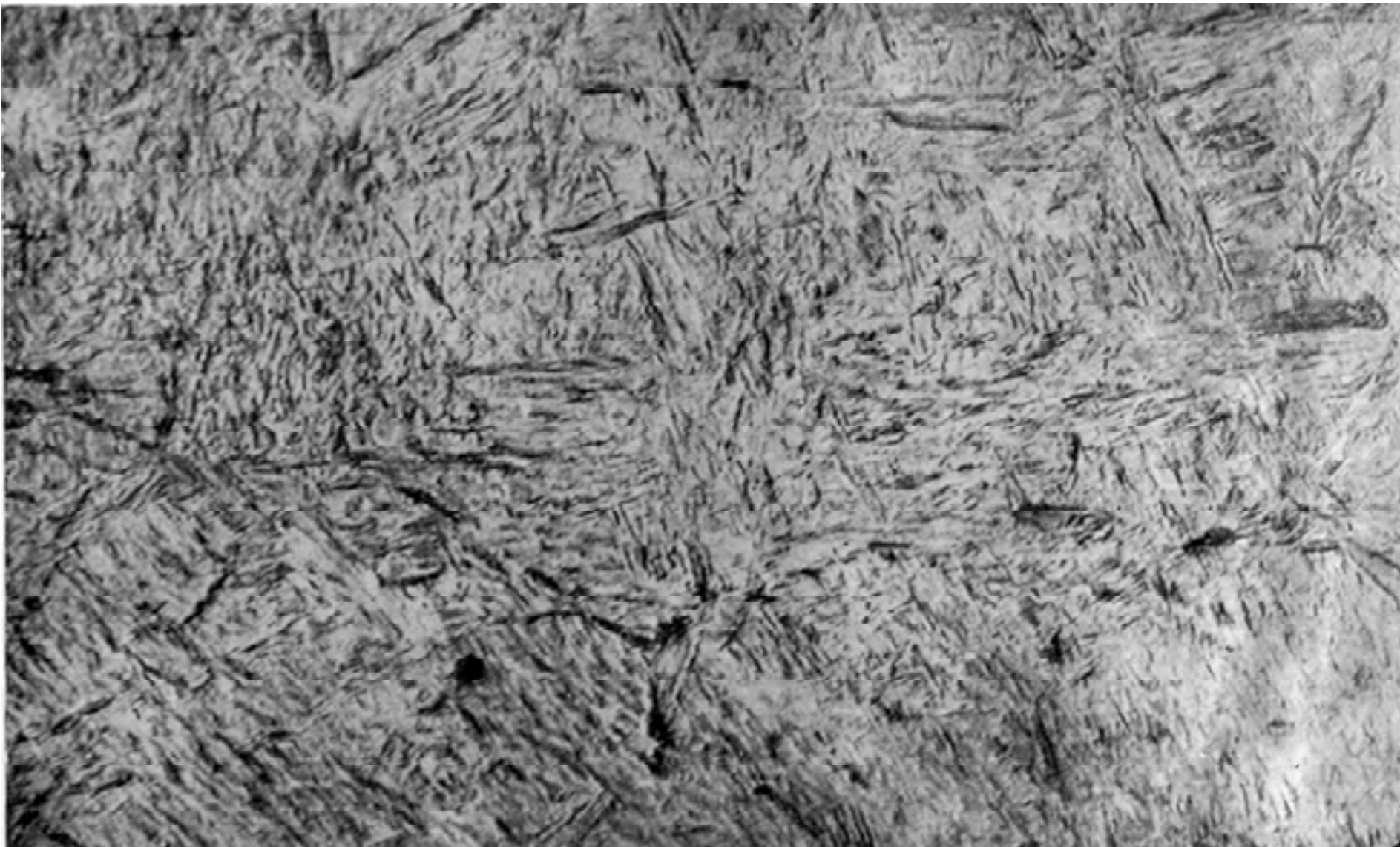


Рис 40. Мартенсит; x1000. Светлая игольчатая структура закаленной стали

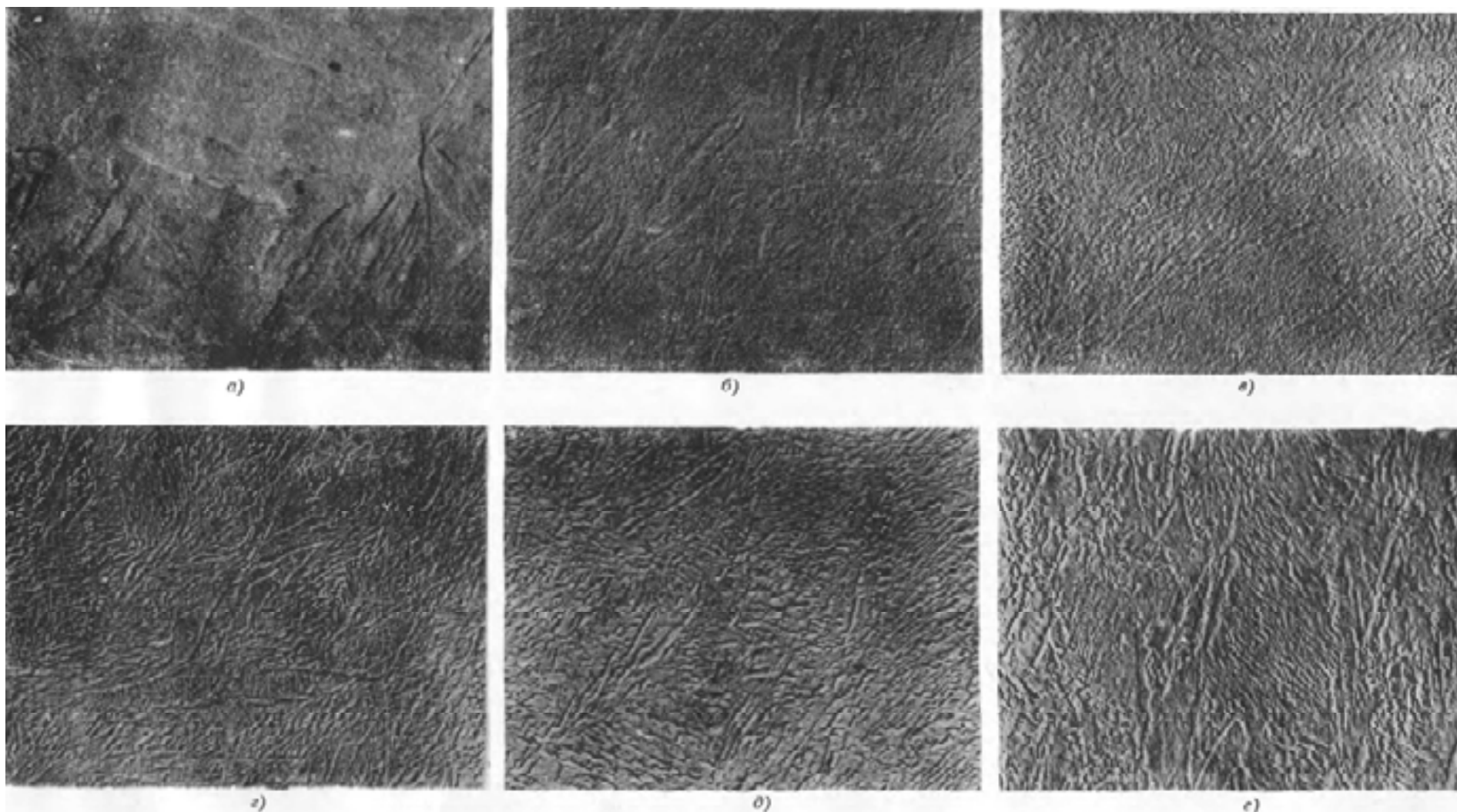


Рис. 41. Кинетика изменения микроструктуры мартенсита эвтектоидной стали при отпуске;  $\times 20000$ : а – мартенсит до отпуска; б – отпущенный мартенсит (1 час при  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); в – отпущенный мартенсит (1 час при  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); г – отпущенный мартенсит (1 час при  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); д – троостит отпуска (1 час при  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); е – троостит отпуска (1 час при  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



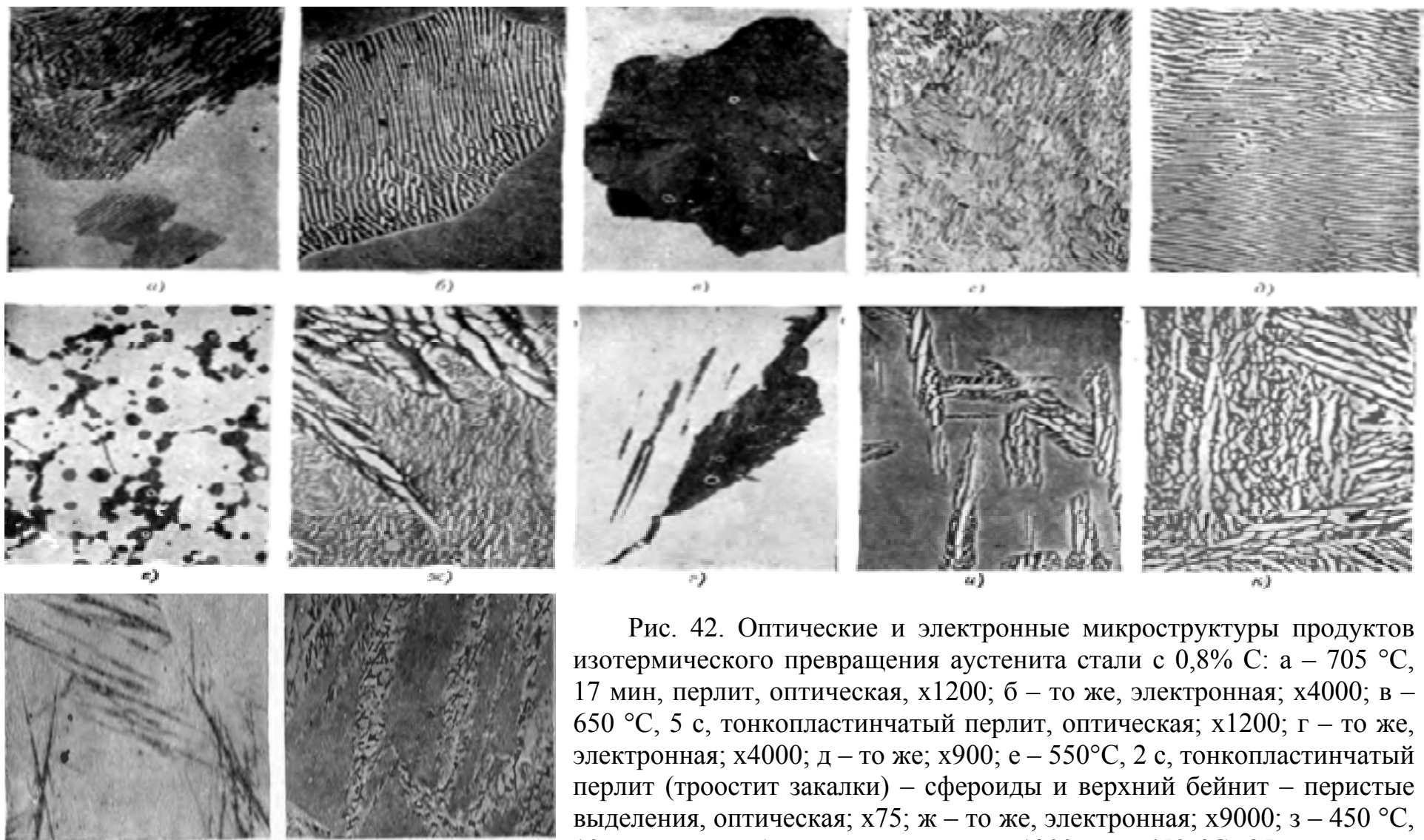


Рис. 42. Оптические и электронные микроструктуры продуктов изотермического превращения аустенита стали с 0,8% С: а – 705 °С, 17 мин, перлит, оптическая, х1200; б – то же, электронная; х4000; в – 650 °С, 5 с, тонкопластинчатый перлит, оптическая; х1200; г – то же, электронная; х4000; д – то же; х900; е – 550°С, 2 с, тонкопластинчатый перлит (троостит закалки) – сфероиды и верхний бейнит – перистые выделения, оптическая; х75; ж – то же, электронная; х9000; з – 450 °С, 10 с, верхний бейнит, оптическая; х1200; и – 450 °С, 25 с, верхний бейнит, электронная; х4000; к – то же, электронная; х7000; л – 250 °С, 10 мин, нижний бейнит – иглы, оптическая; х1200; м – то же, электронная; х13500

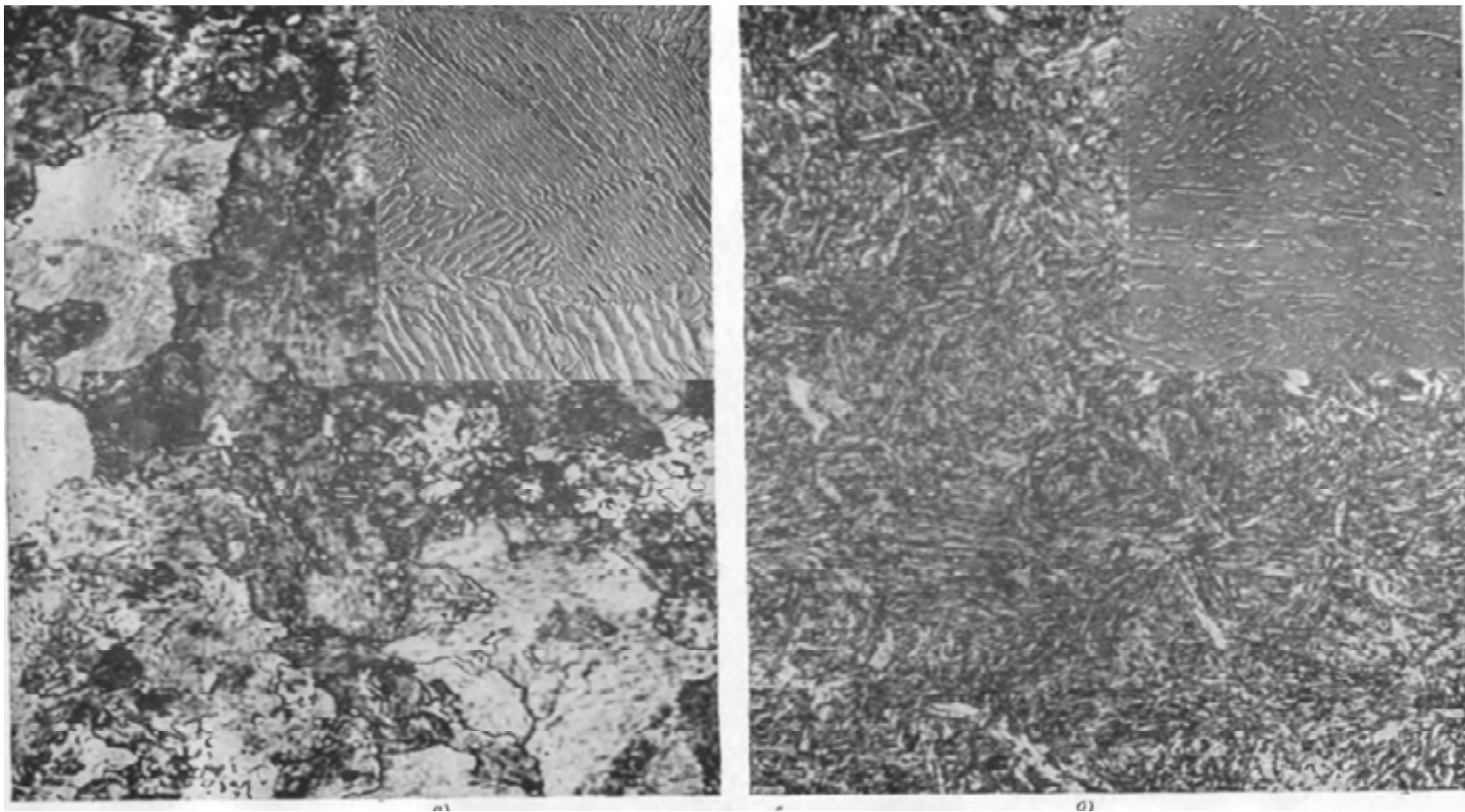


Рис. 43. Троостит: а – троостит закалки: x1000; справа сверху – то же; x15000; б – троостит отпуска; x1000; справа сверху – то же; x15000

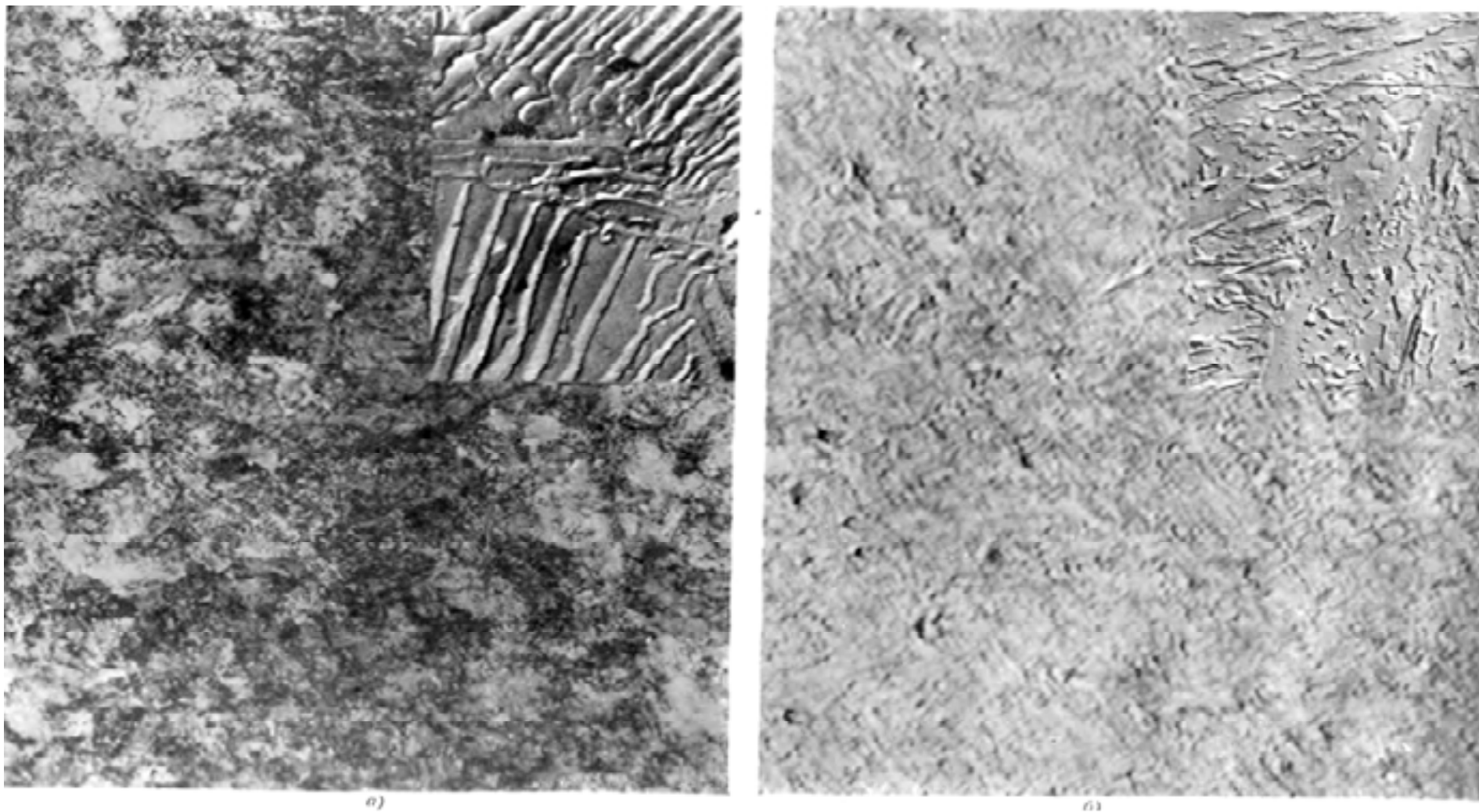


Рис. 44. Сорбит: а – сорбит закалки;  $\times 1000$ ; справа вверху – то же:  $\times 15000$ ; б – сорбит отпуска;  $\times 1000$ ; справа вверху – то же;  $\times 15000$

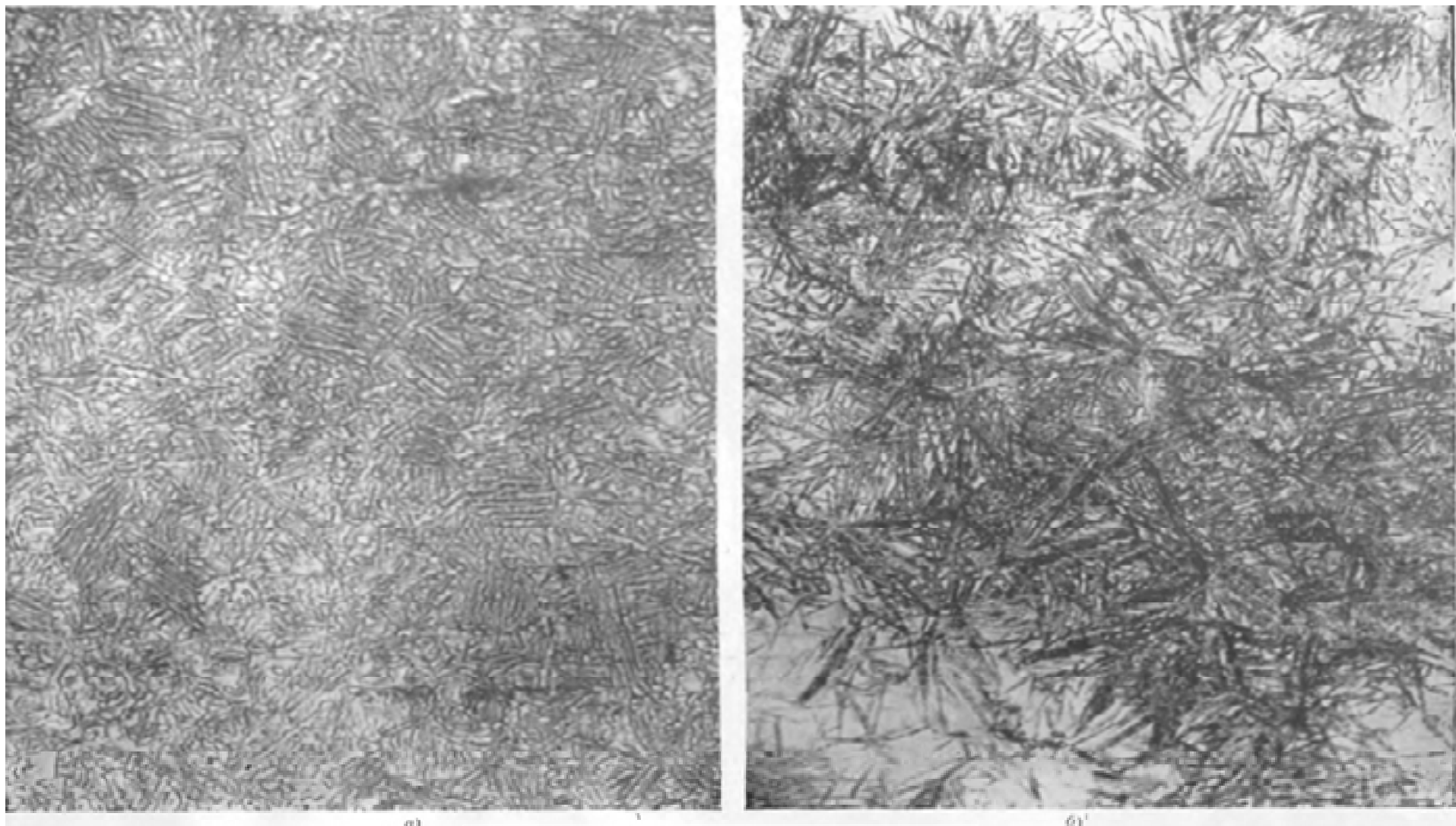


Рис 45. Бейнит; x1000: а – верхний (перистый) бейнит; б – нижний (игольчатый) бейнит



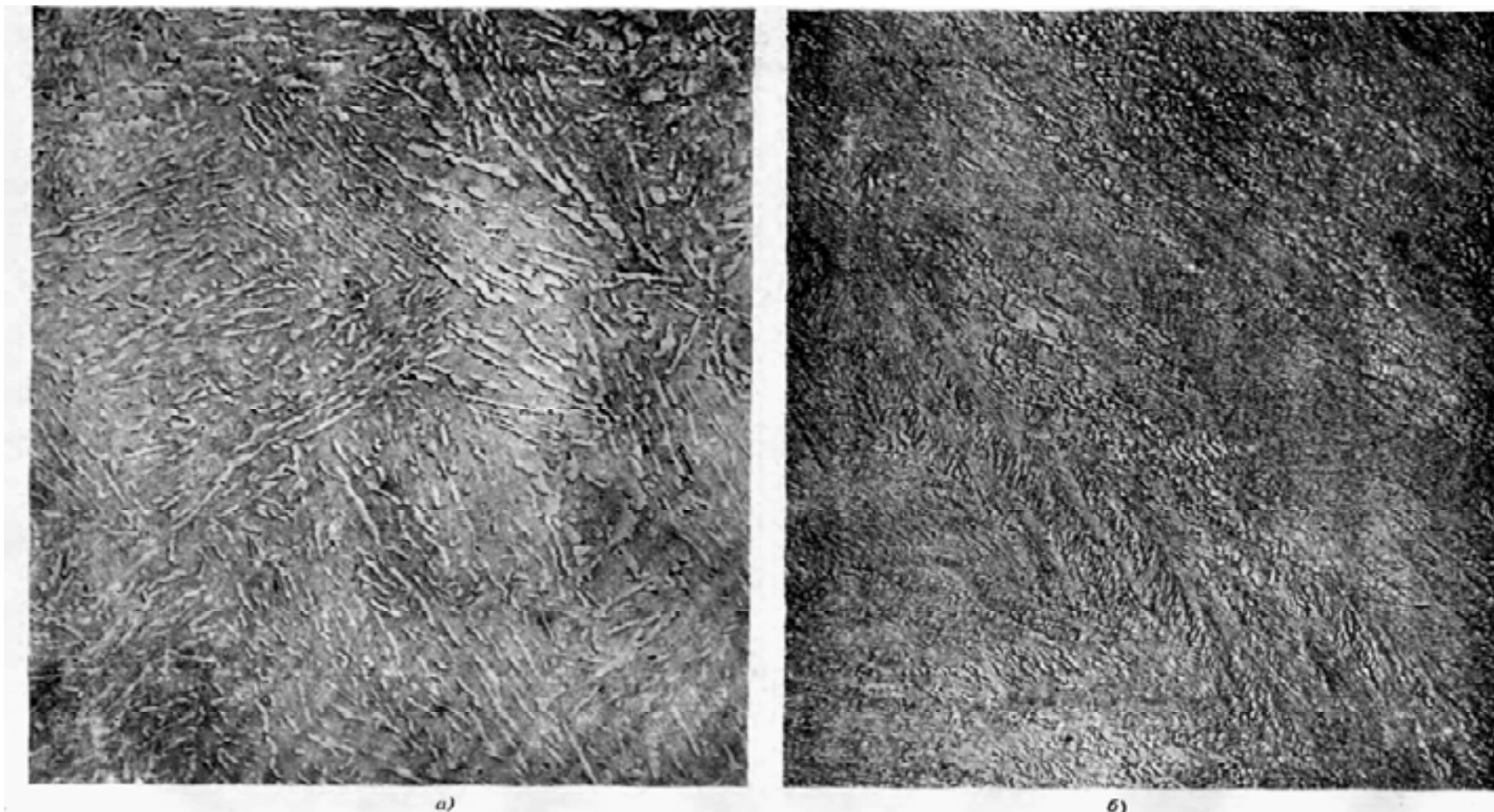
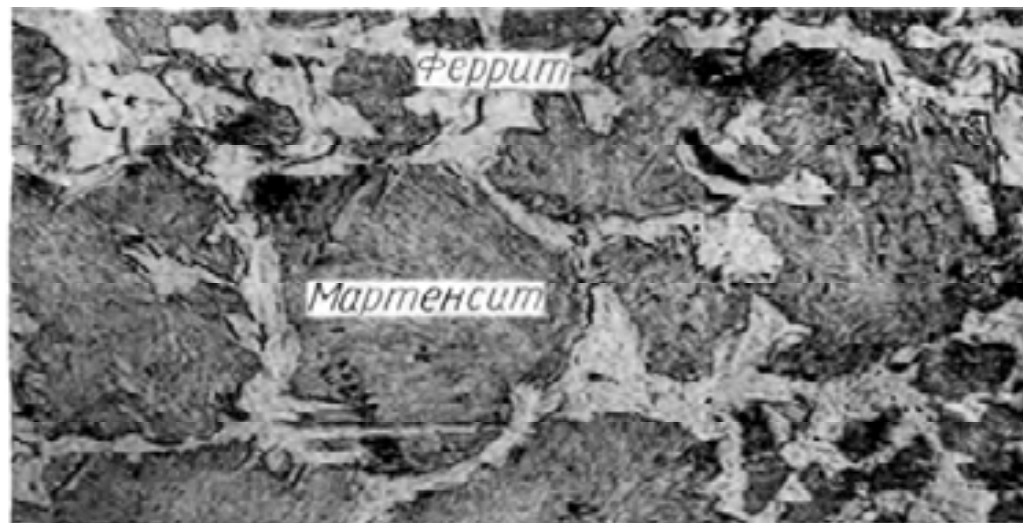


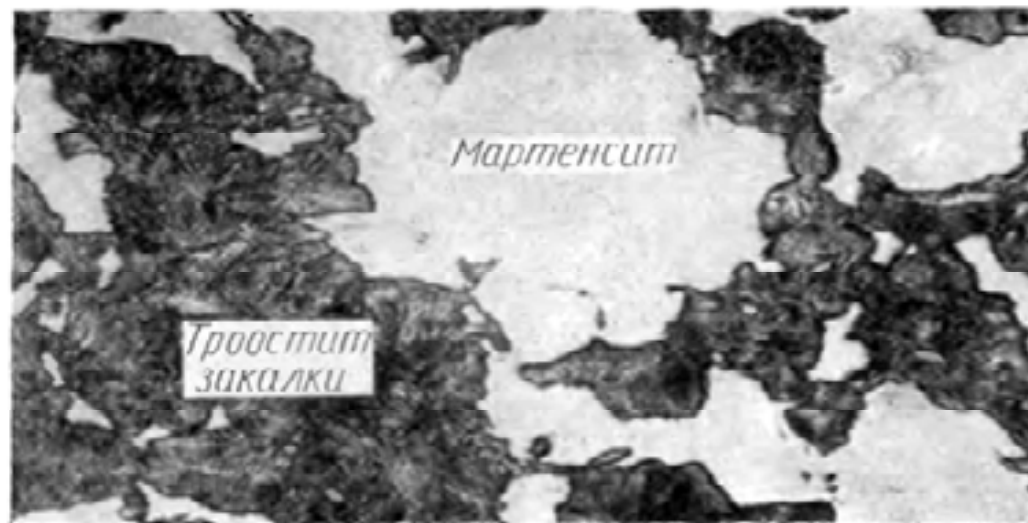
Рис. 46. Электронные микроструктуры бейнита; x15000: а – верхний (перистый) бейнит; б – нижний (игольчатый) бейнит



а)



б)



в)

Рис. 47. Микроструктура стали после закалки, вызывающей пониженную твердость; х500: а – отпущенный мартенсит и остаточный аустенит в высокоуглеродистой легированной стали; б – мартенсит и феррит в доэвтектоидной стали; в – мартенсит и троостит закалки

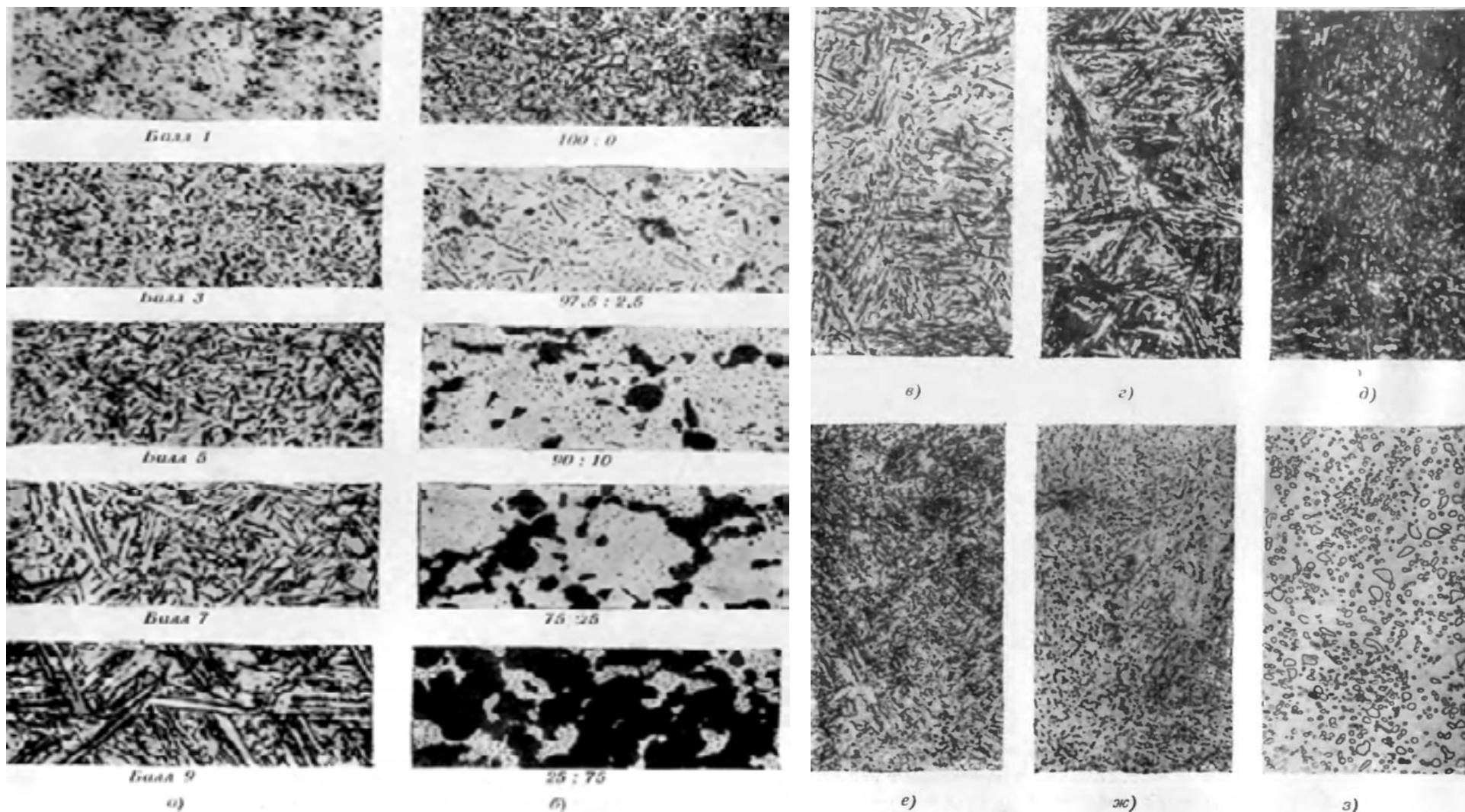


Рис. 48. Микроструктура стали после термической обработки: а – шкала эталонов для измерения длины игл мартенсита;  $\times 1000$ ; б – шкала эталонов для определения соотношения площадей мартенсита и троостита закалки;  $\times 500$ ; в, г, д, е, ж, з – мартенсит и продукты его отпуска (при постепенном возрастании температуры отпуска 0; 200; 400; 500; 600; 700 °C);  $\times 500$

## Макро- и микроструктура стали после поверхностного упрочнения

**Поверхностная высокочастотная закалка.** В большинстве случаев поверхностная высокочастотная закалка сопровождается самоотпуском, тогда на поверхности образуется микроструктура из скрытокристаллического отпущенного мартенсита (рис. 49, а), в переходном слое – из скрытокристаллического отпущенного мартенсита и выделений феррита (рис. 49, б) и, наконец, в сердцевине сохраняется исходная микроструктура из зерен перлита и сетки феррита (рис. 49, в), отвечающая незакаленной стали марки 45.

На рис. 50, а — г показаны характерные макроструктуры рельса, шейки коленчатого вала, валика коробки передач, тормозного кулака и зубчатых колес после поверхностной высокочастотной закалки.

В случае изготовления зубчатых колес из стали с очень малой прокаливаемостью, даже при закалке их не по обводу, а в простом индукторе, получается мартенситный слой по обводу (рис. 50, д).

При закалке зубчатых колес с большим модулем возможно применение фасонного индуктора и получение закаленного слоя по обводу (рис. 50, е).

В случае же закалки простым индуктором зубчатых колес из стали, например 40Х, закаленного слоя у основания не образуется; тогда в опасном сечении, благодаря выходу переходного слоя на поверхность, образуются остаточные напряжения растяжения, вызывающие поломку зуба у основания даже при небольших нагрузках в эксплуатации (рис. 50, ж).

Сталь для поверхностной закалки должна иметь микроструктуру из перлита мелкого сложения и ферритной сетки (рис. 50, з), перлит крупного сложения с грубыми сфероидизированными зёрнами цементита (рис. 50, и) закаливается хуже и требует двукратной закалки.

Очень невыгодна для высокочастотной закалки грубополосчатая микроструктура стали (фиг. 50, к), в которой после закалки остаются полосы феррита (фиг. 50, л), резко снижающие твердость закаленного слоя.

Хорошая микроструктура на поверхности стали после ее высокочастотной закалки должна быть или скрытокристаллическим (без заметной игольчатости) мартенситом, или очень мелкоигольчатым мартенситом (рис. 50, м).

**Цементация.** Микроструктура поверхности цементованной, но не закаленной стали состоит из перлита и тонкой сетки цементита (рис. 51), которая по мере удаления от поверхности исчезает. Микроструктура переходного слоя состоит из перлита и феррита; площади, занимаемые перлитом, постепенно уменьшаются от поверхности к сердцевине, а занимаемые ферритом увеличиваются. Микроструктура сердцевины



состоит из феррита с небольшим количеством перлита и отвечает исходной структуре низкоуглеродистой стали, применяемой для цементации.

Микроструктура стали после цементации и закалки должна состоять из мартенсита (рис. 40); наличие цементитной сетки (рис. 52, а) и даже отдельных цементитных включений нежелательно, так как твердый цементит является концентратором напряжений и служит причиной начала образования усталостного разрушения. В сердцевине стали после закалки также желательно создание низкоуглеродистого вязкого мартенсита без феррита, снижающего механические свойства сердцевины. Наличие троостита закалки (рис. 52, б) на поверхности цементованной и закаленной стали свидетельствует о низкой твердости металла.

Разработаны эталоны микроструктур стали 18ХГТ после цементации и закалки, а именно: шкала остаточного аустенита в поверхностном цементованном и закаленном слое стали (рис. 53) и шкала избыточных карбидов в этом слое (рис. 54), позволяющие давать количественную оценку по баллам цементованных изделий при их приемке или направлять их на вторичную термическую обработку или браковать их.

**Дробеструйный наклеп.** Микроструктура поверхности низкоуглеродистой стали после дробеструйного наклепа (рис. 55) обнаруживает тонкий (0,2—0,4 мм) деформированный слой с повышенными механическими свойствами и образовавшимися полезными напряжениями сжатия.

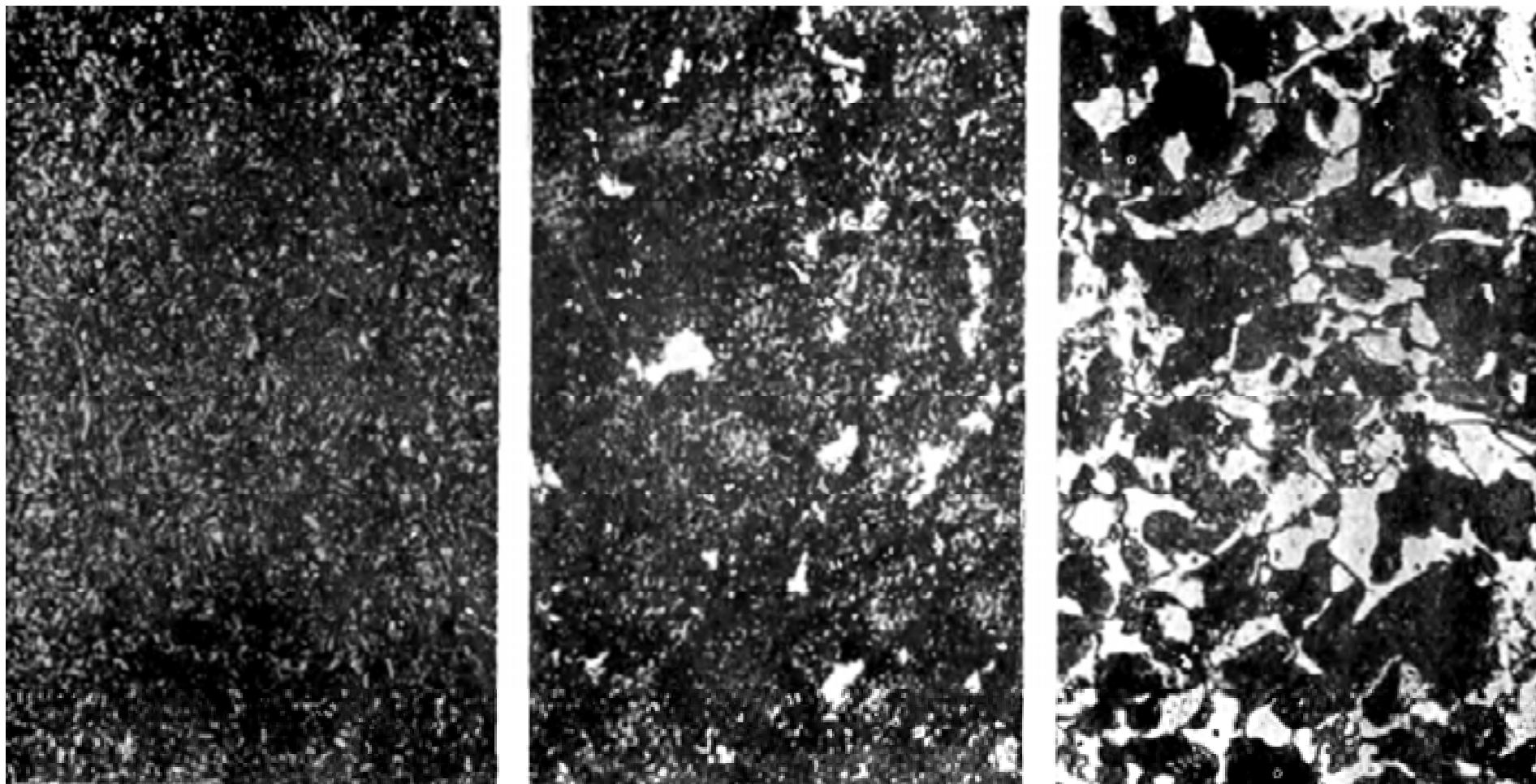


Рис. 49. Микроструктура стали 45 после высокочастотной закалки с самоотпуском;  $\times 750$ : а – поверхность (скрытокристаллический отпущенный мартенсит); б – переходная зона (скрытокристаллический отпущенный мартенсит и феррит); в – сердцевина (зерна перлита и феррита)

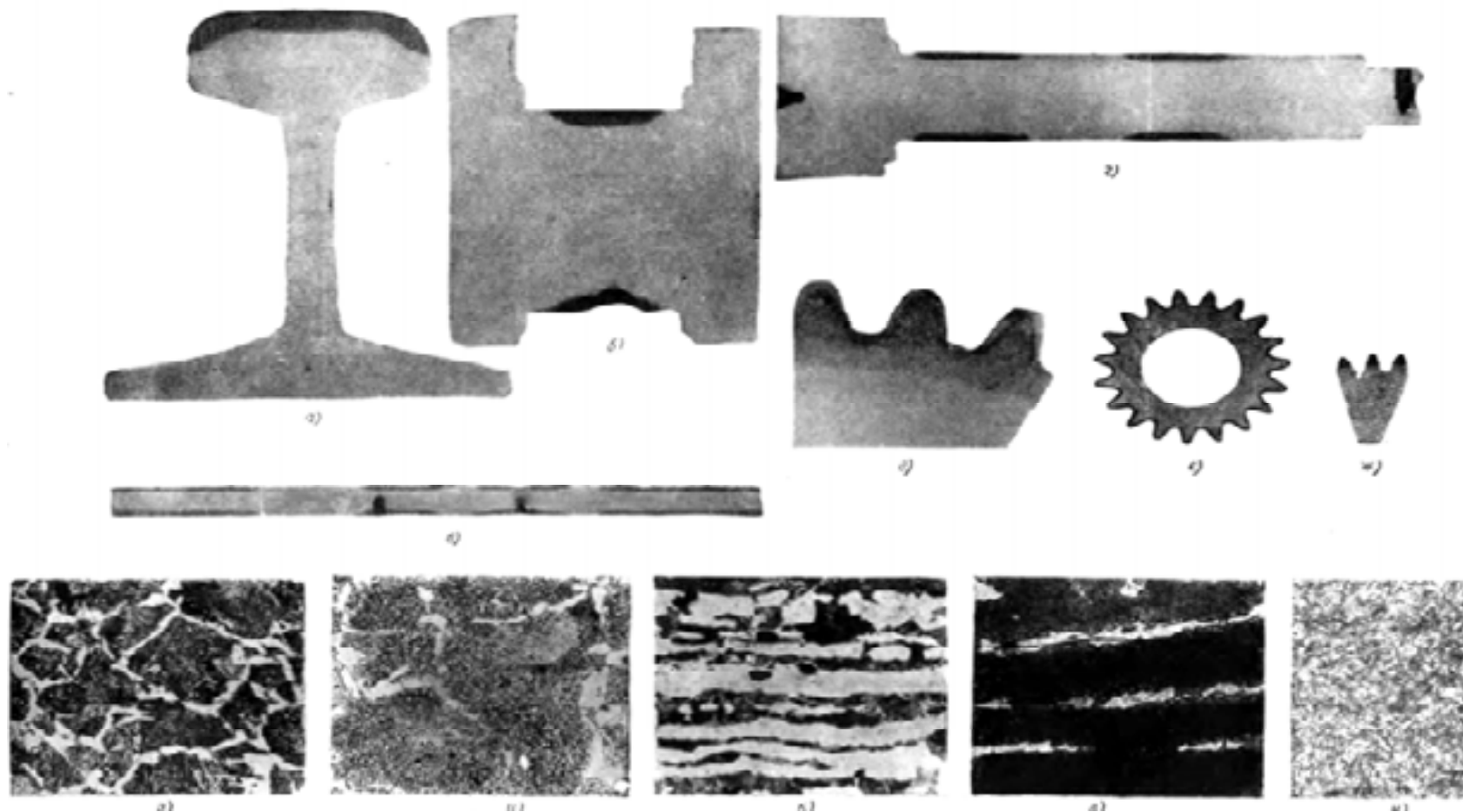


Рис. 50. Макро- и микроструктура стали после высокочастотной закалки: а – рельс; б – шейка коленчатого вала; в – валик коробки передач; г – тормозной кулак; д – шестерня из стали с малой прокаливаемостью, закаленная в простом индукторе; е – крупная шестерня, закаленная по обводу фасонным индуктором; ж – шестерня, закаленная простым индуктором; з – сталь 50 со структурой перлита тонкого сложения, хорошо закаливается ТВЧ; х500; и – сталь 50 с грубой сфероидизованной структурой перлита, требующая двухкратной закалки ТВЧ; х500; к – сталь 40 с грубополосчатой структурой; х500; л – то же после высокочастотной закалки (с остатками феррита); м – нормальная микроструктура на поверхности стали 40 после высокочастотной закалки (мелкоигольчатый мартенсит); х1000

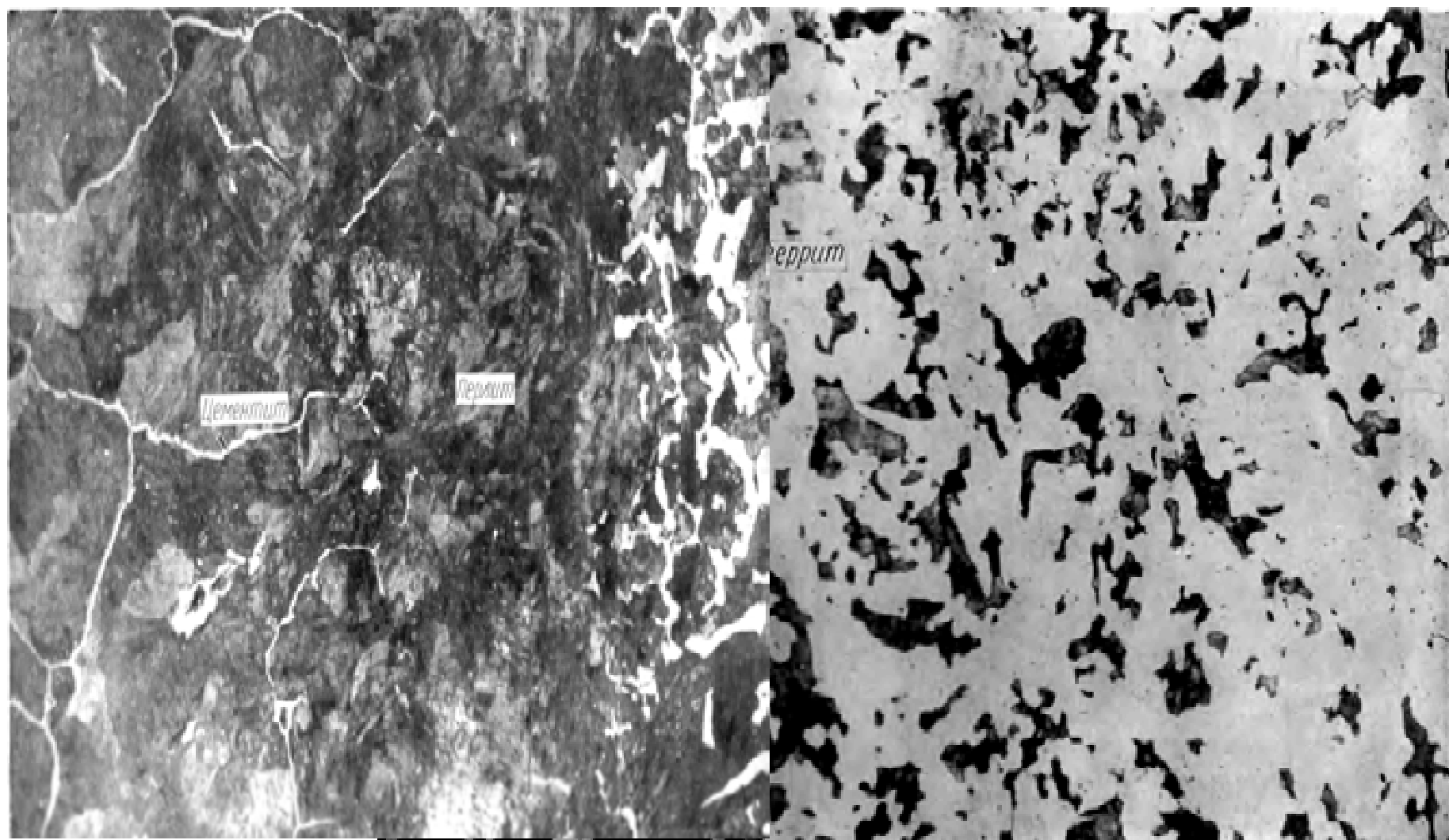


Рис. 51. Сталь 20 после цементации, но до закалки; x250

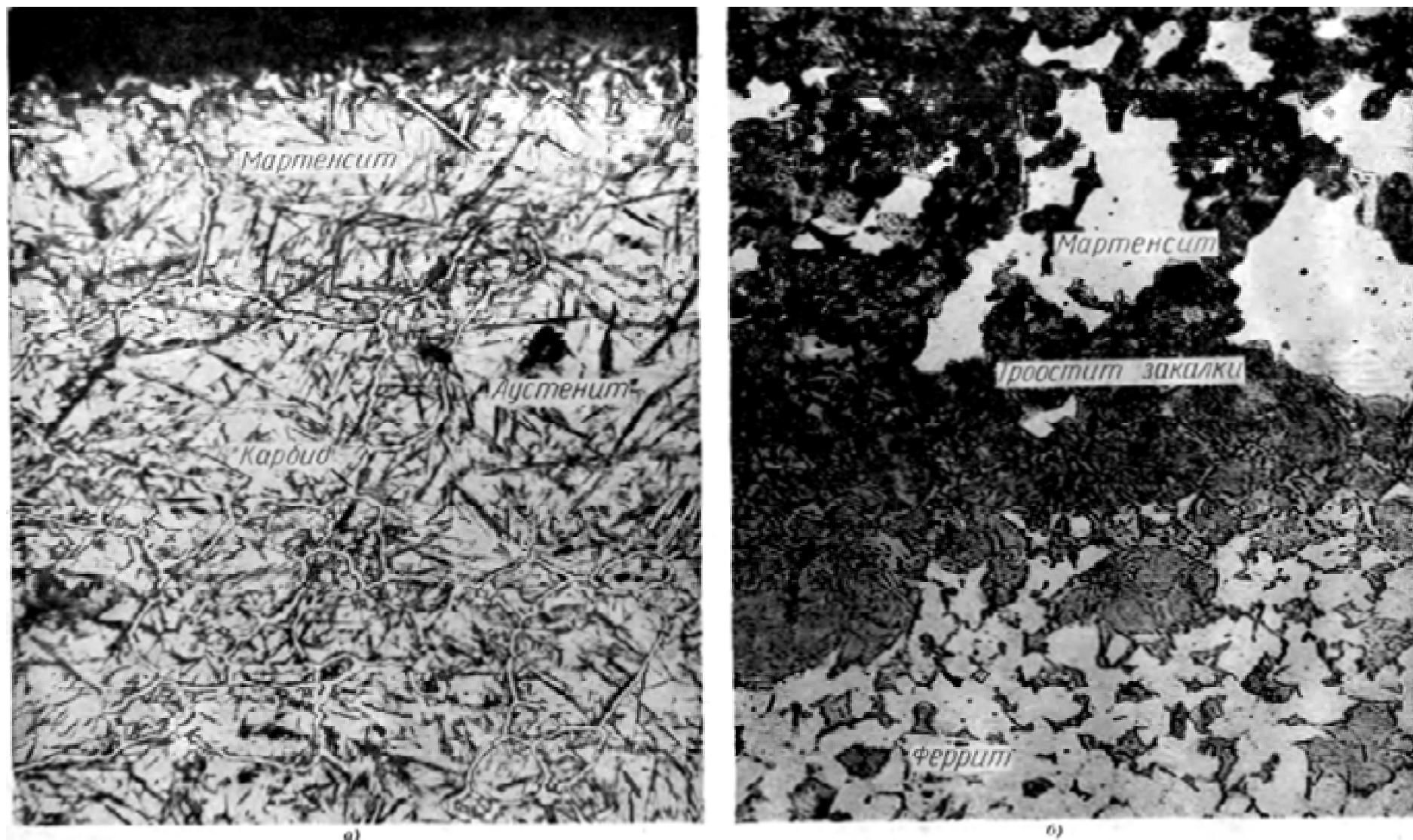


Рис. 52. Пороки микроструктуры стали после цементации и закалки;  $\times 1000$ : а – карбидная сетка, остаточный аустенит и мартенсит на поверхности; б – троостит закалки и мартенсит на поверхности

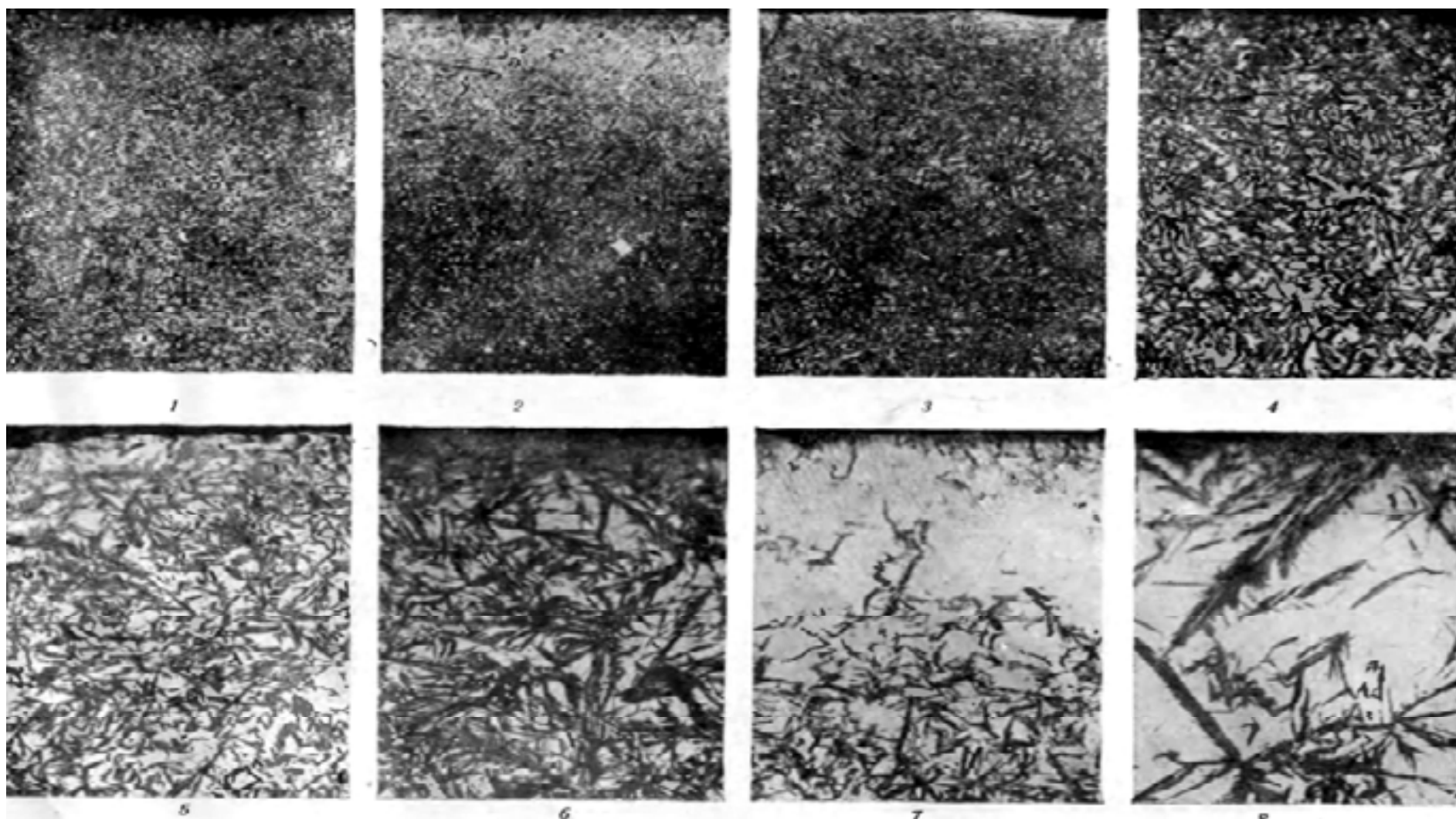


Рис. 53. Шкала остаточного аустенита в поверхностном цементованном и закаленном слое стали 18ХГТ;  $\times 400$ ; детали со структурой, соответствующей баллам 1—5 считаются годными, а со структурой, соответствующей баллам 6—8, направляются на повторную закалку и отпуск



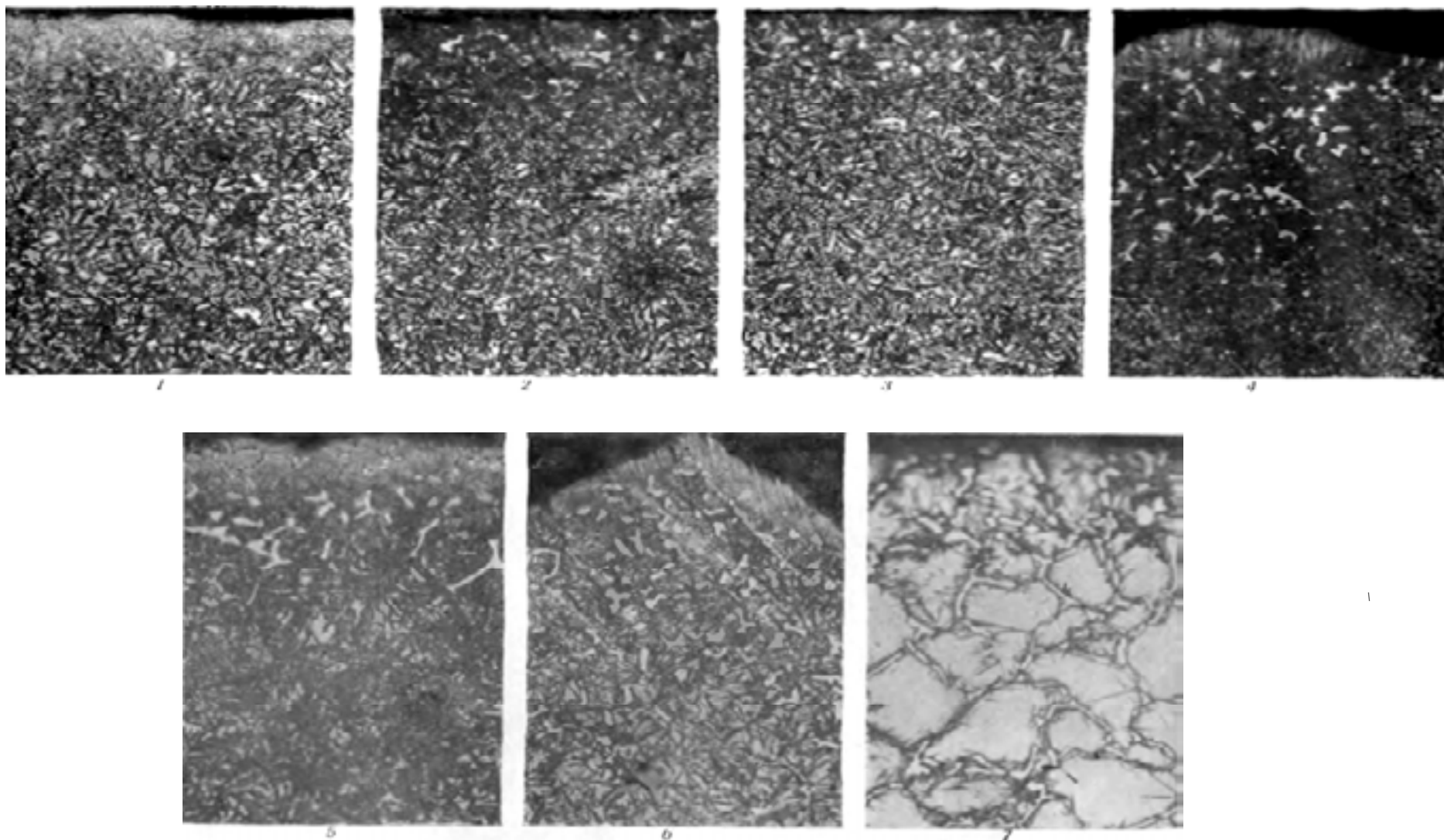


Рис. 54. Шкала избыточных карбидов в поверхностном, цементованном и закаленном слое стали 18ХГТ; х400; детали со структурой, соответствующей баллам 1—4, считаются годными, со структурой, соответствующей баллам 5—6, направляются на повторную закалку и отпуск, а со структурой, соответствующей баллу 7 бракуются

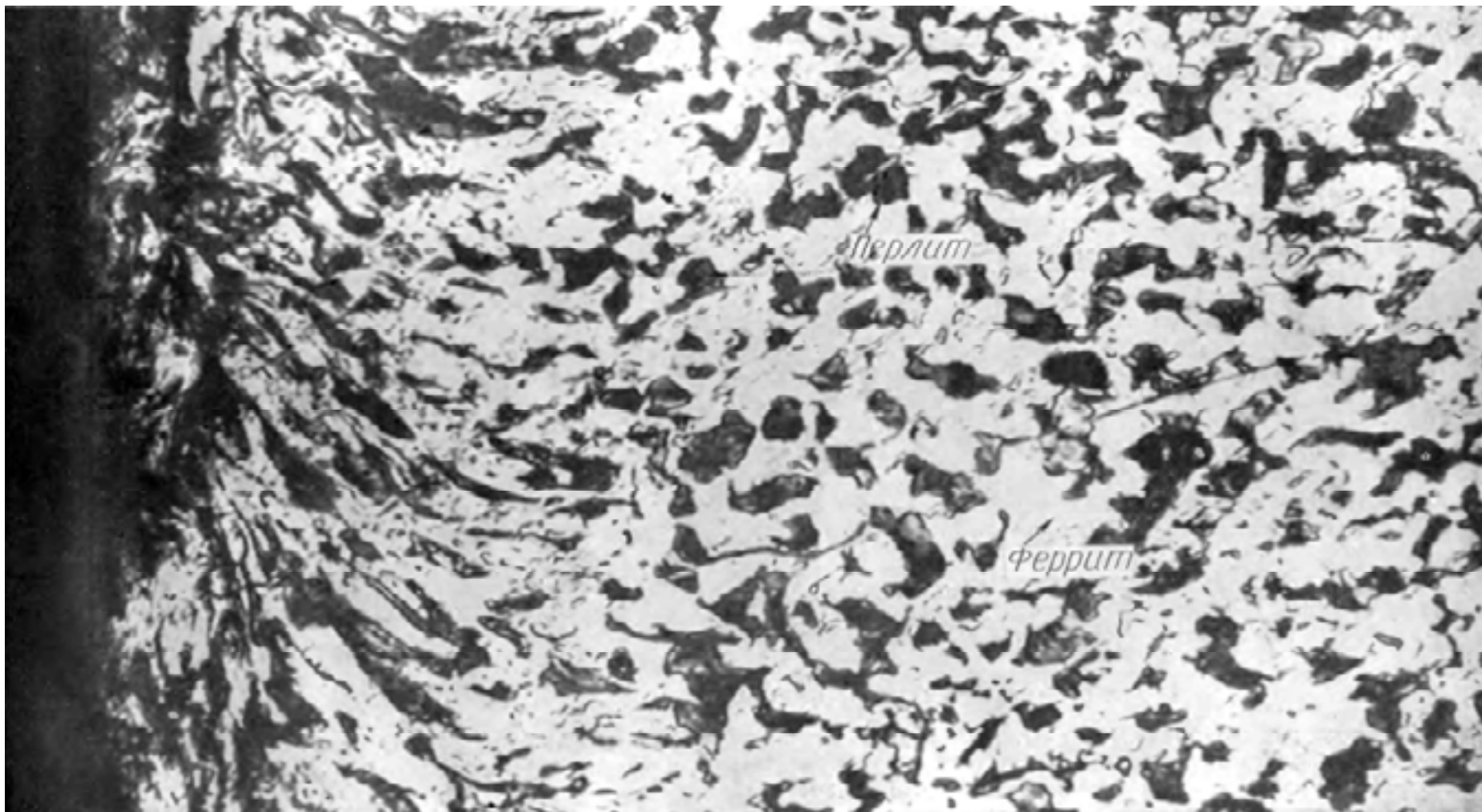


Рис. 55. Поверхность незакаленной низкоуглеродистой стали после дробеструйного наклепа;  $\times 250$ . Деформированный тонкий (0,2–0,4 мм) слой с повышенными механическими свойствами и полезными напряжениями сжатия



## Микроструктура инструментальной стали и твердых сплавов

Микроструктура углеродистой и легированной инструментальной стали в отожженном состоянии представляет собой зернистый перлит (рис. 56, а), после закалки и низкого отпуска – отпущенный мартенсит с мелкими твердыми частицами цементита (рис. 56, б), что обеспечивает хорошие режущие свойства и износостойкость инструмента.

**Быстрорежущая сталь.** Микроструктура литой быстрорежущей стали (рис. 57, а) состоит из карбидной эвтектики и сорбитообразного перлита. После прокатки (иликовки) и отжига микроструктура быстрорежущей стали состоит из сорбита (рис. 57, б), составляющего 70 % ее площади, и 30% сложных карбидов крупного и среднего размеров.

После закалки быстрорежущей стали ее микроструктура (рис. 58) состоит из аустенита с мартенситом и карбидов. После закалки и отпуска при температуре 560 °С ее микроструктура состоит из отпущенного мартенсита и твердых карбидов (рис. 59). Микроструктура переотпущенной быстрорежущей стали с пониженной твердостью состоит из темного троостита отпуска и карбидов (рис. 60).

**Эталоны микроструктуры высокоуглеродистой стали.** Для количественной оценки микроструктуры высокоуглеродистой стали рекомендуются следующие эталоны микроструктуры: укрупненная шкала зернистого перлита (рис. 61, а) и укрупненная шкала соотношений зернистого и пластинчатого перлита (рис. 61, б), а также две шкалы для оценки карбидной неоднородности (рис. 61, в, г).

**Твердые сплавы.** Нормальная микроструктура порошковых твердых сплавов до травления характеризуется небольшой пористостью (рис. 62, а, б), значительная пористость (рис. 62, в, г) является недопустимой.

Микроструктура твердого сплава ВК15 (рис. 63) состоит из мелких, светлых, угловатых и шпалообразных частиц карбида вольфрама WC и темного, вязкого кобальта, содержащего небольшое количество (до 1 %) WC в твердом растворе. Если светлые частицы карбида в микроструктуре (рис. 64) крупные, то твердый сплав ВК15 будет низкого качества.

Микроструктура твердого сплава Т15К6 (рис. 65) состоит из угловатых светлых зерен фазы WC, окаймленных темной фазой цемента – кобальта, содержащего до 1% WC и до 0,1% TiC в твердом растворе, и серой фазы титанового карбида TiC, содержащего в твердом растворе до 25% WC. Чем мельче и равномернее распределены зерна фазы WC, тем лучше режущие свойства и прочность твердого сплава Т15К6. Зерна твердого раствора WC в TiC имеют округлую форму, средний и крупный их размеры отвечают хорошим режущим свойствам твердого сплава Т15К6.

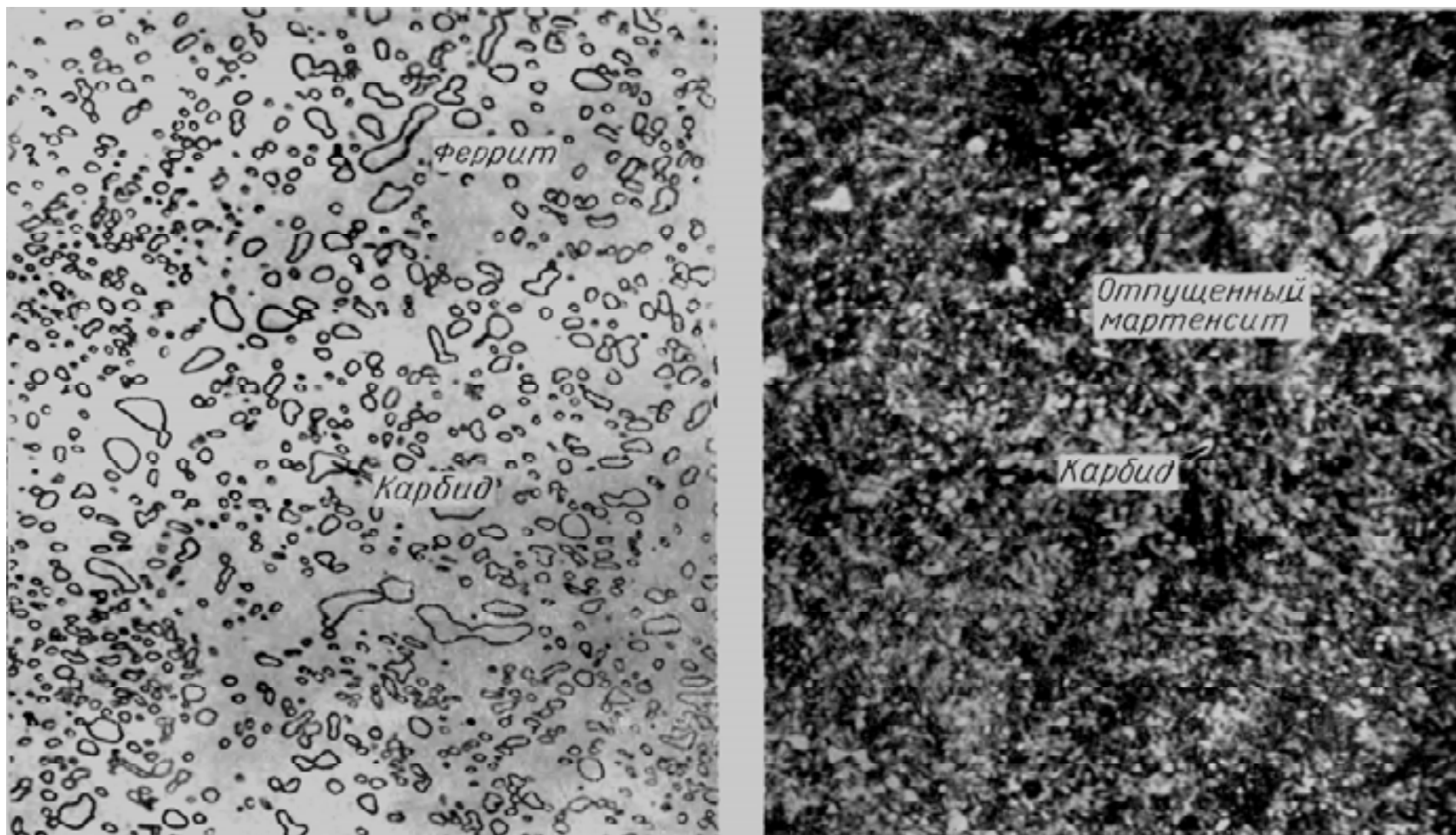


Рис. 56. Сталь X для режущего инструмента;  $\times 1000$ : а – зернистый перлит после отжига; б – отпущенный мартенсит и карбиды после закалки и отпуска

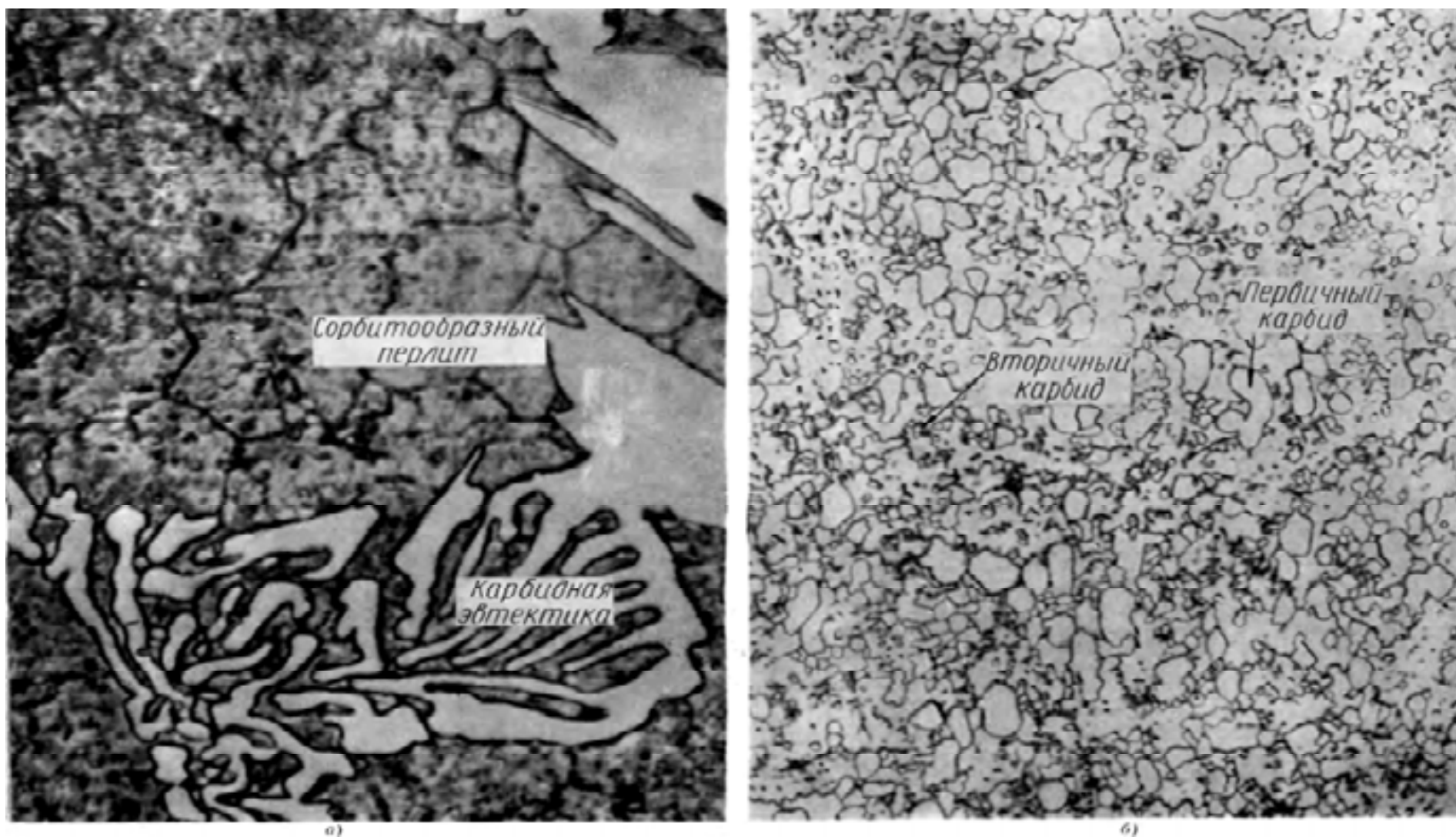


Рис. 57. Быстрорежущая сталь Р18; х1000: а – литая; б – прокатанная и отожженная

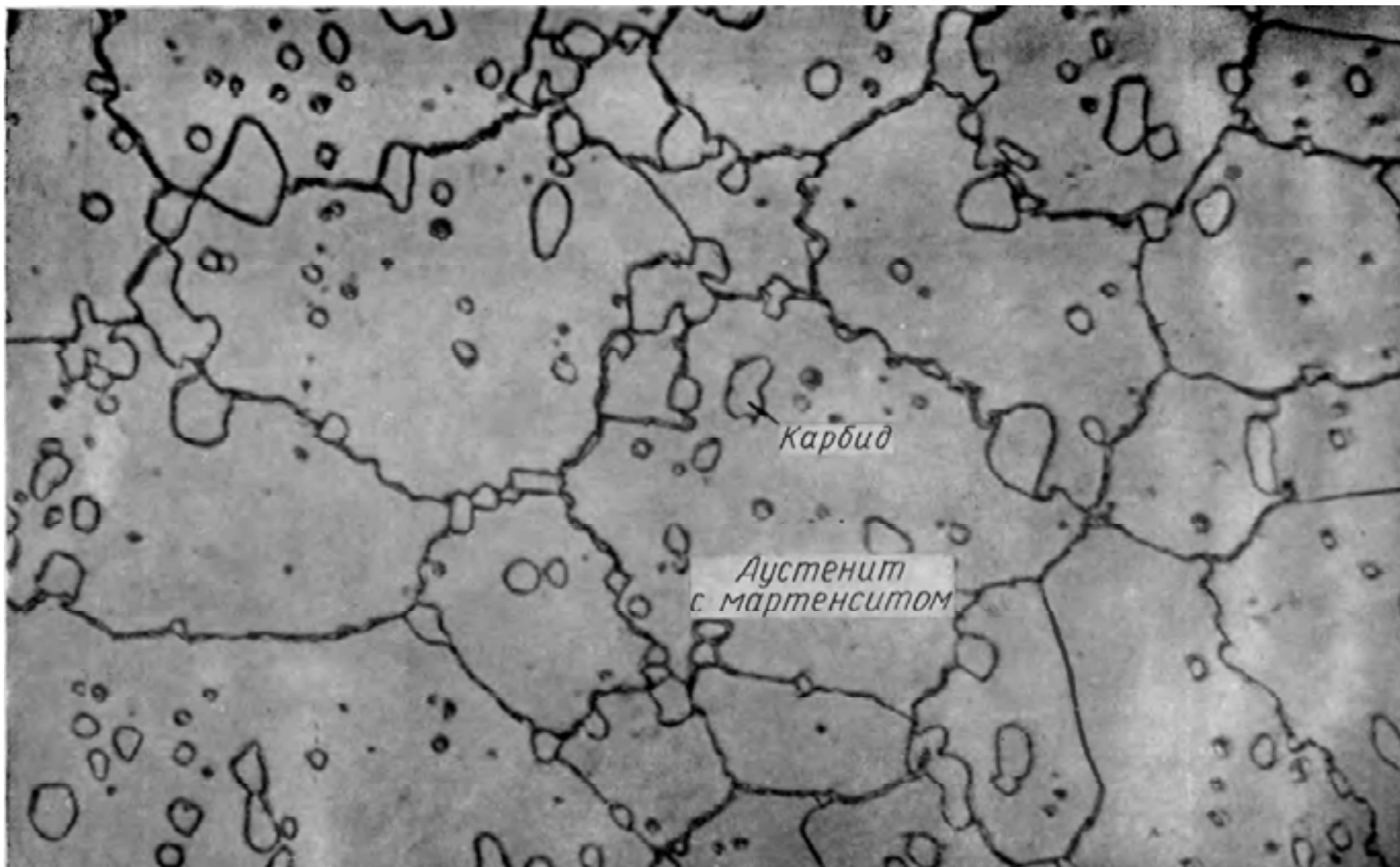


Рис. 80. Закаленная сталь P18; x1500

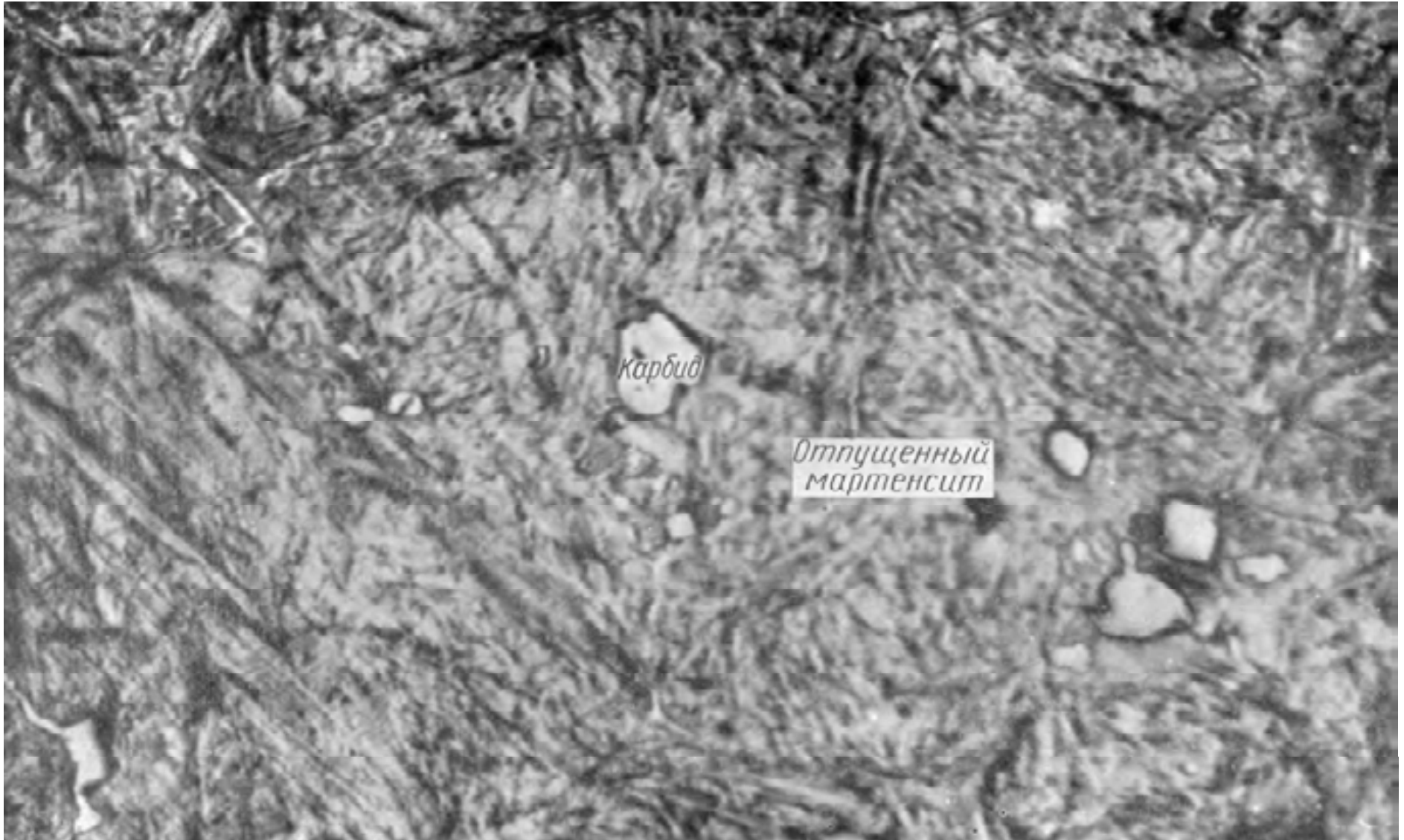


Рис. 81. Закаленная и отпущенная сталь P18; x1500



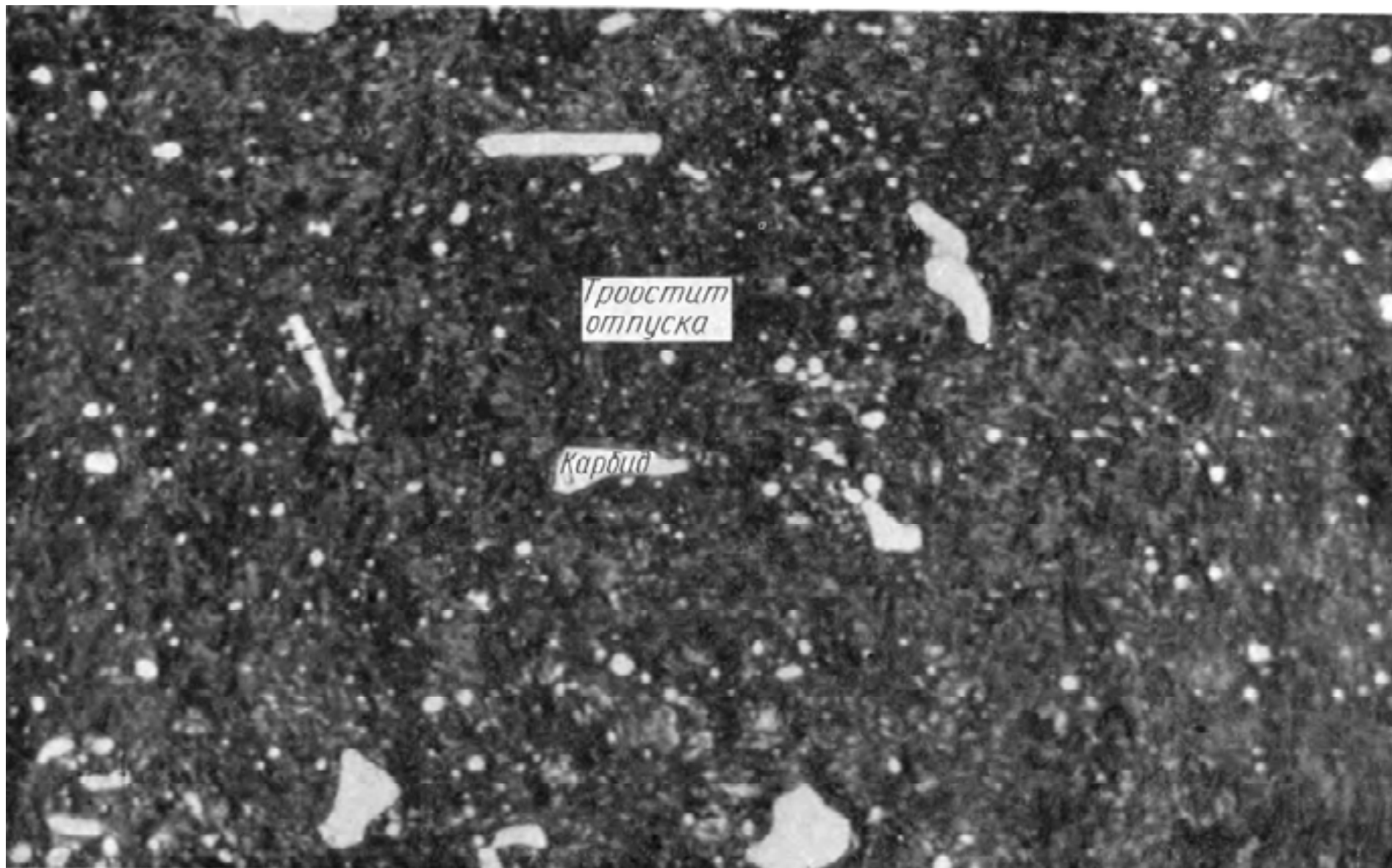


Рис. 82. Закаленная и перепущенная сталь P18; x1500

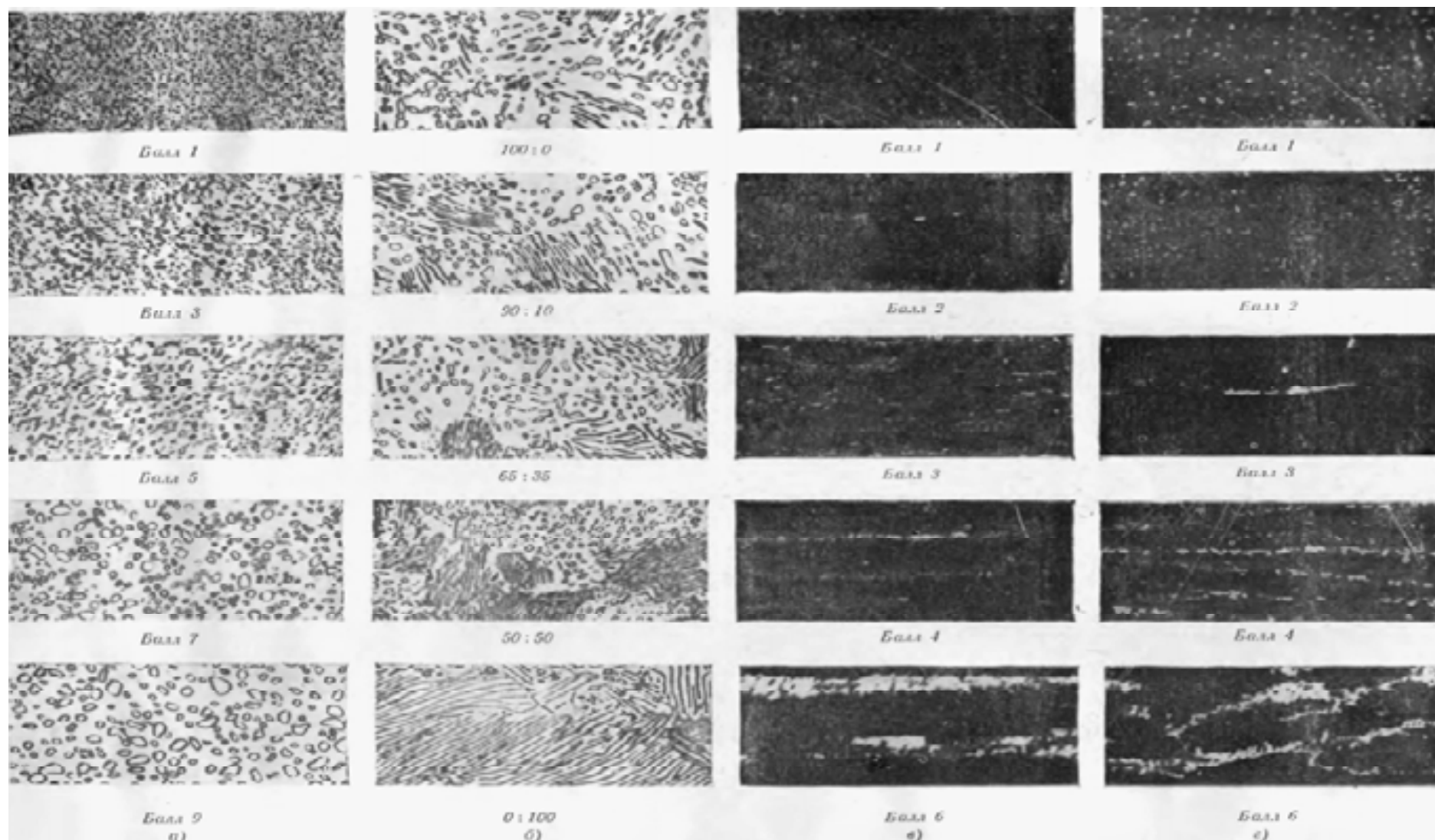
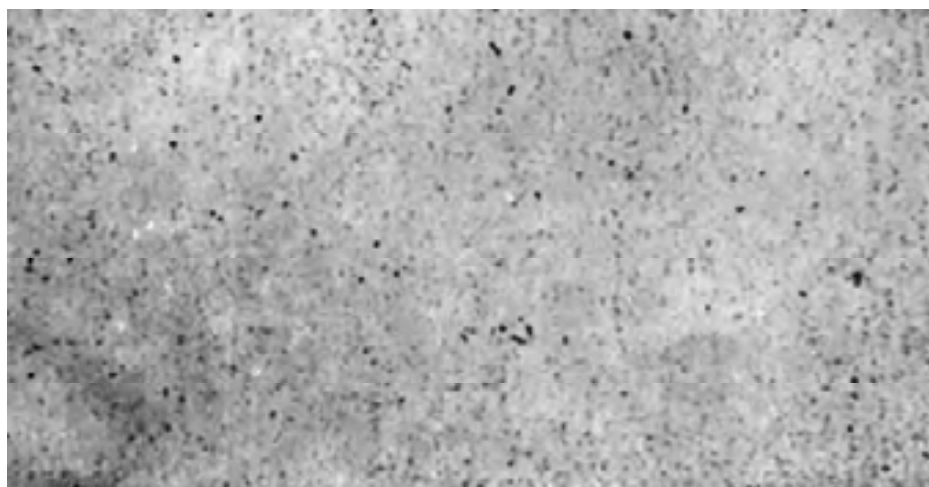
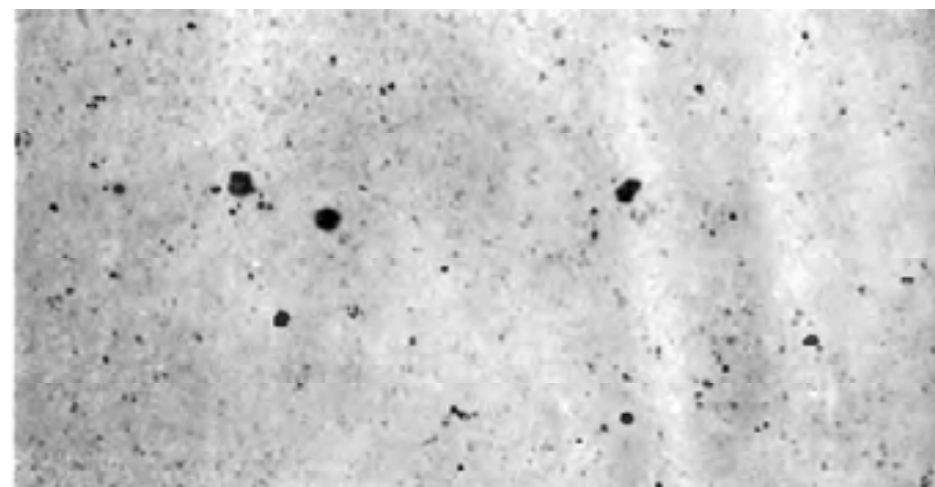


Рис. 61. Эталоны микроструктуры высокоуглеродистой стали: а – дисперсность зерен цементита в зернистом перлите;  $\times 1000$ ; б – соотношение площадей занимаемых зернистым и пластинчатым перлитом;  $\times 1000$ ; в и г – степень карбидной неоднородности;  $\times 100$

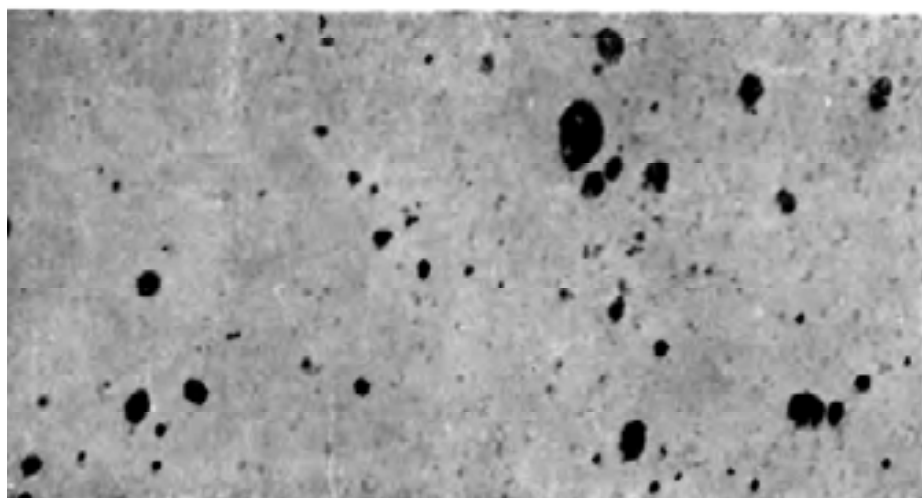




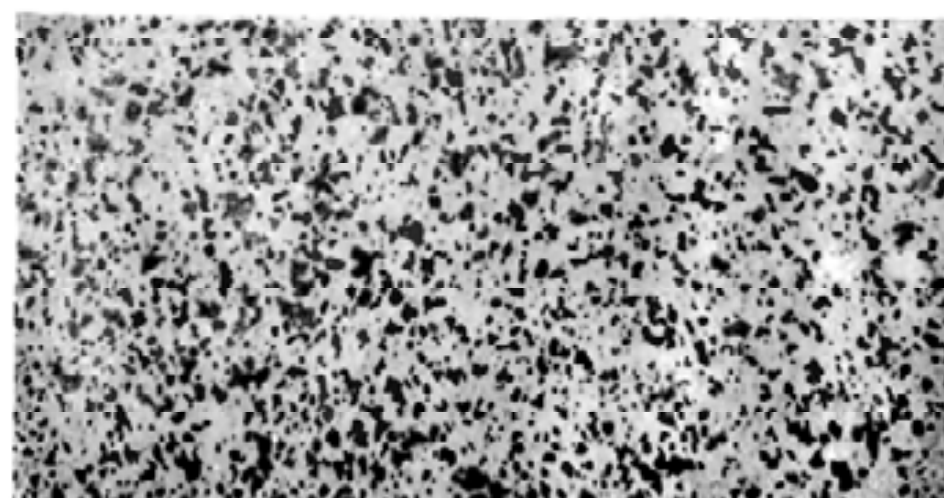
а)



б)



в)



г)

Рис. 62. Пористость в микроструктуре твердых сплавов; х250: а и б – допустимая; в и г – недопустимая

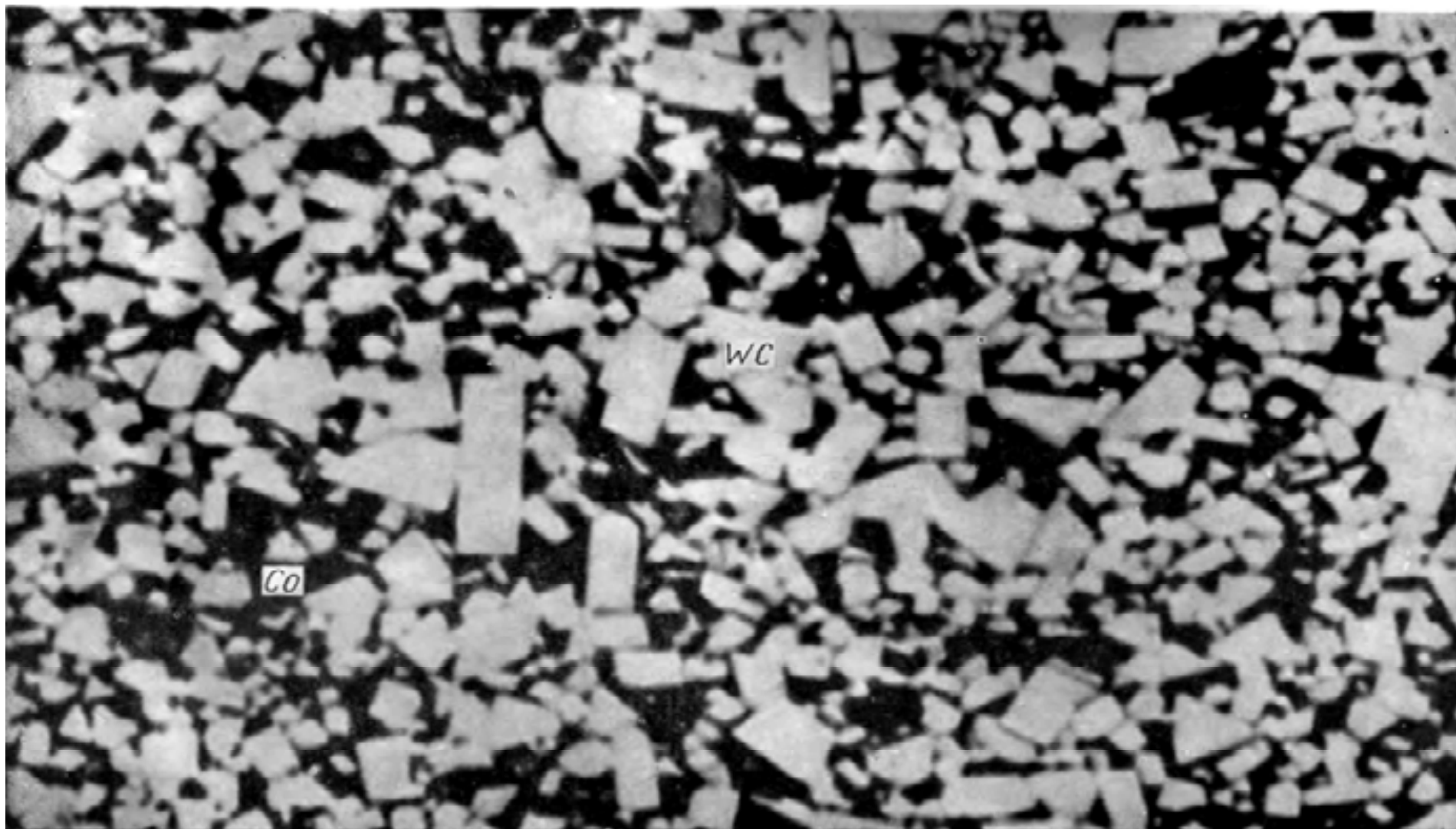


Рис. 63. Твердый сплав ВК15 с мелкими светлыми зернами карбида, травление насыщенным солянокислым раствором хлорного железа;  $\times 3000$

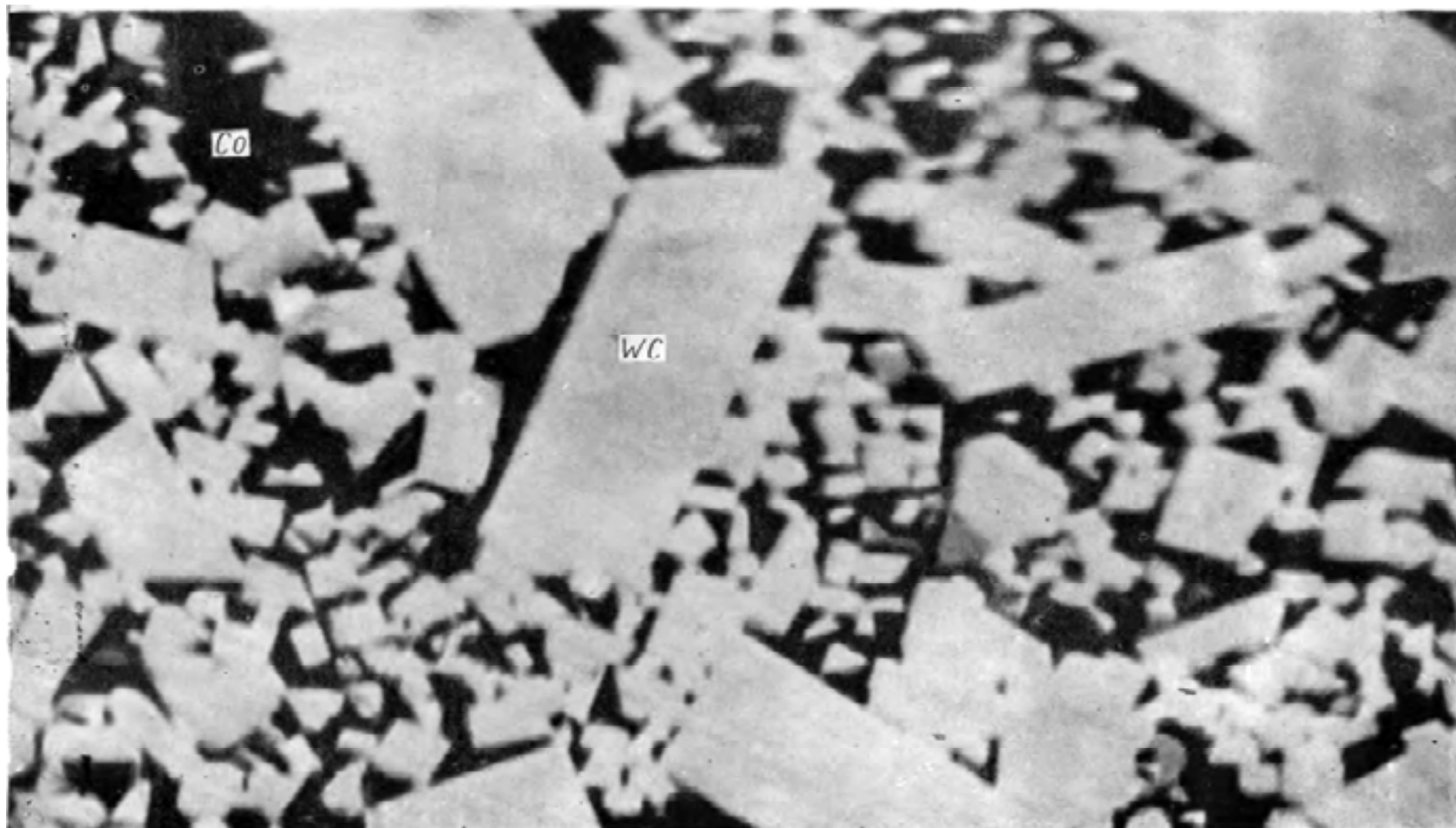


Рис. 64. Твердый сплав ВК15 с крупными светлыми зернами карбида, травление насыщенным солянокислым раствором хлорного железа;  $\times 1000$

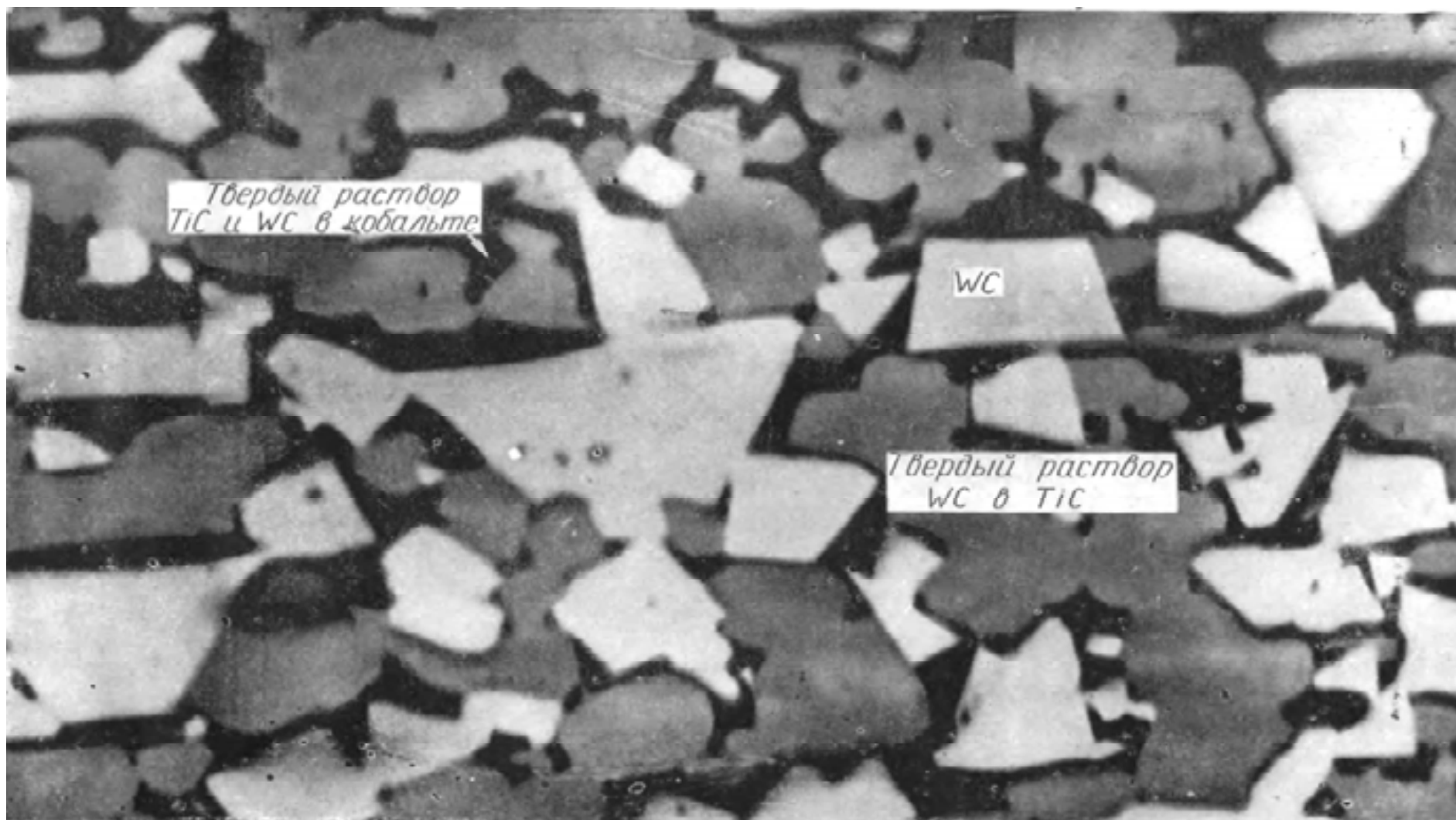


Рис. 65. Твердый сплав Т15К6, травление окислением на воздухе в электропечи при 400 °С, х3000. Мелкие и равномерно распределенные светлые зерна WC, окаймленные темной фазой твердого раствора карбидов WC и TiC в кобальте и округлые, серые, крупные и среднего размера зерна твердого раствора WC в TiC

## Микроструктура цветных и подшипниковых сплавов

Микроструктура силумина (13% Si), отлитого в песчаную форму, без модифицирования (рис. 66, а) состоит из грубоигольчатой эвтектики и крупных первичных выделений кремния. Этот же сплав после добавки комплексного модификатора, состоящего из 62,5% NaCl + 25% NaF + 12,5% KCl, резко меняет свою микроструктуру (рис. 66, б) и состоит из мелкозернистой эвтектики и дендритов твердого раствора кремния и других элементов в алюминии.

Микроструктура  $\alpha$ -латуни после холодной обработки и рекристаллизационного отжига имеет характерную (рис. 67) однородную микроструктуру из зерен с двойниками и отличается низкой твердостью и высокой пластичностью и очень хорошей штампуемостью в холодном состоянии.

Микроструктура  $\alpha$ + $\beta$ -латуни (рис. 68) состоит из светлых полей  $\alpha$ -фазы и темных полей  $\beta$ -фазы. Эта структура отличается несколько меньшей пластичностью и большей твердостью по сравнению с  $\alpha$ -латунью.

Микроструктура литой оловянистой бронзы, содержащей 10% олова, после травления 8%-м аммиачным раствором  $\text{CuCl}_2$  состоит из темных дендритов твердого раствора олова в меди (рис. 69, а), богатых медью, и светлых дендритов, богатых оловом и содержащих  $\alpha$ + $\delta$ -эвтектоид.  $\alpha$ + $\delta$ -эвтектоид лучше выявляется путем травления 3%-м раствором  $\text{FeCl}_3$  в 10%-м HCl, который хорошо выделяет светлый эвтектоид на темном фоне участков структуры, богатых оловом (рис. 69, б).

Микроструктура оловянистого баббита Б83 после быстрого охлаждения (рис. 70, а) состоит из твердых мелких кубиков соединения SnSb, твердого скелета из соединения  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и вязкой основы из тройной эвтектики, состоящей из твердого раствора Sb и Cu в олове и частиц  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  в SnSb. В случае перегрева и медленного охлаждения оловянистого баббита Б83 его структура становится грубой, что резко ухудшает его свойства (рис. 70, б); твердые частички SnSb становятся очень крупными, твердый скелет из  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  также укрупняется.

Микроструктура низкосурьмянистого оловянистого баббита Б89, содержащего 7% сурьмы, т.е. ниже предела растворимости сурьмы в олове (рис. 71, а), не имеет кубических кристаллов соединения SnSb. Микроструктура состоит только из твердых игольчатых кристаллов  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и вязкой эвтектики.

Несмотря на очень хорошие поверхностные свойства – способность удерживать смазку, прирабатываться и поглощать посторонние твердые частицы, не образовывать задиров вала, коррозионную стойкость и технологичность, – оловянистые баббиты обладают недостаточным пределом выносливости и выкрашиваются при работе в очень тяжелых условиях, например, в дизельных двигателях, в которых требуется применение коренных и шатунных подшипников из свинцовистой бронзы.

Микроструктура свинцовистой бронзы БрС30 состоит (рис. 71, б) из светлой, мягкой медной основы, в которой расположены еще более мягкие темные выделения свинца. Свинцовистая бронза отличается высоким пределом выносливости и очень хорошей теплопроводностью, но ее поверхностные свойства и технологичность ниже, чем у баббитов.

Микроструктура двухслойного металлического подшипника (рис. 72, а) состоит из темного тонкого слоя баббита, залитого на ленту из стали 08кп, структура которой представляет собой светлые зерна феррита с незначительным количеством перлита.

Преимущества двухслойного металлического подшипника: экономия баббита благодаря малой толщине его слоя (0,4 мм), мелкозернистость его микроструктуры и возможность передачи нагрузки от баббита при значительной его упругой деформации (низком модуле упругости) на стальную ленту с более высоким пределом выносливости.

Микроструктура трехслойного металлического подшипника (рис. 72, б), сочетающего преимущества баббита и свинцовистой бронзы, состоит из чрезвычайно тонкого (20—30 мк) темного слоя свинца с 5% олова, свинцовистой бронзы, микроструктура которой состоит из меди с мелкими выделениями свинца, и низкоуглеродистой стальной ленты марки 08кп со структурой из зерен феррита с незначительным количеством перлита.



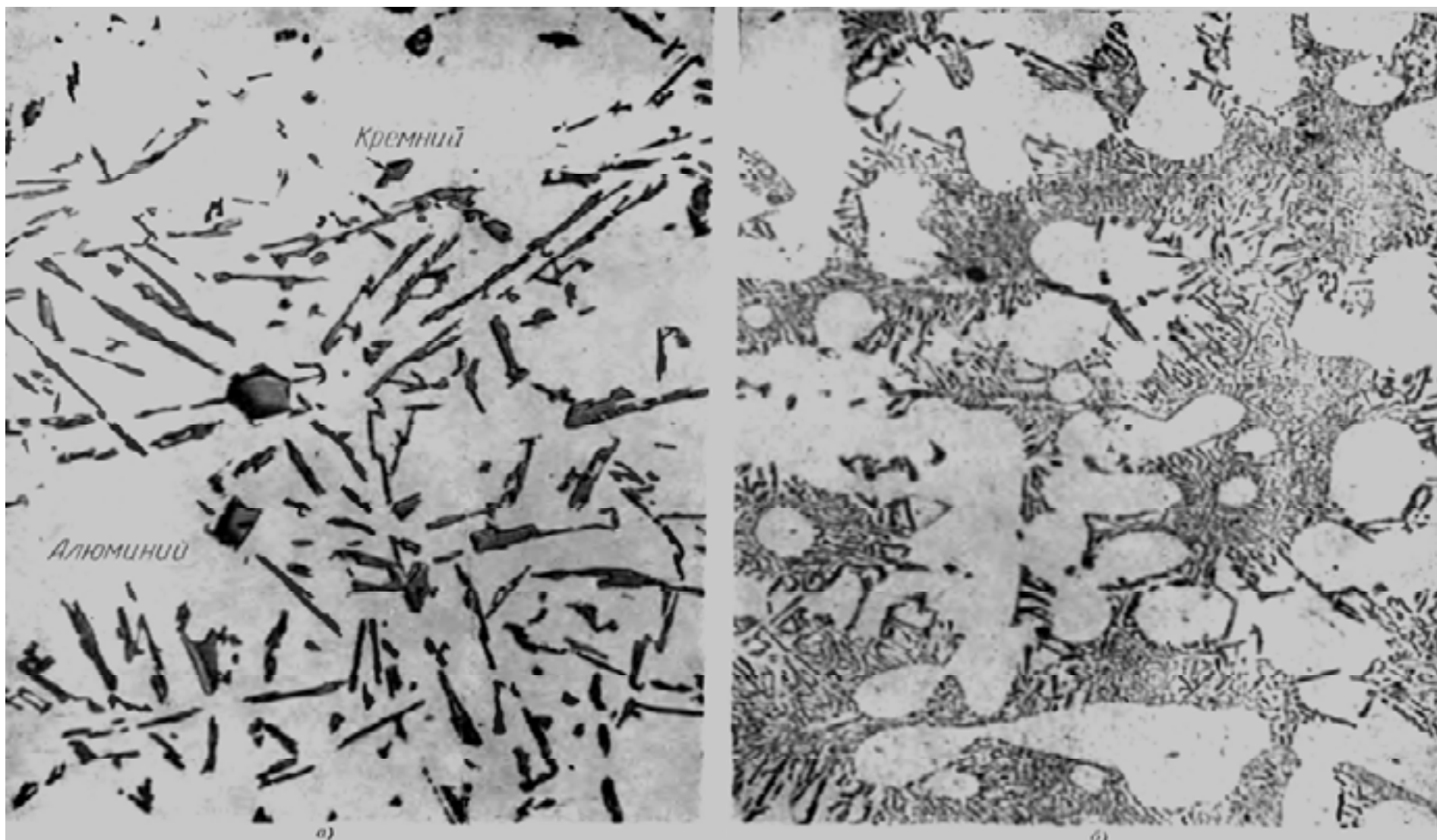


Рис. 66. Силумин; x200: а – первичные выделения кремния; б – после модифицирования (мелкозернистая эвтектика и дендриты твердого раствора кремния и других элементов в алюминии)



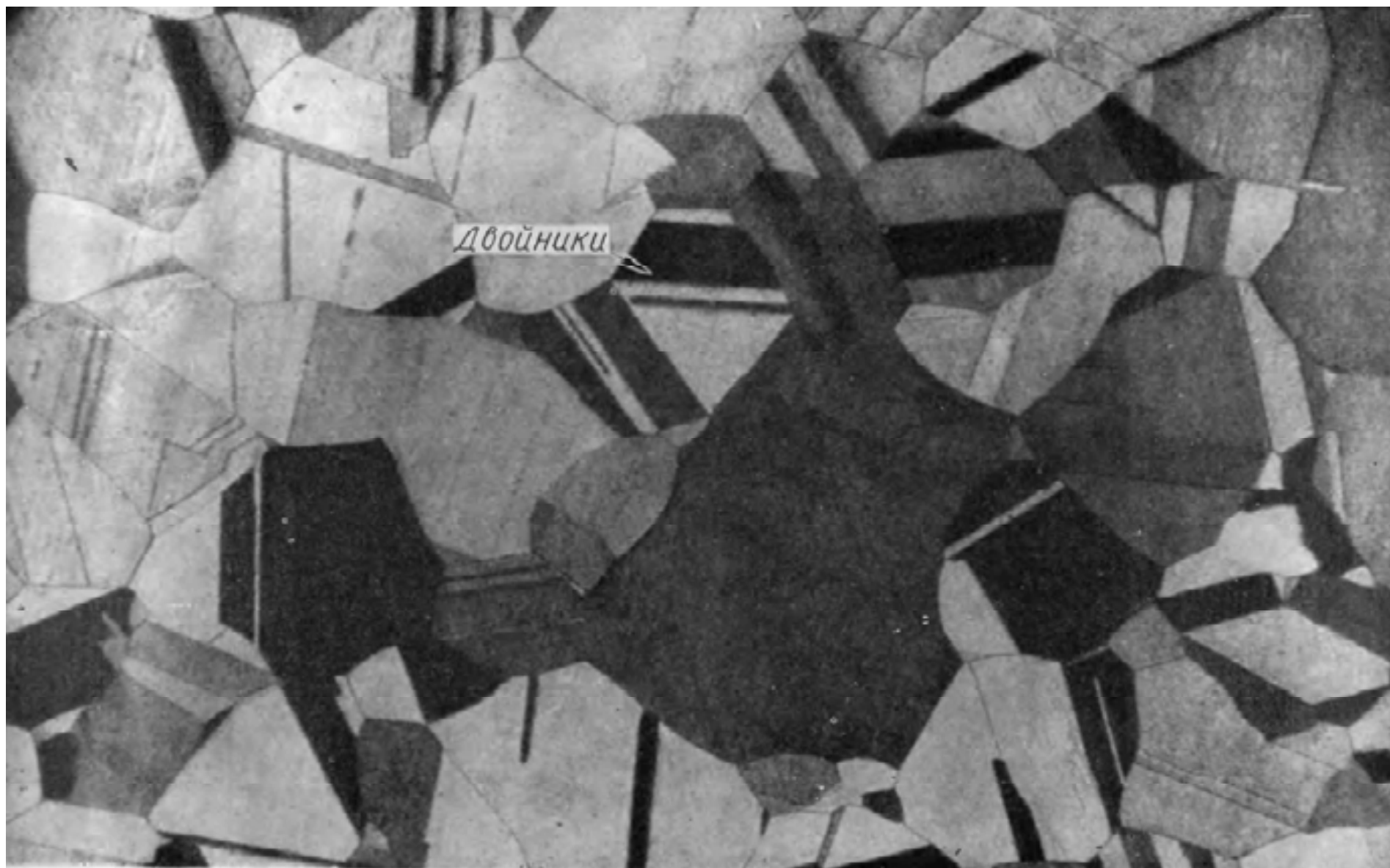


Рис. 67.  $\alpha$ -латунь;  $\times 250$

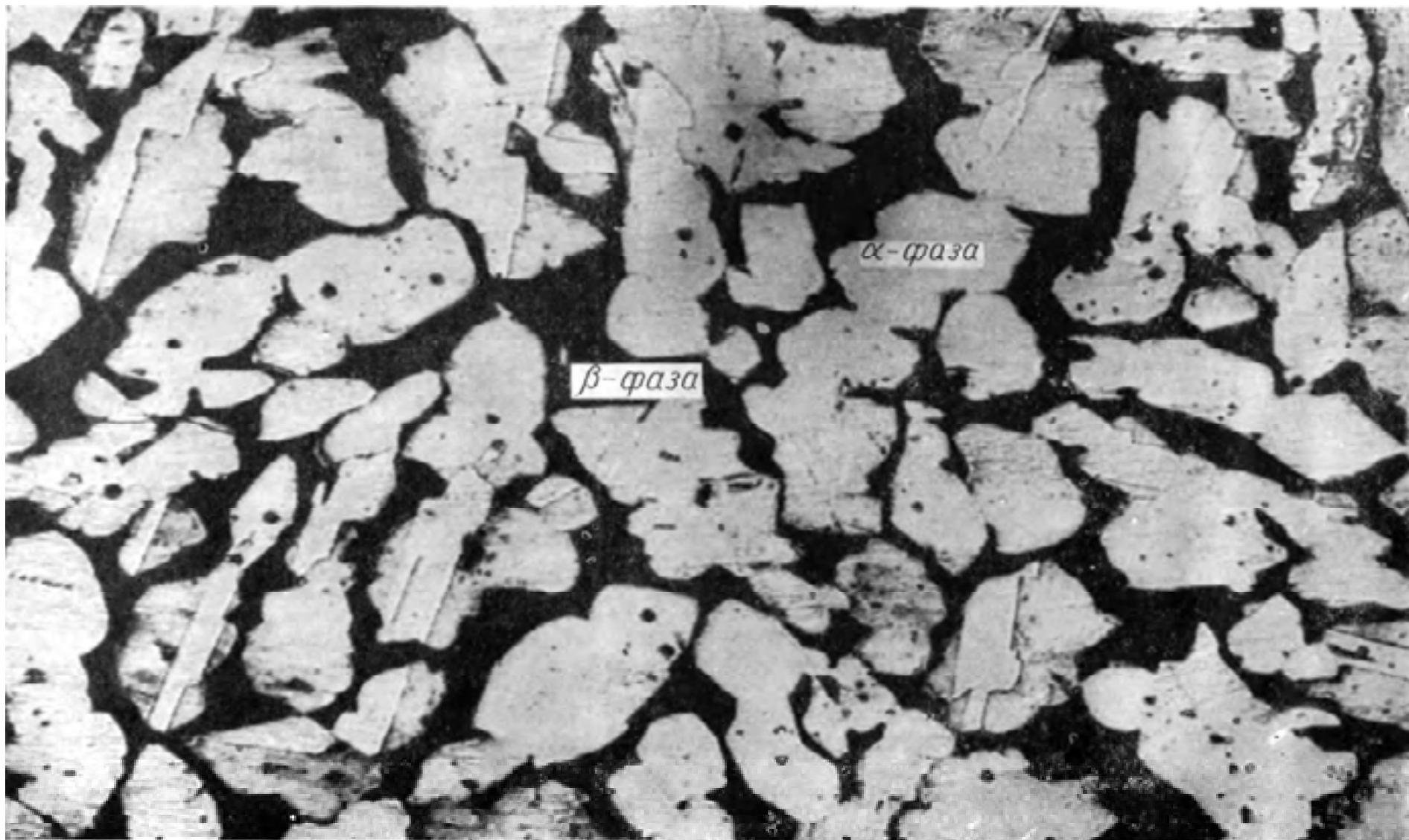
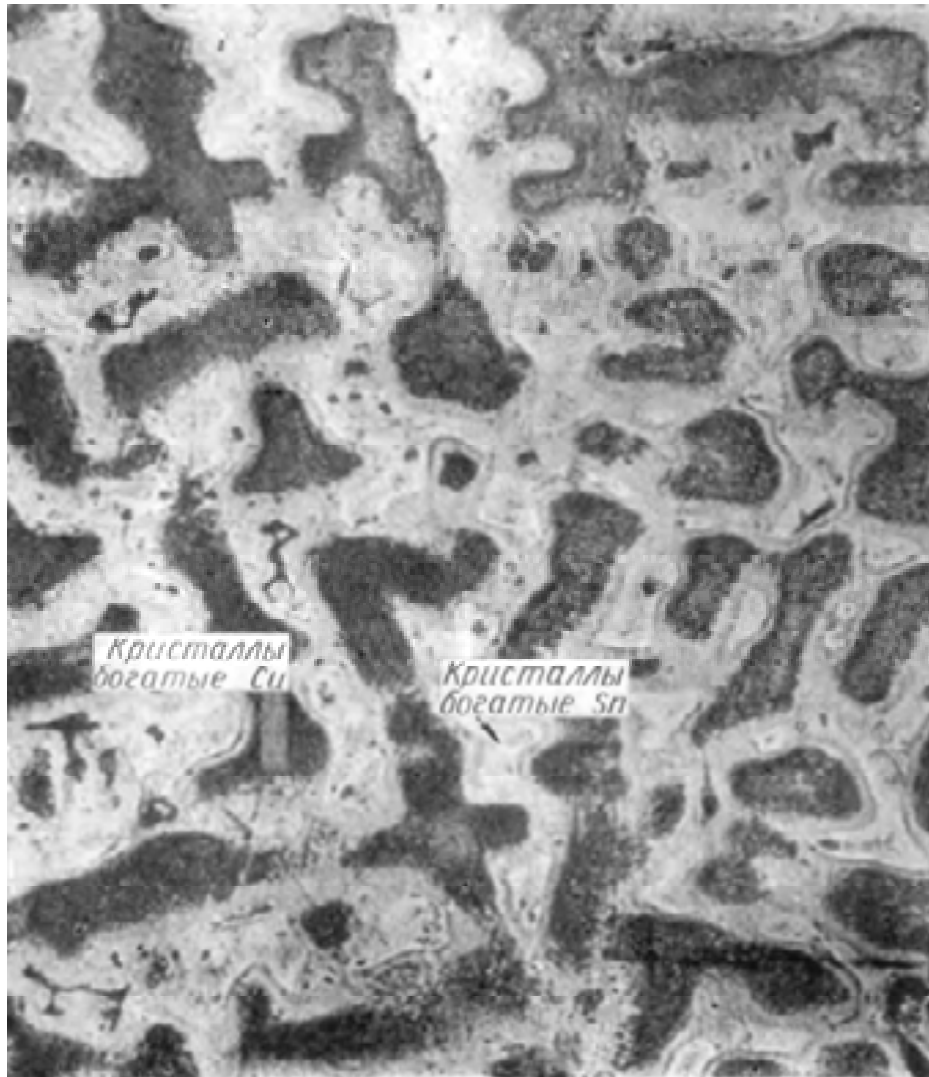
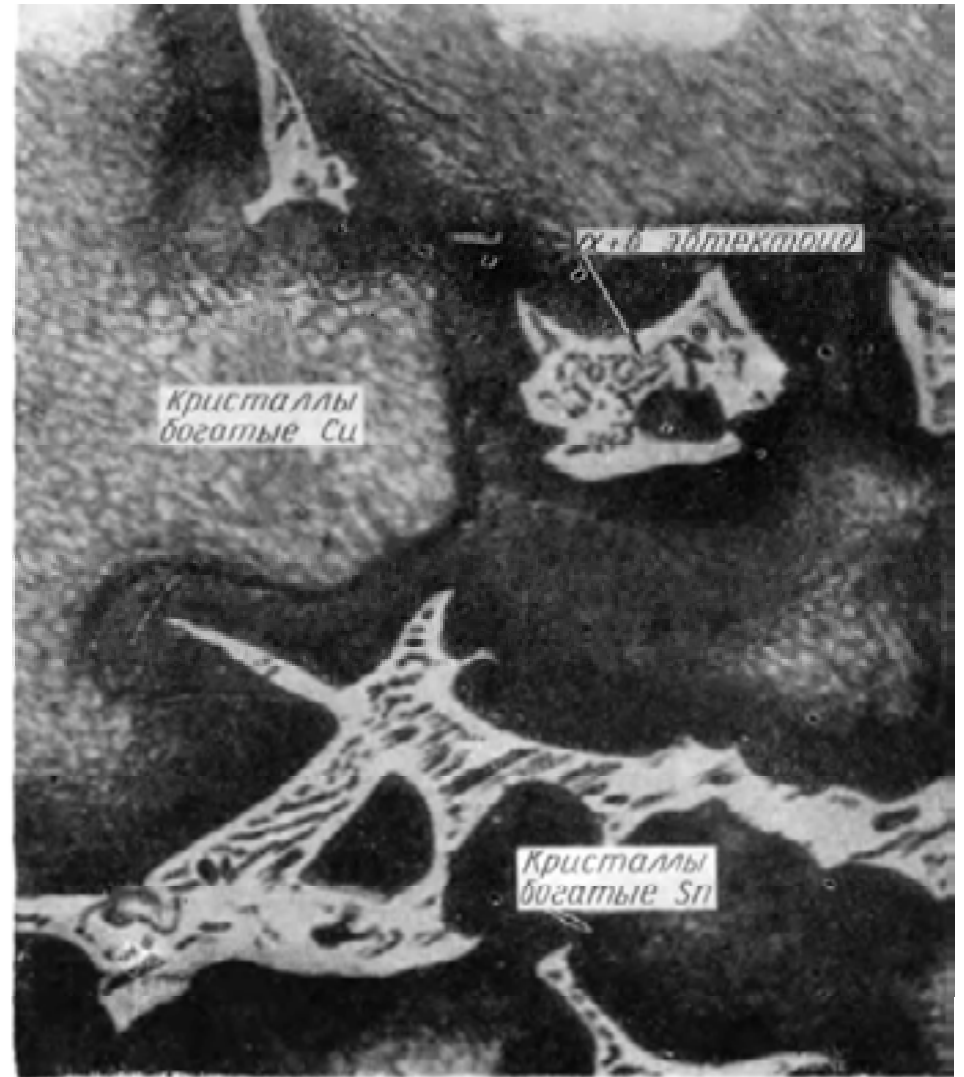


Рис. 68.  $\alpha+\beta$ -латунь;  $\times 250$



а)



б)

Рис. 69. Оловянистая бронза: а – травление 8%-м аммиачным раствором  $\text{CuCl}_2$ ;  $\times 200$ ; б – травление 3%-м раствором  $\text{FeCl}_2$  в 10%-м растворе  $\text{HCl}$ ;  $\times 1000$

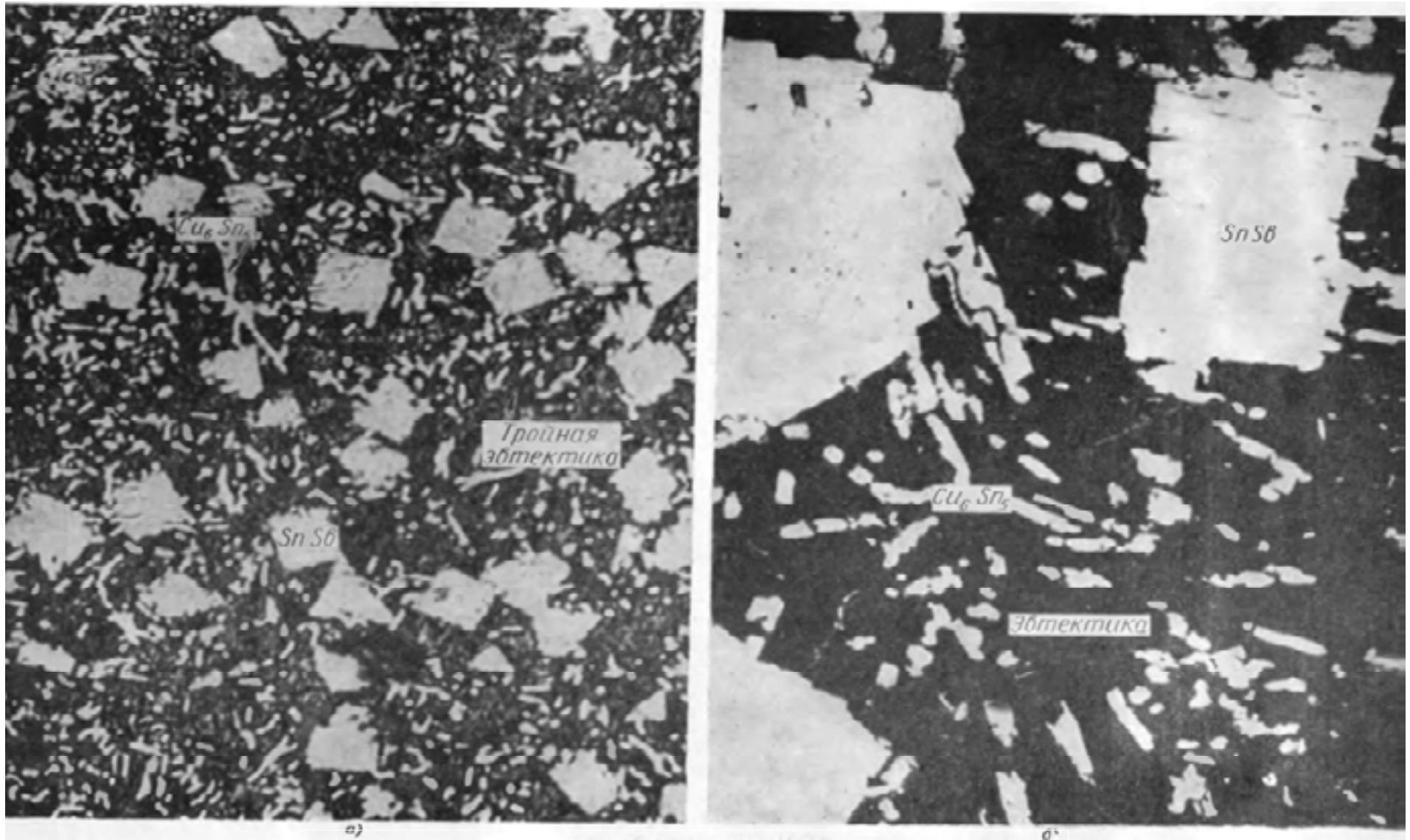
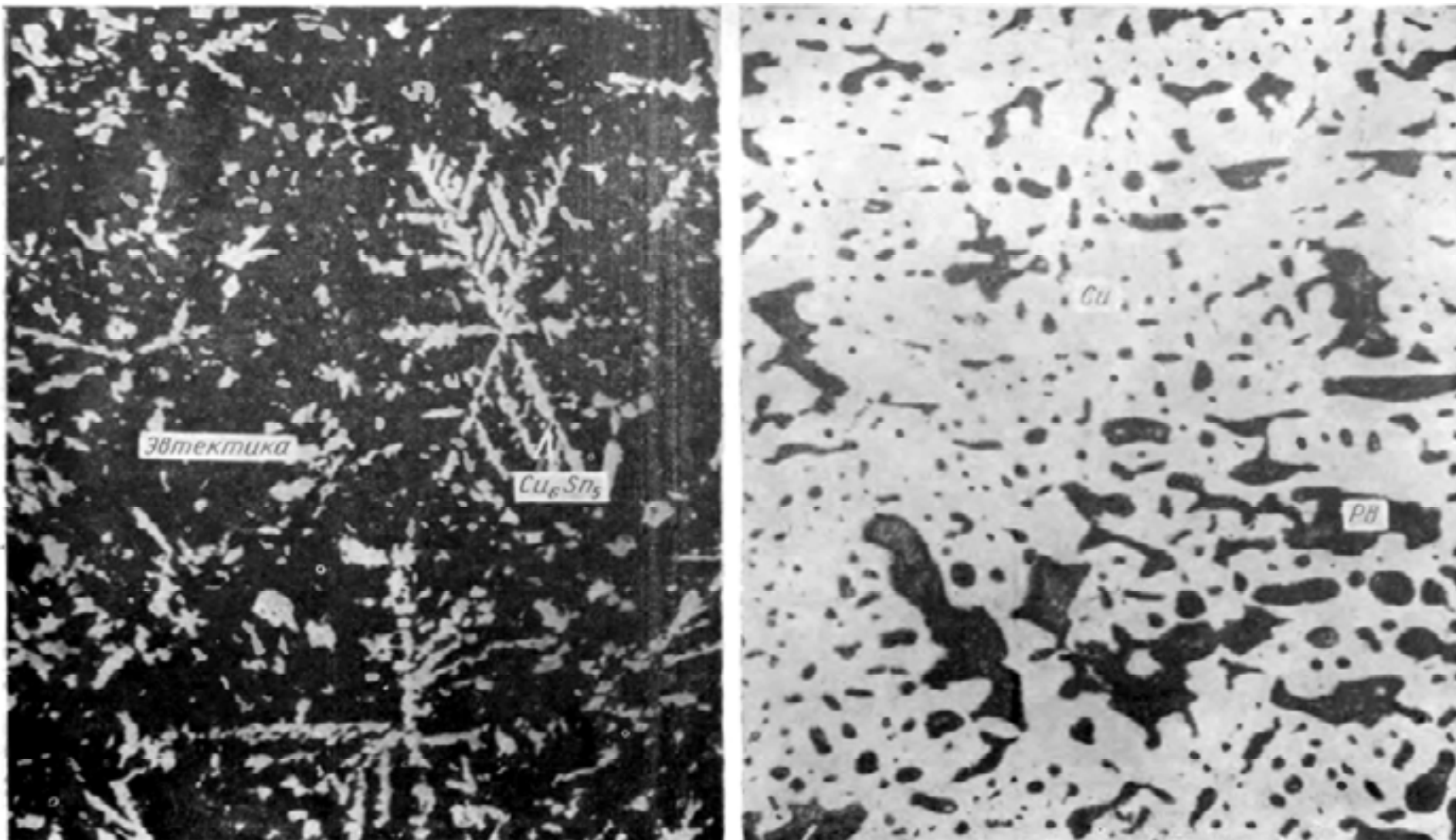


Рис. 70. Баббит Б83; x200: а – нормальная мелкозернистая структура; б – крупнозернистая структура после заливки с перегревом



а) б)  
Рис. 71. Подшипниковые сплавы; х200: а – баббит Б89; б – свинцовистая бронза БрС30



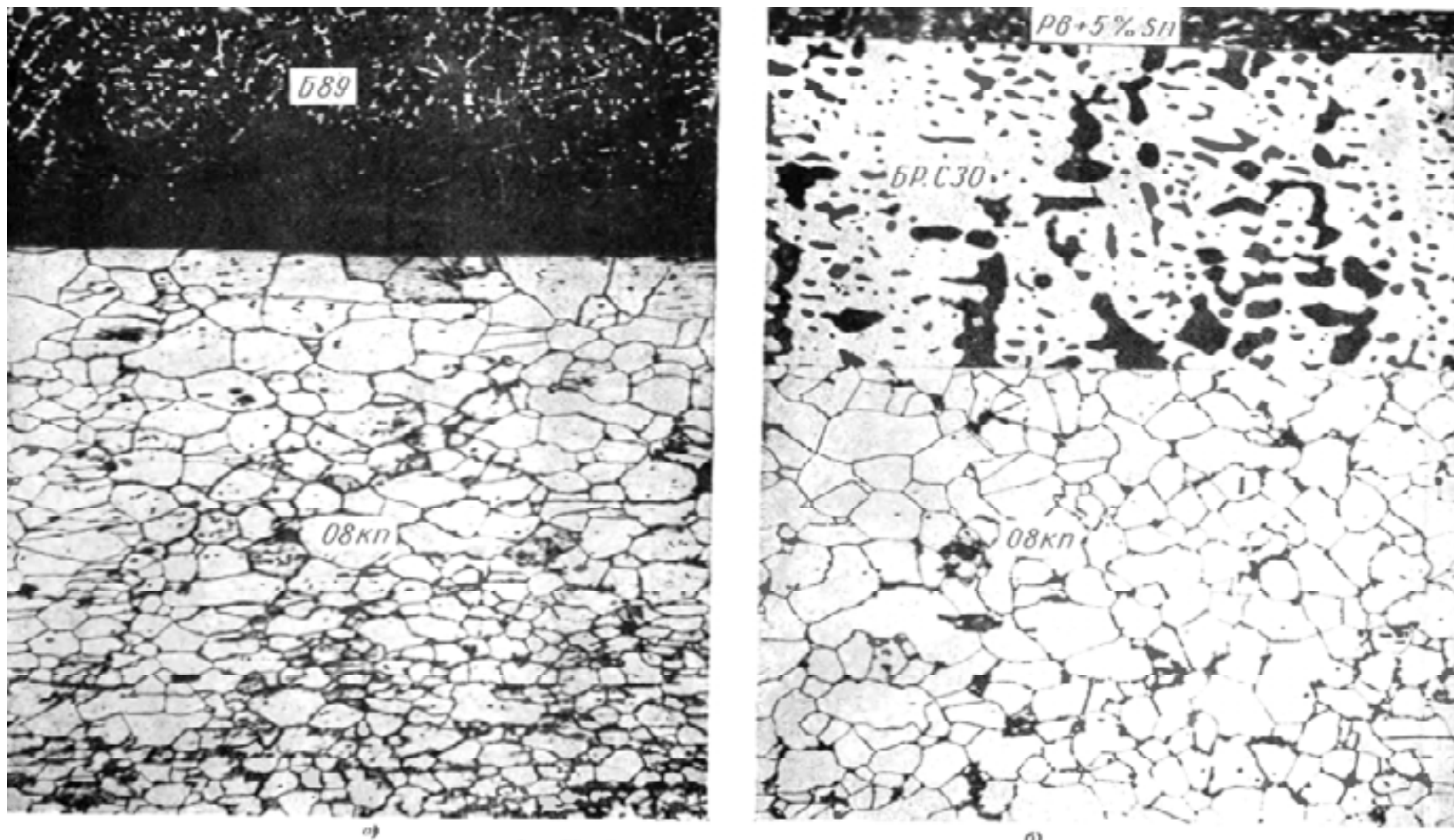


Рис. 72. Двух- и трехслойные подшипники;  $\times 250$ : а – двухслойный вкладыш подшипника: темный тонкий слой баббита Б89 (0,4 мм и тоньше), залитый на ленту из стали 08кп; б – трехслойный вкладыш подшипника: тонкий (20-30 мк) слой свинца с 5% Sn, затем слой свинцовой бронзы БрС30 на ленте из стали 08кп



## Микроструктуры металлов и сплавов для вопросов студентам

С целью облегчения проверки преподавателями знаний студентами микроструктур, описанных в настоящем атласе, на рис. 73, 74 и 75 приведено 39 типичных микроструктур важнейших металлов и сплавов для контрольных вопросов. Намеренно эти микроструктуры даны без надписей, т. е. немymi.

Рис. 73. а — ледебурит; б — сталь с 0,3% С (феррит и перлит); в — сталь с 0,1% С (зерна феррита и немного перлита); г — сталь с 0,2% С (феррит и перлит); д — зернистый перлит; е — сталь с 1,2% С (перлит и сетка вторичного цементита); ж — графит в сером чугуна до травления; з — сталь с 0,6% С (зерна перлита и тонкая сетка феррита); и — аустенит; к — третичный цементит и феррит; л — пластинчатый перлит; м — неметаллическое включение MnS.

Рис. 74. а — троостит закалки и мартенсит; б — мартенсит; в — серый чугун до травления (графит и неизвестная металлическая основа); г — перлит и графит; д — зерна феррита и графит; е — перлит, феррит и графит; ж — перлитный ковкий чугун; з — доэвтектический белый чугун (цементит, перлит и ледебурит); и — высокопрочный чугун (шаровидный графит и неизвестная металлическая основа); к — перлит, феррит и шаровидный графит; л — фосфидная эвтектика, перлит и графит; м — ферритный ковкий чугун (зерна феррита и хлопьевидный графит).

Рис. 75. а — отожженная инструментальная сталь — зернистый перлит; б — закаленная инструментальная сталь (мартенсит и карбиды); в — закаленная быстрорежущая сталь (мартенсит и карбиды); г — отожженная быстрорежущая сталь (карбиды в основе из сорбитообразного перлита); д — карбидная неоднородность (полосчатость); е — твердый сплав типа ВК (частицы WC и Co); ж — твердый сплав типа ТК (WC, Co и твердый раствор WC в TiC); з —  $\alpha$ -латунь; и —  $\alpha+\beta$ -латунь; к — силумин до модифицирования (грубая эвтектика Al+Si и кристаллы кремния); л — силумин после модифицирования (эвтектика Al+Si и кристаллы алюминия); м — свинцовистая бронза (частицы свинца в медной основе); н — оловянистая бронза (дендриты, богатые оловом, и эвтектоид); о — то же (эвтектоид и дендриты); п — баббит оловянистый (SnSb, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> и эвтектика).

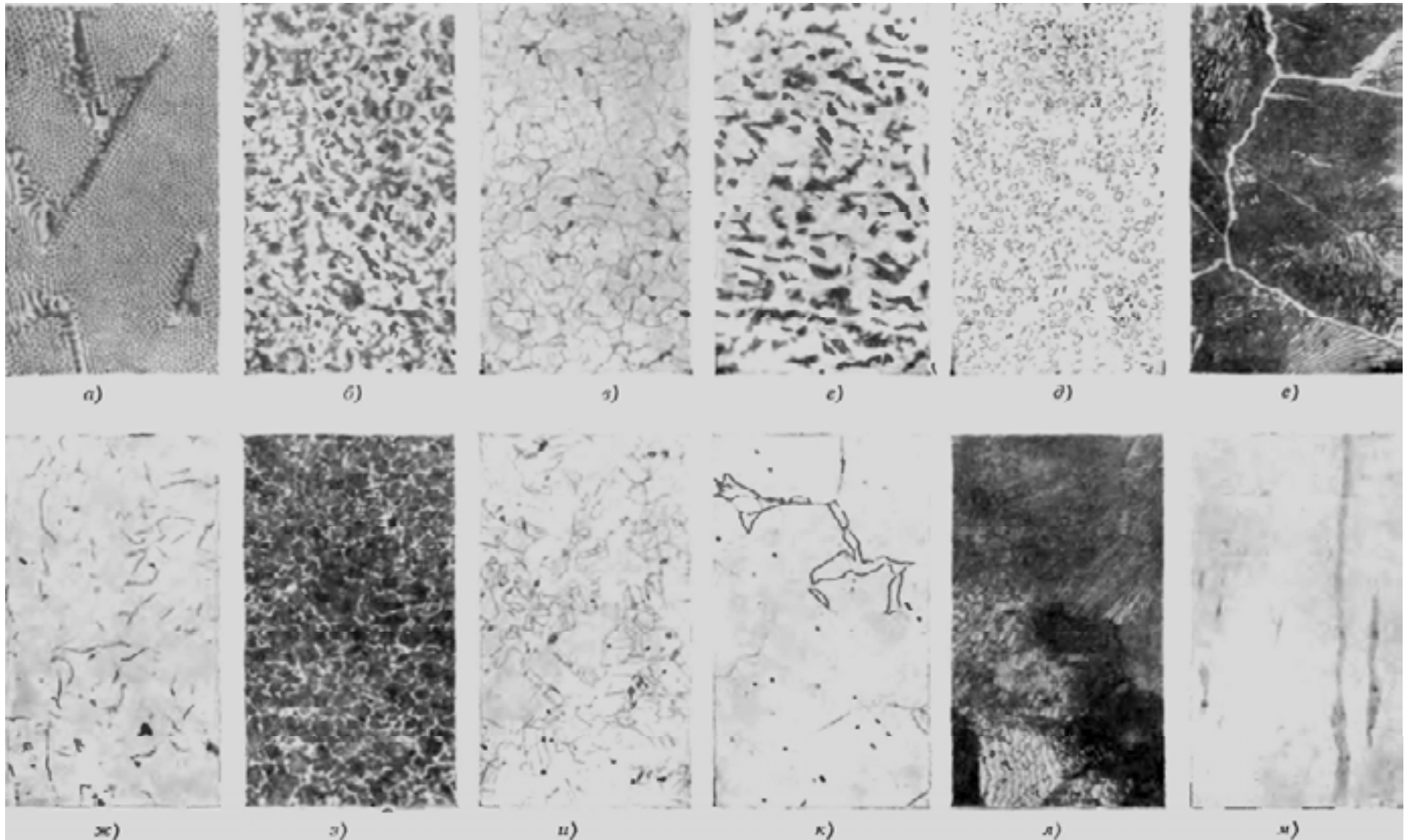


Рис. 73. Микроструктуры металлов и сплавов (вариант 1)

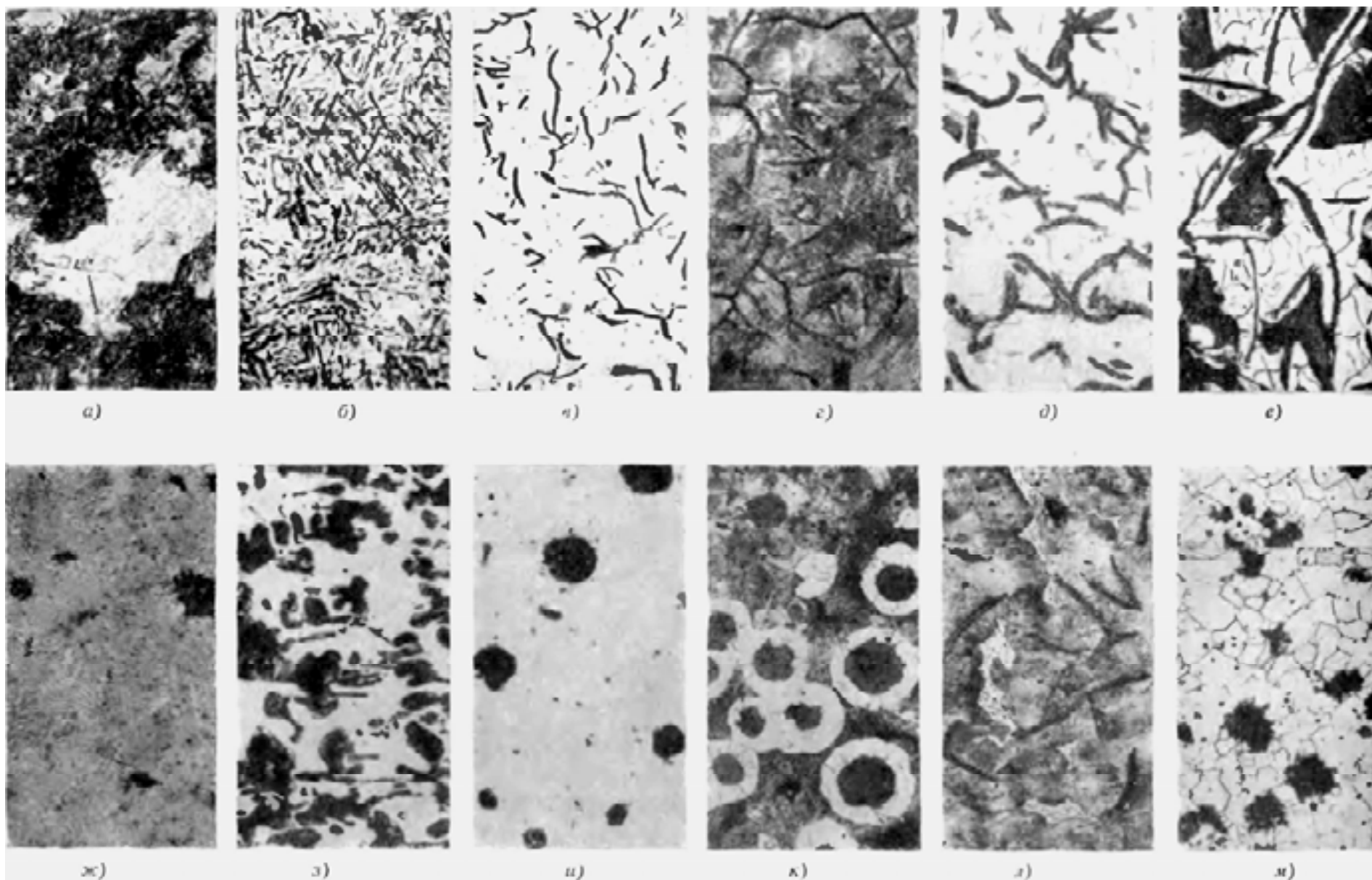


Рис. 74. Микроструктуры металлов и сплавов (вариант 2)

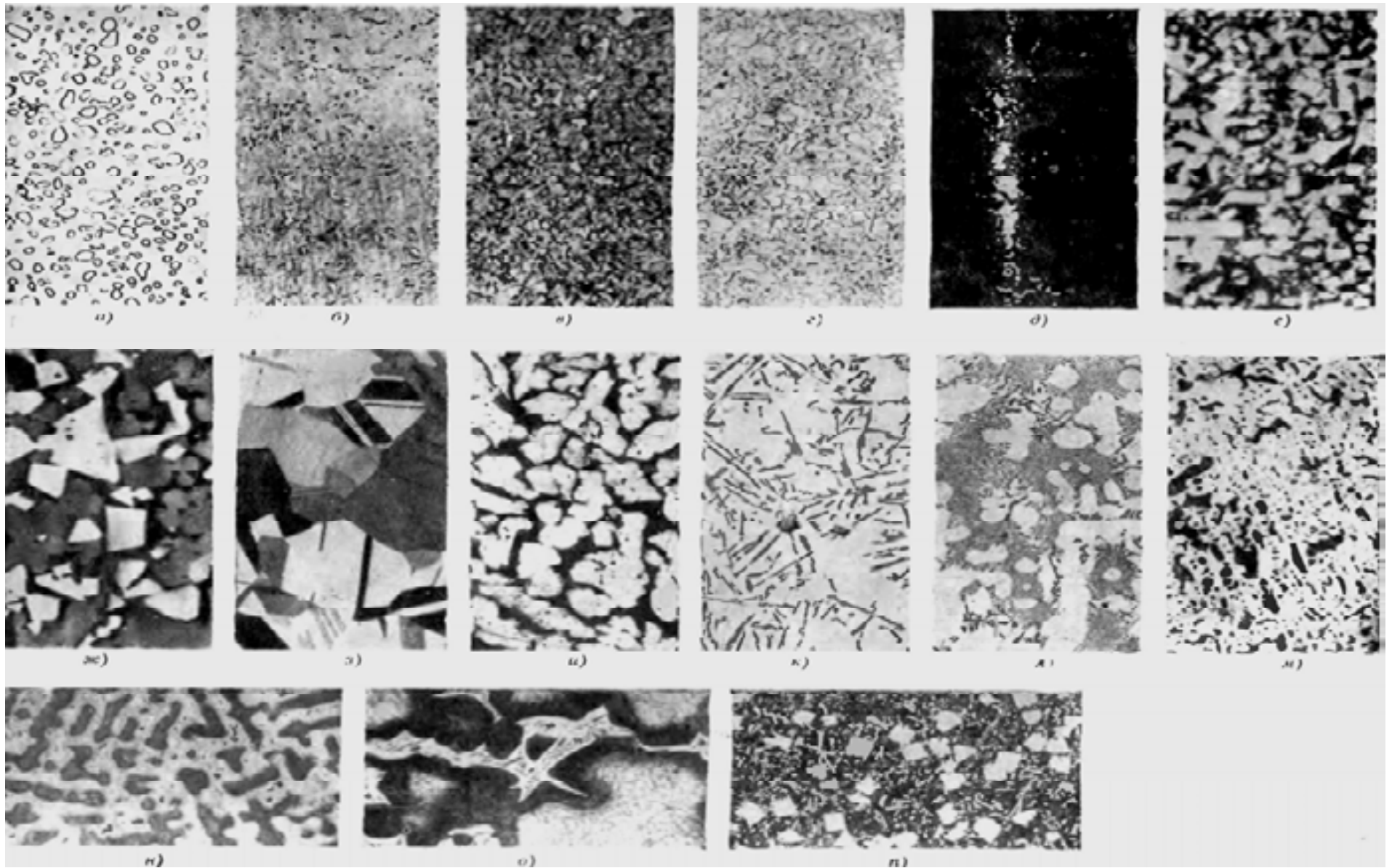


Рис. 75. Микроструктуры металлов и сплавов (вариант 3)

## Оглавление

Введение _____	3
1. ТЕХНИКА МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА _____	4
Вырезка образцов, их размеры и предварительная подготовка поверхности _____	4
Шлифование, полирование и травление _____	7
Микрофотографирование _____	19
2. ОПИСАНИЕ МИКРОСТРУКТУР _____	22
Основные элементы микроструктуры стали и чугуна _____	22
Макро- и микроструктура углеродистой стали _____	32
Микроструктура чугуна _____	45
Микроструктура стали после закалки и отпуска _____	57
Макро- и микроструктура стали после поверхностного упрочнения _____	68
Микроструктура инструментальной стали и твердых сплавов _____	77
Микроструктура цветных и подшипниковых сплавов _____	88
Микроструктуры металлов и сплавов для вопросов студентам _____	97

Учебное издание

Козловский Александр Эдуардович

Атлас микроструктур металлических сплавов  
Учебно-наглядное пособие по материаловедению

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 31.01.2013. Формат 60x84 1/8. Бумага писчая.  
Усл.печ.л. 11,62. Уч.-изд.л. 12,9. Тираж 50 экз. Заказ 3164

ФГБОУ ВПО Ивановский государственный  
химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании  
кафедры экономики и финансов ФГБОУ ВПО «ИГХТУ»  
153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7