

Содержание		
Введение.....		4
1.	Цель работы	5
2.	Задачи работы.....	5
3.	Теоретическая часть.....	5
Часть 1. Виды разрушений и макроанализ изломов.....		6
3.1.	Основные виды разрушения металлов.....	6
3.2.	Макростроение изломов.....	6
	3.2.1. Вязкий излом.....	8
	3.2.2. Хрупкий излом.....	10
	3.2.3. Смешанный излом.....	12
	3.2.4. Усталостный излом.....	14
3.3.	Строение изломов образцов после испытания на ударную вязкость.....	15
Часть 2. Макроанализ по разрезу и шлифам.....		15
3.4.	Изучение несплошностей в теле отливок по разрезу.....	15
3.5.	Изучение макроструктуры по шлифам	17
	3.5.1. Макрошлифы.....	17
	3.5.2. Изучение несоответствия по структуре отливок....	17
	3.5.3. Макроструктура горячедеформированной стали....	20
	3.5.4. Макроструктура термообработанной стали.....	20
Часть 3. Макроанализ сварных соединений.....		21
3.6.	Дефекты, выявляемые по макроструктуре сварных соединений.....	21
4.	Практическая часть.....	23
	4.1. Приборы и материалы.....	23
	4.2. Практические задания.....	23
5.	Критерии результативности работы.....	25
6.	Требования к оформлению и содержанию отчета.....	25
7.	Контрольные вопросы	25
Список литературы.....		26
Приложение 1. Состав травителей для макроанализа.....		28
Приложение 2. Тесты для самоконтроля.....		29

Введение

Изучение связи между составом, строением (структурой) и свойствами материалов является основной задачей материаловедения. Понятие структуры включает в себя тип и относительное количество присутствующих в материале фаз, форму, размеры и взаимное расположение кристаллов (зёрен) этих фаз, а также различные металлургические дефекты изделий (заготовок, деталей).

Некоторые из указанных характеристик структуры материалов можно изучать невооруженным глазом, другие – лишь с помощью микроскопа, соответственно, различают методы макроскопического и микроскопического анализа. В данной работе рассматривается метод макроструктурного анализа металлов.

При выполнении данной работы у студента формируются профессиональные компетенции – способность использовать метод макроструктурного анализа для визуального определения дефектов заготовок и сварных соединений.

Выполнив работу, студент должен:

- **знать** методы:
 - проведения макроструктурного анализа;
 - определения характера разрушения по излому и качества сварного соединения;
- **уметь** определять:
 - дефекты различных заготовок машино- и приборостроения и сварных соединений;
 - характер разрушения по излому;
- **иметь навыки** анализа качества заготовок, полученных литьём, ковкой, штамповкой и сварных соединений.

МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1. Цель работы – освоить методику проведения макроструктурного анализа.

2. Задачи работы:

- научиться определять характер и причины разрушения металла по изломам;
- приобрести навыки и умения по обнаружению дефектов литых, деформированных, термообработанных изделий и сварных соединений по макрошлифам.

3. Теоретическая часть

Макроструктурный анализ (макроанализ) заключается в изучении особенностей строения материалов видимых невооружённым глазом или с помощью лупы с увеличением до 30 раз. Строение материала, выявляемое таким способом, называется *макроструктурой*. Макроанализ дает представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных видов обработки: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки.

Макроанализом можно определить:

- 1) характер разрушения по излому (хрупкий, вязкий, усталостный);
- 2) дефекты¹, нарушающие сплошность материала (раковины, пористость, расслоения, трещины, волосовины, закаты, непровары и газовые пузыри при сварке и др.);
- 3) химическую неоднородность литого металла (ликвацию);
- 4) дендритную структуру литого или волокнистую структуру деформированного металла;
- 5) качество сварного соединения;
- 6) глубину слоя после химико-термической обработки.

¹ дефект – каждое отдельное несоответствие установленным требованиям (ГОСТ 15467-70).

Методы макроскопического анализа классифицируются следующим образом: внешний осмотр; изучение изломов; изучение разрывов и шрифтов. В данной работе рассмотрим дефекты различных деталей по их излому, разрезу и макроструктуре. Визуальному контролю качества изделий машиностроения путём внешнего осмотра посвящена отдельная работа (см. лабораторный практикум № 6).

Часть 1. Виды разрушения и макроанализ изломов

Разрушение всегда начинается с зарождения и распространения в металле трещин и заканчивается разделением его на две и более частей.

3.1. Основные виды разрушения металлов

На практике, в зависимости от степени развития в процессе разрушения пластической деформации, различают *хрупкое* и *вязкое* разрушение [1, С. 59], а при приложении циклических нагрузок ещё и *усталостное* разрушение [2, С.58].

Хрупкое разрушение происходит при преимущественно упругом деформировании материала, без заметной пластической деформации, под действием нормальных растягивающих напряжений, вызывающих *отрыв* одной части тела от другой. Разрушение происходит в основном по границам зёрен, где часто наблюдаются скопления хрупких фаз или примесей.

Хрупкое разрушение наиболее опасно, так как возникает внезапно, без предварительной пластической деформации, сигнализирующей о начале нежелательного процесса и трещина распространяется с большой скоростью. Эта скорость очень велика и достигает 0,4...0,5 скорости распространения звука в металле (в стали – 2500 м/с). Основной причиной хрупкого разрушения является низкая пластичность материала, выбранного для данного применения. Хрупкому разрушению способствуют также низкие температуры эксплуатации, динамические (ударные) нагрузки. Хрупко могут разрушиться детали, имеющие в нагруженных местах своей конструкции такие концентраторы напряжений как выточки, галтели, отверстия. С увеличением остроты и глубины надреза склонность к хрупкому разрушению возрастает. Возможной причиной хрупкого разрушения может быть также нарушение режима

термической обработки или его ошибочный выбор. Так, при повышенной температуре нагрева стали под закалку (“перегреве”) значительно укрупняется зерно, падает ударная вязкость. Свойство материалов сопротивляться хрупкому разрушению называется *надёжностью*.

Вязкое разрушение сопровождается значительной пластической деформацией *сдвига*, затратой большой работы на распространение трещины и медленным её развитием, что вызывает меньшую опасность при техническом использовании металлических материалов.

Усталостное разрушение. Значительная часть поломок деталей вызвана усталостью материала. *Усталостью* называется разрушение металлов под действием повторных циклических нагрузок. Усталостное разрушение может развиваться в деталях, работающих даже при напряжениях меньше предела текучести материала.

Вид разрушения выявляется при изучении изломов. *Изломом* называется поверхность раздела, возникающая при разрушении детали под действием различных нагрузок.

По структурному признаку [1, С.59] различают *внутризёрненное* (транскристаллитное) и *межзёрненное* (интеркристаллитное) разрушения (рис. 1). При внутризёрненном разрушении трещина распространяется по телу зерна (рис. 1, а) и при этом может происходить как вязкое, так и хрупкое разрушение. Межзёрненное разрушение больше проявляется при хрупком разрушении, когда трещина распространяется вдоль границ зёрен (рис. 1, б). Поверхности, полученные после таких видов разрушения, называются *внутризёрненным* или *межзёрненным* изломами.

3.2. Макростроение изломов²

Макростроение (макрорельеф) излома – набор элементов поверхности разрушения, используемых для идентификации излома и различимых при визуальном рассмотрении или с небольшим увеличением (х30). При макроскопическом исследовании непосредственно по виду излома можно установить многие особенности

² Руководящий документ по стандартизации РД 50 – 672 – 88. Расчёты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. Дата введения 01. 07. 89

строения материалов, а в ряде случаев и причины их разрушения.

В соответствии с рассмотренными *видами разрушений* различают изломы: 1) вязкий (матовый); 2) хрупкий (светлый); 3) усталостный (с бороздками усталости). Их можно отличить друг от друга по внешнему виду (характерному оттенку, микрорельефу и морфологии элементов) поверхности излома. Обычно изломы бывают смешанными, то есть на поверхности излома имеются участки вязкого и хрупкого разрушения. Рассмотрим некоторые из этих видов изломов.

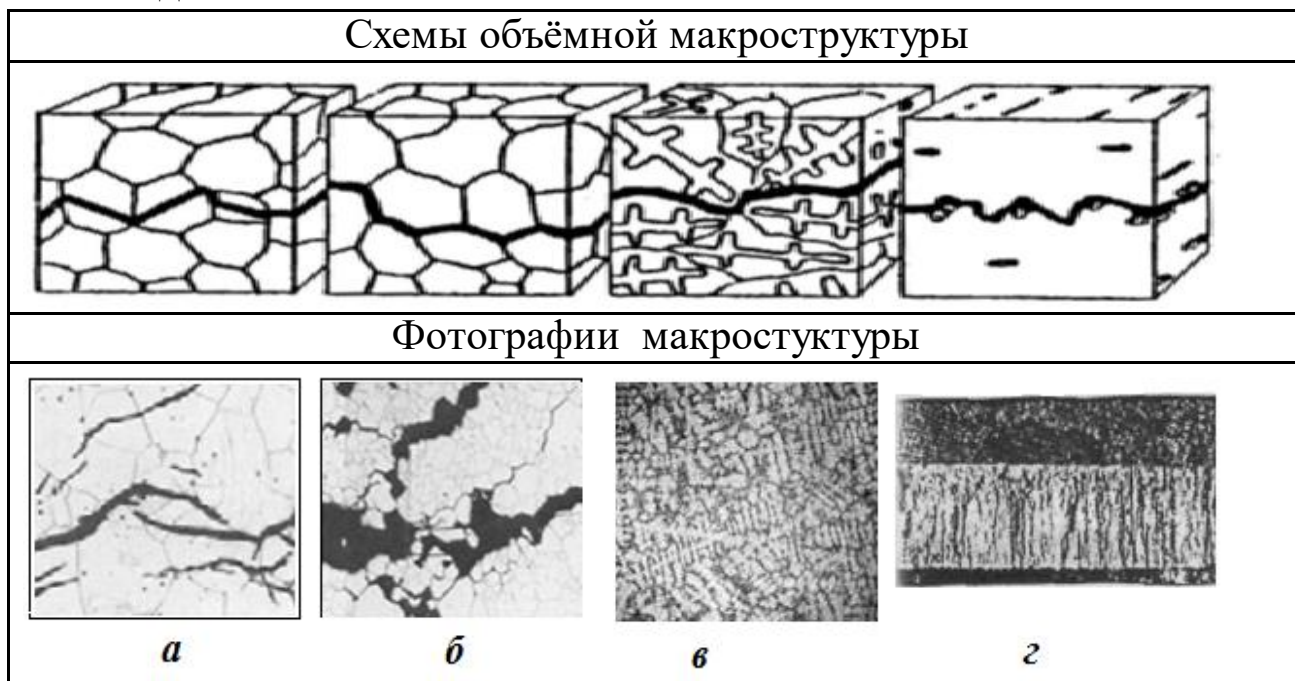


Рис. 1. Виды изломов: *а* – внутризёрный (транскристаллитный); *б* – межзёрный (интеркристаллитный); *в* – дендритный; *г* – шиферный

3.2.1. Вязкий излом. Он имеет матово-серый оттенок. Создаётся касательными напряжениями сдвига. Форма и размер зёрен при вязком изломе значительно искажаются, так как разрушение в этом случае сопровождается значительной пластической деформацией и границы зёрен не просматриваются. По внешнему виду вязкий излом может иметь волокнистое строение, шиферный и дендритный вид.

Волокнистый излом (рис. 2, *а*) характеризуется «волоконками» в направлении нагружения под действием пластической деформации. Представляет собой однородную поверхность вязкого внутризёрного разрушения с явно выраженными признаками пластической деформации по всей поверхности разрушения. Характерен для литых и деформированных сталей. Волокнистое строение — название условное. При больших увеличениях в волокнистом

изломе выявляется ямочный («чашечный») микрорельеф (рис. 2, б). С увеличением вязкости материала глубина ямок увеличивается. Глубина ямки показывает способность металла к локальной пластической деформации. Излом матовый, без металлического блеска.

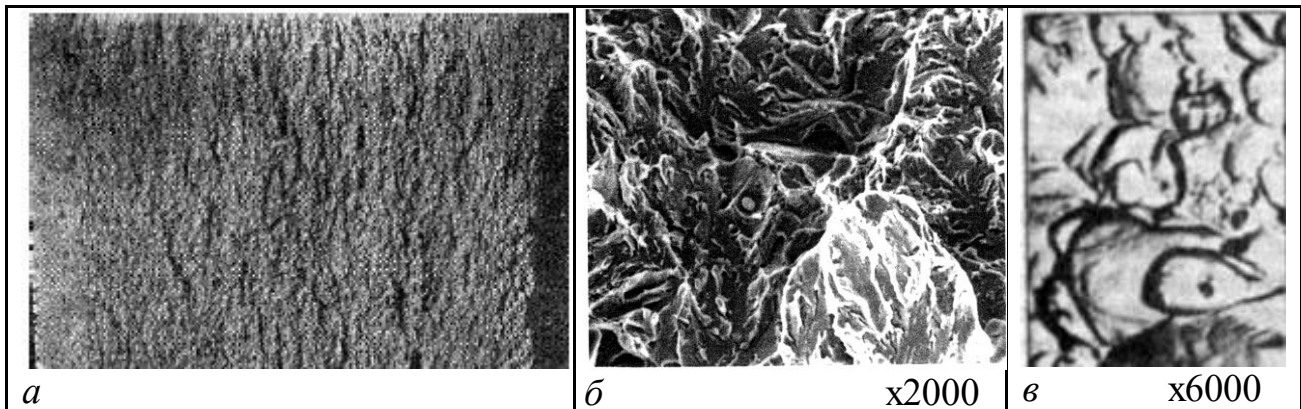


Рис. 2. Вязкий излом, с волокнистым строением: макроструктура (а), растровая микроскопия (б, в), электронная микроскопия реплик (в): наряду с крупными ямками имеются и мелкие

Различают также *волокнисто – полосчатый* излом (рис. 3, а), и *волокнисто – чешуйчатый* излом (рис. 3, б). *Волокнисто – полосчатый* излом имеет слоистое строение. На его поверхности наблюдаются длинные выступы и впадины, расположенные рядами, параллельными направлению деформации. Появление волокнисто–полосчатой структуры излома является признаком одного из существенных пороков стали – шиферности.

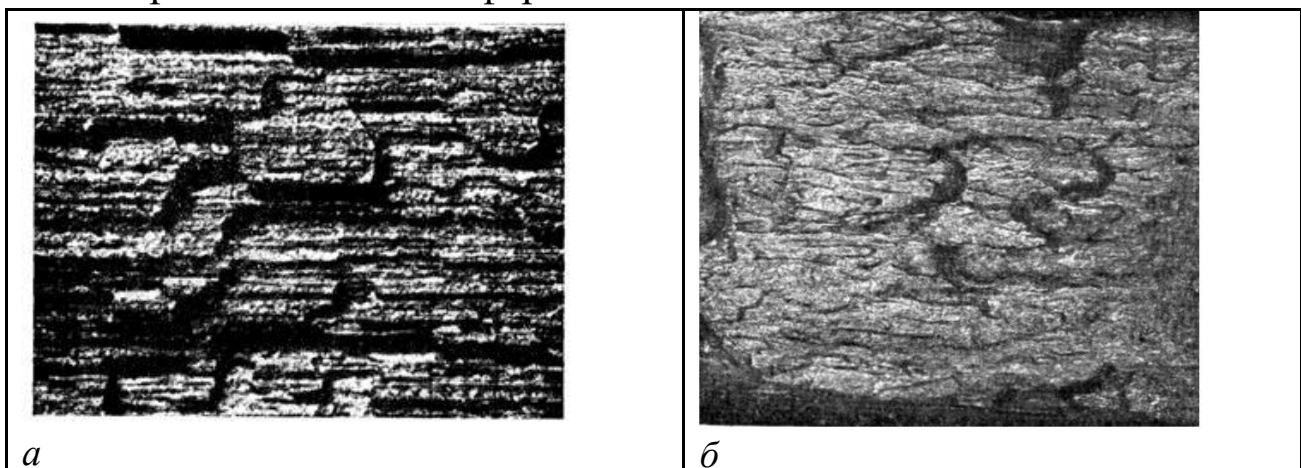


Рис. 3. Волокнисто – полосчатый (а) и волокнисто – чешуйчатый излом (б)

На поверхности волокнисто – чешуйчатого излома заметны чешуйки с гладкой ровной поверхностью, имеющие вытянутую вдоль направления деформации форму.

Шиферный излом имеет сильно волнистый, извилистый и

действительно шиферный вид (рис. 1, з). Такой излом подобен разрушению грубоволокнистого дерева в продольном направлении с обрывами группы волокон и часто встречается в деформированной (горячекатаной) стали. *Причинами образования* шиферности являются сильно выраженная ликвация, строчечность структуры, загрязнённость стали большим количеством строчечных неметаллических включений, а также наличие газовых пузырей и пустот, которые вытягиваются при горячей обработке стали давлением в том же направлении, что и волокна. Эти дефекты создают значительную неоднородность структуры деформированной стали, что обуславливают шиферное строение ее излома.

Иногда поверхность шиферного излома может иметь мелкозернистое строение, сплошность которого нарушается наличием уступов и полос. Шиферный излом свидетельствует о низком качества стали. Встречается в продольных изломах (поперечные пробы), как правило, после закалки и отпуска.

Дендритный излом (рис. 1, в) имеет неоднородную поверхность разрушения, характеризующуюся столбчатыми кристаллами с четко выраженным рельефом элементов дендритного строения металла. Он характерен в основном для литой стали. Дендритный излом редко наблюдается по всему сечению отливки, чаще такой вид излома занимает отдельные зоны вблизи ее поверхности.

Причины образования: 1) повышенное содержание в стали никеля и пониженное содержание марганца; 2) перегрев жидкого металла; 3) низкая скорость кристаллизации. Может быть вязким матовосерого цвета и хрупким без следов пластической деформации; во втором случае поверхность светлая и блестящая (рис. 4).

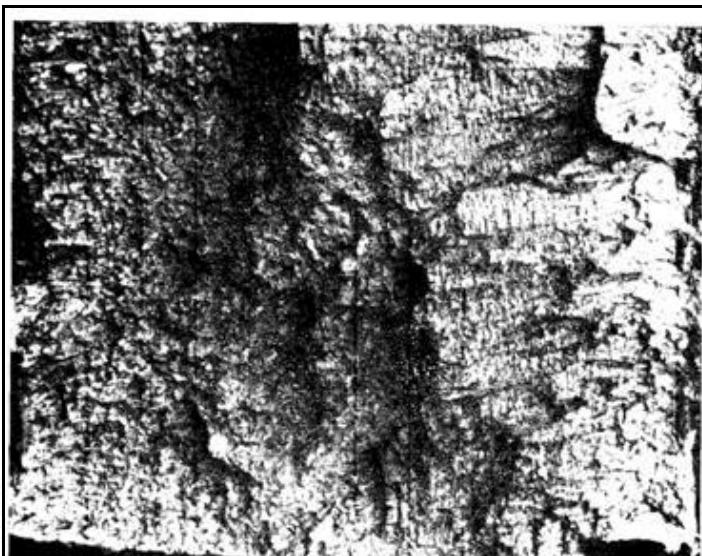


Рис. 4. Дендритный излом

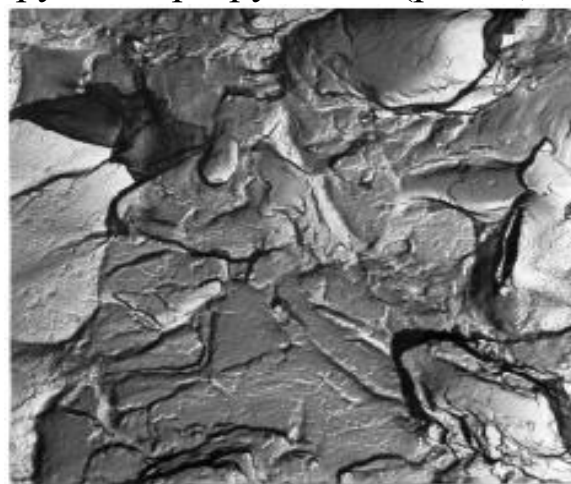
3.2.2. Хрупкий излом. Он образуется при хрупком разрушении по границам зёрен или плоскостям лёгкого скольжения внутри зёрен. Поэтому хрупкий излом имеет зернистый рельеф, состоит из множества блестящих граней (фасеток), хорошо отражающих свет.

По внешнему виду хрупкий излом может быть кристаллическим, мелкокристаллическим (фарфоровидный, бархатистый), нафталинистым, камневидным.

Кристаллический излом без заметных признаков пластической деформации образуется после хрупкого разрушения (рис. 5).



a



б

Рис. 5. Хрупкий кристаллический излом: *a* – макроструктура, расходящиеся рубцы указывают направление разрушения; *б* – микрофрактограмма, х3000

Излом, как правило, светло-серый, состоит из блестящих плоских участков (фасеток). Возникает при разрушении по границам зерен (такой излом иногда называют зернистым) или по кристаллографическим плоскостям, проходящим по телу зерен, что обуславливает значительную отражательную способность

излома, придавая ему характерный металлический блеск.

Мелкокристаллический излом – по сути кристаллический излом с мелкокристаллическим строением. Бывает фарфоровый и бархатистый.

Фарфоровый (фарфоровидный) излом (рис. 6, *а*) имеет матовый светлосерый цвет, со сглаженной поверхностью с трудноразличимой кристаллическостью строения, похожая на поверхность разрушения фарфора.

Бархатистый излом с мелкокристаллическим строением, трудно разрешаемым визуально, имеет гладкую поверхность серого цвета с тусклым металлическим отливом, напоминающим бархат (рис. 6, *б*). Мелкокристаллический излом соответствует более высоким механическим свойствам металлов и сплавов. Встречается у правильно закаленных инструментальных сталей, а также у высокопрочных низко отпускаемых конструкционных сталей с мелкозернистой структурой.



Нафталинистый (нафталиновый) излом (рис. 7) наблюдается при внутризёрном разрушении и проходит по телу зерна. Такой излом отличается наличием крупных, гладких плоских участков (фасеток) с характерным блеском, подобным блеску нафталина. Он свидетельствует о повышенной хрупкости стали. Встречается в крупнозернистых литых конструкционных сталях после нагрева под горячую пластическую деформацию и в быстрорежущих сталях при нарушении режима термообработки. В них укрупнение зерен может происходить из-за перегрева.

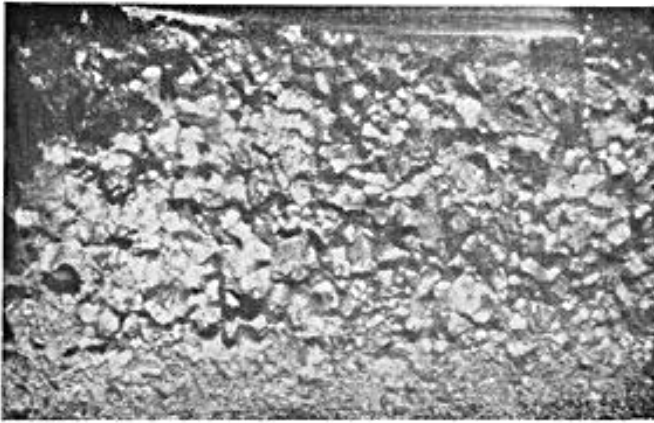


Рис. 7. Нафталинистый излом

Камневидный (зернистый) излом (рис. 8) образуется при межзёрненном хрупком разрушении. Причиной такого разрушения являются примеси, которые концентрируются при перегреве металла в приграничных областях или непосредственно на границах зерен. Такой излом можно устранить гомогенизирующим отжигом.

3.2.3. Смешанный излом. Довольно часто встречаются изломы, на поверхностях которых имеются участки, характерные и для хрупкого и для вязкого разрушения (рис. 9). В этом случае разрушение классифицируют как смешанное (вязкохрупкое).



Рис. 8. Камневидный излом

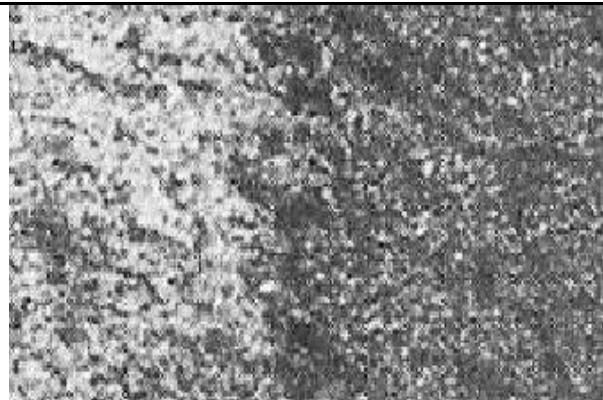


Рис. 9. Смешанный излом: слева – светлый участок хрупкого излома

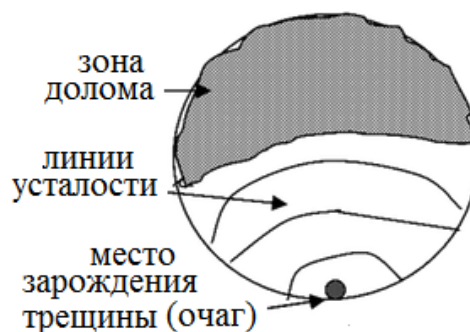
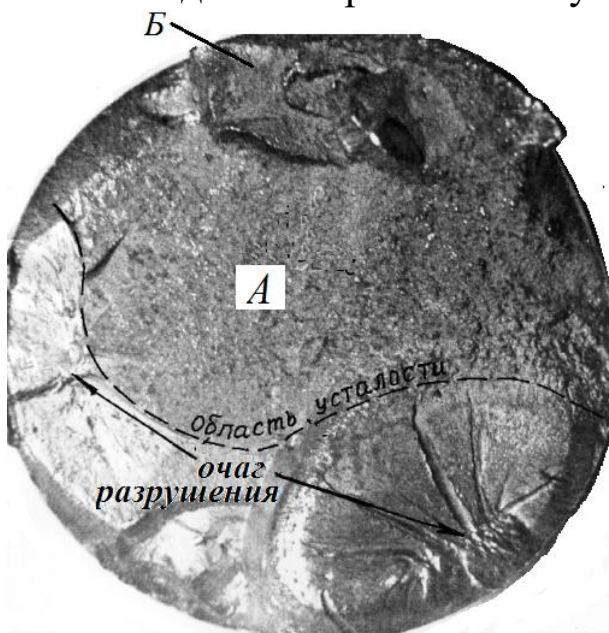
Вязкохрупкое разрушение особенно характерно для высокопрочных металлических материалов, в которых трещины возникают при упругой стадии деформации и, как правило, распространяется с очень большой скоростью. На участках с большей пластичностью скорость распространения трещины затухает и на этой стадии формируется вязкий (более темный) участок излома.

3.2.4. Усталостный излом (рис. 10). Образуется при постепенном развитии процесса разрушения металла в результате длительных повторяющихся циклических нагрузок (рельсы, оси, валы, шестерни, штоки, клапанные пружины и др.). На изломе от усталости

можно различить три зоны:

1) очаг разрушения, где возникают первые трещины усталости. Постепенно трещины распространяется вглубь, образуя сглаженную поверхность. Гладкий вид поверхности создается в результате наклёпа, вызываемого повторяющимися нажатиями двух поверхностей трещины одна на другую или их взаимным трением при перемене знака напряжения.

2) зона медленного разрушения *A* (усталости). Зону усталости последовательное развитие трещины усталости. В этой зоне часто наблюдаются формирует характерные линии усталости или бороздки, которые могут иметь конфигурацию колец, что свидетельствует о скачкообразном продвижении трещины усталости. Бороздки наблюдаются при больших увеличениях.



б

Рис. 10. Излом усталости: *а* – внешний вид излома от усталости: *A* – зона медленного разрушения; *Б* – зона мгновенного разрушения (долома);

б – схема усталостного излома

а

3) зона мгновенного разрушения *Б* (долома) характеризует последнюю стадию разрушения. Долом проходит внезапно и может быть вязким или хрупким. Часто разрушение детали, в результате их усталости, наблюдается при несовершенстве геометрической формы (резкие переходы от одной поверхности к другой), наличия на поверхности царапин, задиров, рисок, неметаллических включений и др. На изломах макроструктуру оценивают путем сравнения с нормативными макроструктурами, приведенными в ГОСТ 10243-75 (Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры), по 25 параметрам.

3.3. Строение изломов образцов после испытания на ударную вязкость

Макростроение изломов призматических образцов с концентратором при изгибе после вязкого разрушения характеризуется четырьмя зонами (рис. 11).

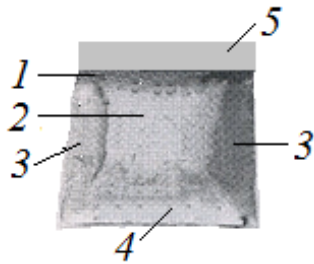


Рис. 11. Макростроение излома призматических образцов: 1 – зона начала разрушения; 2 – зона отрыва, расположенная нормально к оси образца; 3 – боковые скосы; 4 – зона долома; 5 – надрез

Разрушение начинается около надреза 5 в зоне 1. Ширина этой зоны зависит от пластичности материала и остроты концентратора напряжений (надреза или трещины). С уменьшением пластичности материала ширина этой зоны также уменьшается. Зона отрыва 2 располагается в плоскости, перпендикулярной к оси образца, и представляет собой часть излома, образующуюся отрывом. Боковые скосы (зона 3), а также долом (зона 4), часто располагаются под углом 45° к оси образца. Они образуются под действием касательных напряжений.

Вязкие изломы, полученные при изгибе, являются волокнистыми, имеют тёмную или тёмно-серую окраску безо всякого блеска. Они имеют значительной величины боковые скосы часто с изогнутостью. В зоне сжатия вязкие изломы имеют «шелковистый» вид, кроме того, обычно здесь расположен небольшой уступ. Образцы из пластичных материалов при ударном испытании могут полностью не разрушаться. При хрупком разрушении зоны 3 и 4, как правило, отсутствуют.

По внешнему виду смешанного излома можно установить количественную характеристику доли вязкого разрушения на поверхности излома и доли хрупкой составляющей. Процент вязкой составляющей в изломе ударных образцов характеризует сопротивление материала хрупкому разрушению. Хрупкая составляющая в изломе образца сечением 8×10 мм часто имеет вид трапеции, площадь которой увеличивается по мере увеличения хрупкой составляющей (рис. 12). Вязкая составляющая располагается, как правило, вокруг хрупкой составляющей. Доля хрупкой составляющей X определяется по формуле: $X = F_x / F_0 \cdot 100$ %, где F_x –

площадь, занятая хрупкой составляющей; F_0 —полная площадь излома. Вязкая составляющая вычисляется по формуле $B = 100 - X$, %.

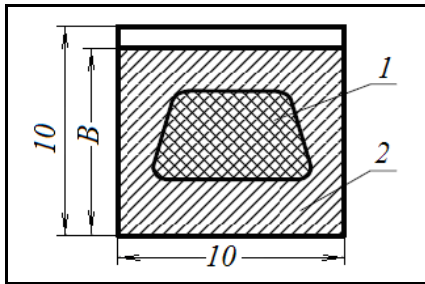


Рис. 12. Схема смешанного излома:
1— площадь, занимаемая хрупкой составляющей;
2— площадь, занимаемая вязкой составляющей

На макроструктуре изломов, полученных после испытания образцов на ударную вязкость, можно наблюдать шиферный (слоистый) излом. Показанный на рис. 13 излом имеет грубоволок-

нистое строение и с полным отсутствием вязкой составляющей, что свидетельствует о хрупком характере разрушения.



Рис. 13. Шиферный излом на образцах, после разрушения ударной нагрузкой

Типичные изломы образцов после ударного излома приведены в приложении 1.

Часть 2. Макроанализ по разрезу и шлифам

3.4. Изучение несплошностей³ в теле отливок по разрезу

Несплошности деталей чаще в заводских условиях определяются просвечиванием рентгеновскими лучами, ультразвуковым контролем, специальными испытаниями (давлением, керосиновой пробой и т. д.). Вместе с тем можно визуально обнаружить различные несплошности в теле литых, штампованных, термообработанных и сварных деталей по их разрезу. В теле отливки различают до 16 различных видов несплошностей. Однако наиболее типичными являются ниже приведённые дефекты⁴.

³ ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. –М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.– 11 с.

⁴ Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Чёрные сплавы. –М.: Машиностроение-1, 2005. – 330 с.

1. *Газовая раковина* – дефект в виде полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами. Она имеет гладкую чистую поверхность, закруглённую форму (рис. б) и имеет размеры до десятков миллиметров. Газовые раковины (пузыри) могут быть открытыми или закрытыми и могут располагаться в теле отливки (рис. 15, а), выходить на поверхность, скрываться под «коркой» вблизи поверхности (рис. 15, б), образуя подкорковые пузыри.

2. *Подкорковые пузыри* – вреднейшие пороки макроструктуры стали. Если их стенки окислены кислородом воздуха, то при прокатке они не завариваются и получается дефект поверхностного слоя под названием “волосовины”. Они вытягиваются в направлении горячей деформации и образуют прямые тонкие штрихи – трещины глубиной не более 1,5 мм и длиной от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Волосовины ослабляют наиболее ценные поверхностные слои металла и служат причиной образования закалочных трещин и изломов усталости

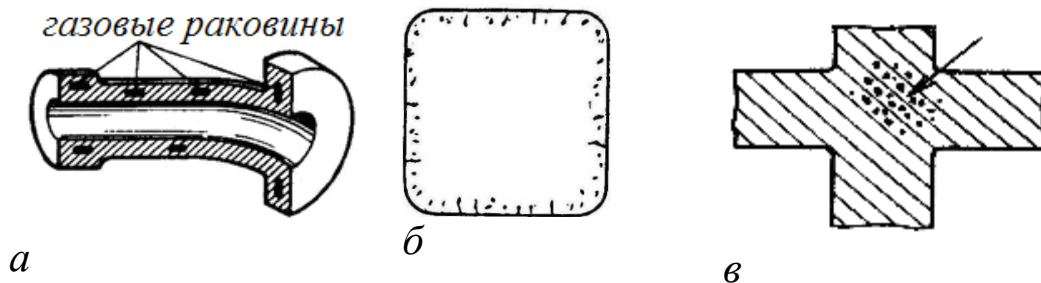


Рис. 15. Газовые раковины в отливках: а – в теле отливки; б – вблизи поверхности (подкорковые пузыри); в – усадочная пористость

3. *Усадочная пористость* – дефект в виде скопления мелких пор в тепловых узлах отливок, образовавшихся вследствие усадки при затвердевании из-за недостаточного подвода металла (рис. 15, в). Усадочная пористость уменьшает плотность, пластичность и коррозионную стойкость литого металла.

4. *Песчаная раковина* – дефект в виде полости, полностью или частично заполненной формовочным материалом (рис. 16, а).

5. *Усадочные раковины* – дефект в виде открытой или закрытой полости с грубой шероховатой иногда окисленной поверхностью, образовавшейся вследствие усадки при затвердевании сплава. Закрытые полости (рис. 16, б) образуются в тепловых узлах отливки. Открытые раковины имеют воронкообразную форму и образуются в верхней (головной) части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь. Другим методом₁₇ макроструктурного

исследования является изучение строения металлических материалов на специаль-ных макрошлифах.

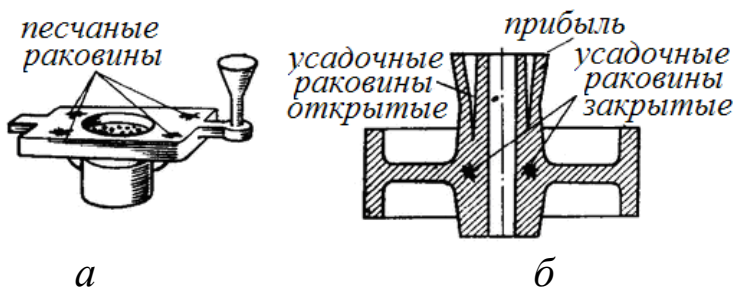


Рис. 16. Песчаные (а) и усадочные (б) раковины в отливках

3.5. Изучение макроструктуры по шлифам

Наиболее трудоемким, но и самым информативным методом макроанализа является изучение структуры и дефектов изделий с помощью макрошлифов.

3.5.1. Макрошлифы. Для изучения макроструктуры материалов из интересующего участка детали вырезается образец (темплет) толщиной не менее 15...25 мм, затем его шлифуют и тщательно полируют. После травления полированной поверхности темплета специальными растворами на ней удаётся обнаружить не вооружённым глазом особенности строения металла: кристаллическое или дендритное строение, волокнистость, зону термического влияния после сварки, а также различные дефекты в виде пор, трещин и др. Эти отклонения от однородности структуры протравливаются в разной степени благодаря различному строению, составу и дефектности структуры, что позволяет выявить их наличие, конфигурацию и размеры. Составы травителей, предназначенных для выявления различных дефектов и определения неоднородности структуры приведены в приложении 2.

Рассмотрим далее методы макроскопического анализа изделий, полученных литьем, пластическим деформированием и сваркой, с использованием шлифов.

3.5.2. Изучение несоответствия по структуре⁵ отливок. Кристаллы (зерна) литого металла имеют в основном древовидную или разветвленную форму. Такие кристаллы называют дендритами (рис. 17). Часто различают в отливках следующие несоответствия по структуре: половинчатость, ликвацию, отбел, флукены, структурная

⁵ ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. Введен в действие: 1981-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 36 с.

неоднородность.

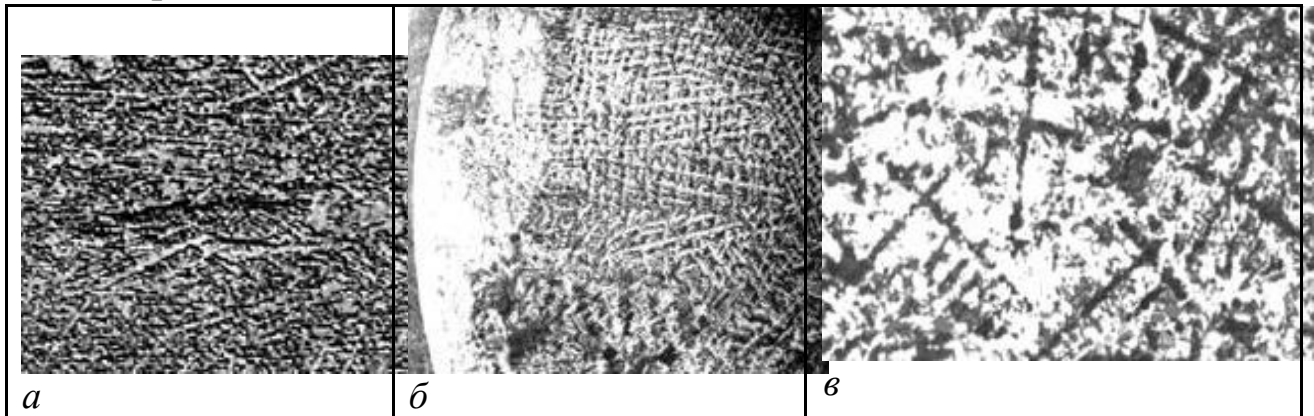


Рис. 17. Макроструктура литого металла. Дендритное строение: *а* – в теле отливки после глубокого травления; *б* – дендритная поверхность усадочной раковины без травления; *в* – дендритная структура стального проката после глубокого травления

Половинчатость – дефект в виде проявления структуры СЧ в отливках из белого чугуна. Кроме рассмотренных дефектов структуры, выявленных на макрошлифах, различают ещё структурную неоднородность материалов.

Ликвация – местные скопления химических элементов или соединений в теле отливки, возникшие в результате кристаллизации при затвердевании (рис. 18). Наиболее склонны к ликвации вредные примеси – сера и фосфор. В местах повышенной концентрации серы возникает краснеломкость, фосфора – хладнеломкость.

Отбел – дефект в виде твёрдых, трудно поддающихся механической обработке мест в различных частях отливки из СЧ, вызванных скоплением структурно свободного цементита.

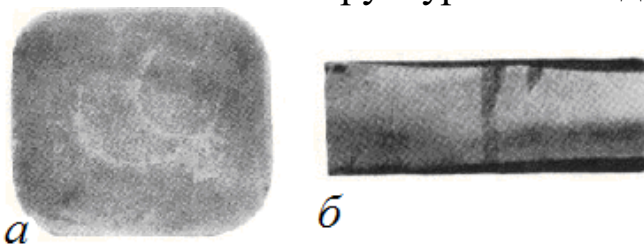


Рис. 18. Ликвация в отливках

Структурная неоднородность литых деталей выражается в наличии, как правило, трех зон кристаллизации:

- тонкой наружной зоны мелких равноосных кристаллов;
- зоны столбчатых кристаллов, занимающей обычно значительную часть объема слитка;
- внутренней зоны крупных равноосных произвольно ориентированных зерен.

3.5.3. Макроструктура горячедеформированной стали⁶. Детали машин получают резанием из отливок и поковок, полученных горячим деформированием или из пруткового проката. Главным отличительным признаком структуры деформированного металла является его волокнистое строение, которое не свойственно литому металлу. При обработке резанием детали из пруткового проката волокна перерезаются (рис. 19, *а*), что резко снижает прочность.



Рис. 19. Волокнистое строение металла: *а* – деталь, изготовленная резанием из проката; *б* – деталь, полученная из поковки

Конструкционная прочность⁷ повышается, если волокна огибают контур детали (рис. 19, *б*). Поэтому детали ответственного назначения, особенно работающие при высоких динамических нагрузках (коленчатые валы, шестерни, шатуны, клапаны, грузоподъёмные крюки), изготавливают резанием из поковок, стремясь, чтобы волокна не перерезались, а соответствовали конфигурации детали.

3.5.4. Макроструктура термообработанной стали. Вид излома также зависит от способа термической обработки деталей. По излому закалённых сталей можно установить их прокаливаемость – способность её закаливаться на определённую глубину. В закалённом поверхностном слое излом имеет очень мелкое зерно, он матовый. В незакалённой сердцевине детали строение излома грубое – крупнозернистое. На рис. 20 показаны макроструктура стальных деталей после высокочастотной закалки.

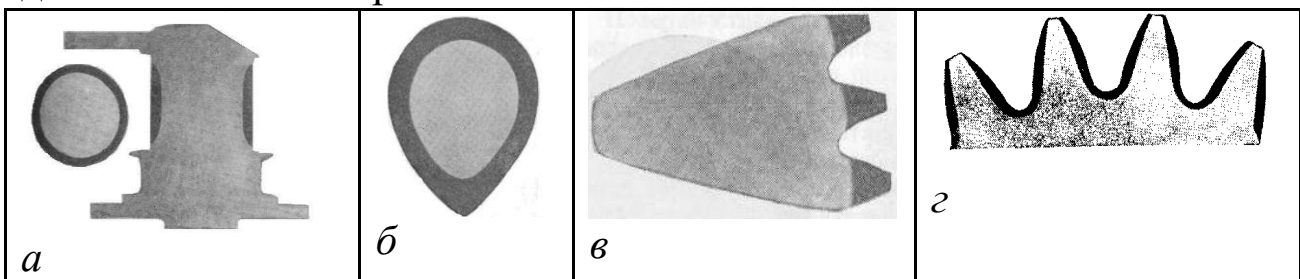


Рис. 20. Макроструктура стальных деталей после высокочастотной закалки: *а* – коленчатый вал; *б* – распределительный вал; *в, г* – зубчатое колесо

⁶ Ю.А. Титов, А.Ю. Титов. Контроль качества поковок: Уч. пособие. – Ульяновск, Ул. ГТУ, 2008. – 68 с.

⁷ Комплекс механических свойств, обеспечивающих надёжную и длительную работу материала в условиях эксплуатации

При макроанализе также можно определить толщину закаленного (или цементованного) слоя.

Часть 3. Макроанализ сварных соединений

3.4. Дефекты, выявляемые по макроструктуре сварных соединений⁸

В процессе образования сварного соединения в металле шва и зонах термического влияния могут возникнуть дефекты, которые могут явиться причиной преждевременного разрушения сварных конструкций. Дефекты сварных соединений по месту их расположения бывают внешними (см. лабораторный практикум № 6) и внутренними. Внутренние дефекты можно обнаружить по макроструктуре сварного шва. Макроструктура изучается на темплетях, вырезанных поперек сварного шва. Контролируемая поверхность должна включать сечение шва с зонами термического влияния и прилегающими к ним участками основного металла. К дефектам макроструктуры, выявляемым при визуальном контроле относятся непровары, газовые поры, шлаковые включения, трещины.

Непроваром называют местное несплавление основного металла с наплавленным сварочным швом, а также несплавление между собой отдельных слоев шва при многослойной сварке из-за наличия тонкой прослойки окислов, а иногда и грубой шлаковой прослойки внутри швов (рис. 21).

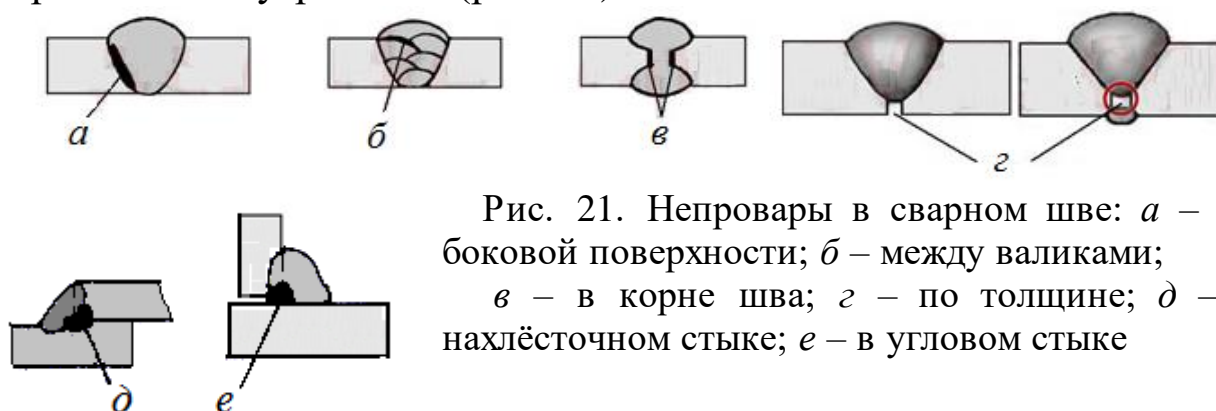


Рис. 21. Непровары в сварном шве: *a* – по боковой поверхности; *б* – между валиками; *в* – в корне шва; *г* – по толщине; *д* – в нахлесточном стыке; *е* – в угловом стыке

Основными причинами непроваров являются плохая очистка металла от окалины, ржавчины и грязи, недостаточная величина

⁸ В.А. Троицкий, М.И. Валевич. Неразрушающий контроль сварных соединений. -М.: Машиностроение, 1988. –112 с.

тока (плохой разогрев), большая скорость сварки, смещение электрода в сторону от оси шва. Непровары и трещины являются наиболее опасными дефектами сварных швов. Они возникают в самом шве и в околошовной зоне, располагаясь вдоль и поперек шва в виде несплошностей микро - и макроскопических размеров.

Газовыми порами называют заполненные газом полости в швах, имеющие округлую, вытянутую или более сложную форму. Они образуются в сварных швах вследствие быстрого затвердевания газо-насыщенного расплавленного металла, при котором выделяющиеся газы не успевают выйти в атмосферу.

Газовые поры могут быть распределены в шве отдельными группами (рис. 22, а, б), в виде цепочки вдоль шва (рис. 22, в). Иногда в сварном шве образуются поры в виде воронкообразного или трубчатого углубления, так называемые *свищи* (рис. 22, г). Они

возникают при первичной кристаллизации металла сварочной ванны в результате выделения газов.

Поры – недопустимый дефект сварных швов для изделий, работающих под давлением и под вакуумом или сосудов, предназначенных для хранения и транспортировки жидких и газообразных продуктов. Для других конструкций поры не являются столь серьезным дефектом по сравнению с трещиной. Однако наличие пор при всех условиях нежелательно. Вопрос о допустимости пор решается в зависимости от условий эксплуатации сварных изделий.



Шлаковые включения – это полости в металле сварного шва, заполненные шлаками, не успевшими всплыть на поверхность шва при сварке (рис. 23). Причинами их возникновения могут быть небрежная очистка кромок деталей от окалины, ржавчины

и грязи, а также (при многослойной сварке) неполного удаления шлака с предыдущих слоев. Кроме того, они возникают при сварке длинной дугой, не правильном наклоне электрода, недостаточной величине сварочного тока, завышенной скорости сварки.

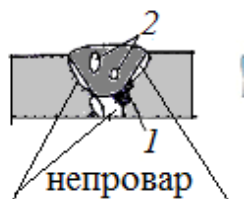


Рис. 23. Дефекты в сварном шве:
1 – шлаковые включения; 2 – поры

Размеры шлаковых включений различной формы могут достигать нескольких десятков миллиметров по длине шва. Поэтому эти дефекты более опасны, чем поры. Они могут быть расположены в корне шва между отдельными слоями, а также внутри наплавленного металла. Шлаковые включения, так же как и газовые поры, ослабляют сечение шва, уменьшают его прочность и являются зонами концентрации напряжений.

4. Практическая часть

4.1. Приборы и материалы: лупы, коллекция макрошлифов и изломов, набор фотографий макроструктур⁹.

4.2. Практические задания

Задание 1. По усталостным изломам установить зоны разрушений (рис. 24).

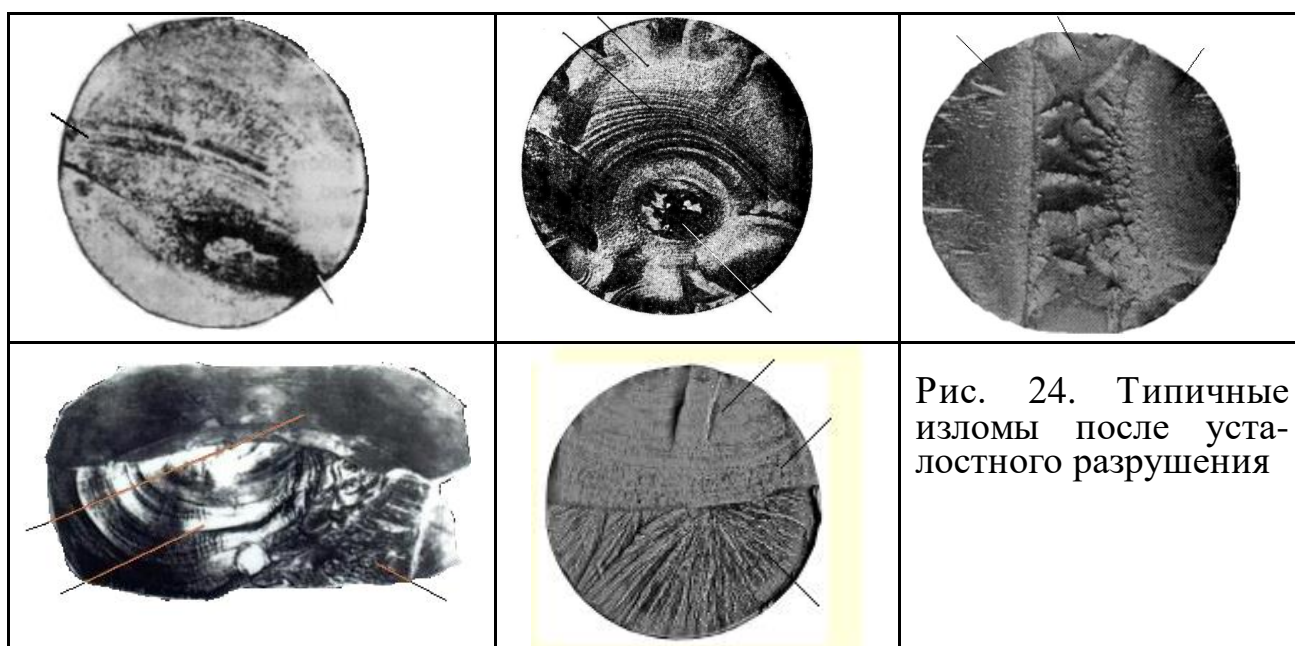


Рис. 24. Типичные изломы после усталостного разрушения

⁹ использованы материалы, предоставленные сотрудниками ЦЗЛ Нефтекамского завода нефтяного оборудования

Обозначить на рисунке буквами *А, Б, В* очаг разрушения, зоны медленного (усталости) и мгновенного разрушения (долома).

Задание 2. Установить характер разрушения по излому на представленных образцах (рис. 25).

Задание 3. Выявить, зарисовать и описать структуру литых деталей, подвергнутых глубокому травлению с их характерными дефектами макроструктуры.

Задание 4. Изучить макрошлифы деталей, полученных пластическим деформированием. Зарисовать эскиз волокнистой структуры ковальной детали.

Задание 5. Изучить и зарисовать макроструктуру стального слитка и образцов алюминиевых сплавов, отлитых в земляную форму, в кокиль. По комплекту образцов (деталей) установить способ изготовления детали (штамповкой, резанием, литьём), выявить наружные дефекты методом внешнего осмотра и дать в протоколе описание.

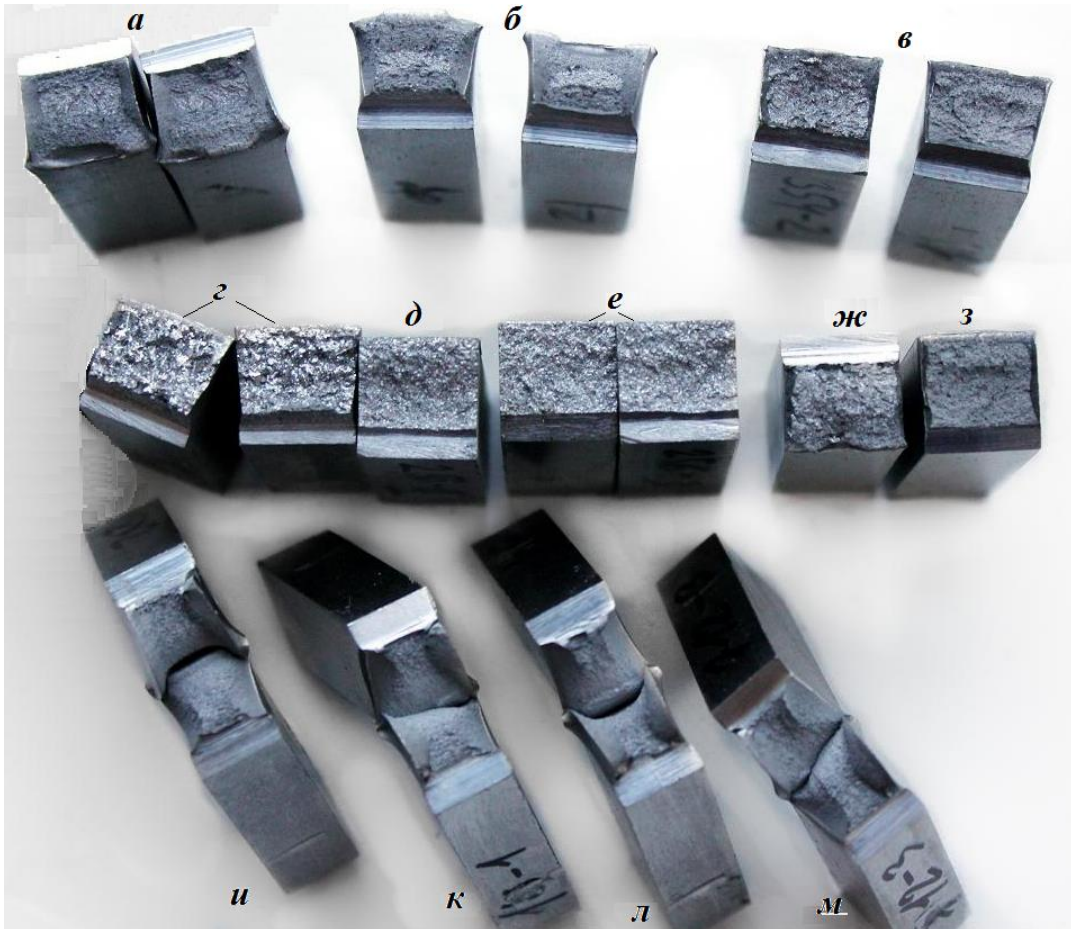


Рис. 25. Изломы образцов после ударных испытаний

Задание 6.

Исследовать качество сварного соединения представленных сварных узлов (рис. 26), выявить в них зоны термического влияния (более темная узкая зона) и₂₄ установить наличие дефектов.

Зарисовать в отчёте макроструктуру с указанием характерных зон и дефектов. Дать заключение о качестве сварных соединений.



Рис. 26. Сварные соединения для изучения
Сформулировать выводы по работе и оформить отчет.

5. Критерии результативности работы

Работа считается выполненной в том случае, если студент:

- 1) научился правильно анализировать дефекты изделий и виды разрушения по их излому;
- 2) результаты выполненной работы представлены в соответствии с требованиями к составлению отчёта;
- 3) правильно ответил на все контрольные вопросы.

6. Требования к оформлению и содержанию отчета

Итоги проведенной работы следует оформить в отчете, который должен содержать следующие разделы:

- название работы;
- цель работы;
- основные сведения о макроструктурном анализе;
- последовательность выполнения практической части работы с приведением изучаемых структур по заданию и их описание;
- выводы по работе.

В конце занятия при защите работы преподаватель путем устного опроса проверяет усвоение знаний студентами по контрольным вопросам.

7. Контрольные вопросы

1. В чем заключается ₂₅ макроскопический анализ?

2. Что называется макроструктурой?
3. Для чего предназначен макроанализ?
4. Какие разновидности макроструктурного анализа Вы знаете?
5. Какие виды разрушения по степени участия пластической деформации Вы знаете? Назовите причины их возникновения?
6. Что называется изломом?
7. Какие виды изломов материалов встречаются? Опишите их.
8. Чем отличается вязкое разрушение от хрупкого? Какое из них является более опасным?
9. Какие несплошности можно обнаружить в литых деталях?
10. Какие дефекты (несоответствия) литой структуры изучаются макроанализом?
11. Какие характерные особенности структуры деформированного материала можно обнаружить по макроструктуре?
12. После какой обработки можно получить волокнистую структуру?
13. Какие дефекты (несоответствия) литой структуры изучаются макроанализом?
14. Какие изменения литой структуры происходят при обработке давлением?
15. Какие дефекты выявляются макроструктурным анализом в сварных изделиях?
16. Чем опасны поры в сварных соединениях и допустимы ли они?
17. Чем опасны поры в сварных соединениях?
18. Какие причины вызывают образование горячих и холодных трещин в сварных соединениях?
19. Как образуются шлаковые включения в сварных соединениях, какую они имеют форму, размеры и как они располагаются в сварном шве?
20. Что характеризует вязкая составляющая в изломе ударных образцов и как она определяется?
21. Какое строение имеет поверхность разрушения в случаях нафталинистого и шиферного изломов?
22. Какие зоны имеет поверхность разрушения в случае усталостного излома вала?

Список литературы

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение и термическая обработка металлов: Учебник для вузов. 5 – е изд., перераб. и доп. – М.: ООО ТИД «Аз - book», 2009. – 447 с.
2. Материаловедение: Учебник для вузов // Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648 с.

Состав травителей для макроанализа

Для выявления крупных дефектов (макротрещины, газовые пузыри, раковины поры, сульфидные и нитридные включения), выходящих на поверхность, макрошлиф подвергают поверхностному (неглубокому) травлению с применением соответствующего реактива (чаще всего реактива Гейна: NH_4Cl – 53 г и CuCl_2 – 85 г на 1000 мл воды; $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ $\tau=0,5\dots1$ мин). При погружении макрошлифа в реактив дефектные места разъедаются и приобретают более темную окраску, что способствует их выявлению.

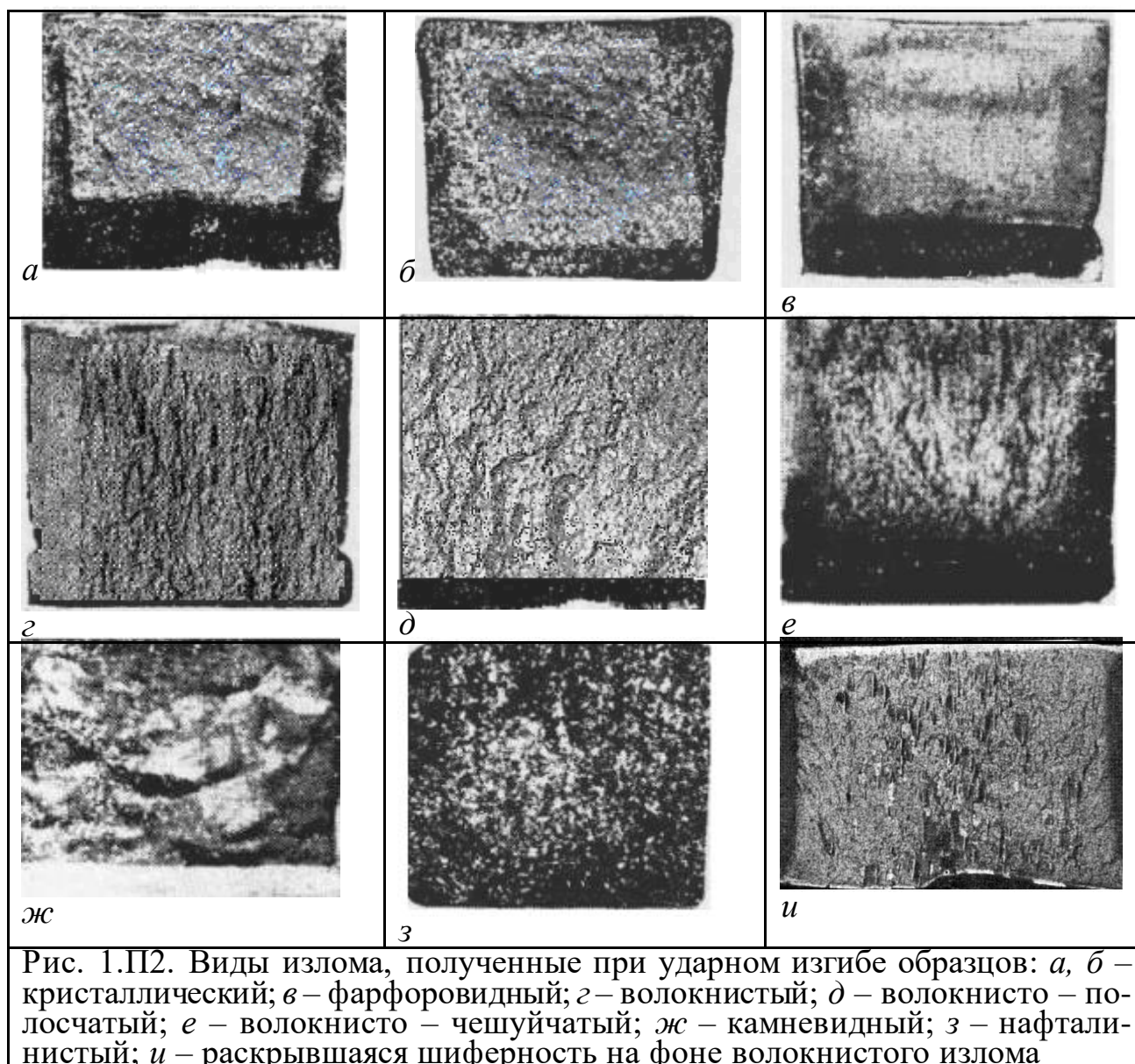
Для выявления мелких дефектов, расположенных на некоторой глубине от поверхности макрошлифа, нарушающих сплошность материала, применяют реактивы глубокого травления (например, 50 % HCl в воде; $t=60\dots70\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau=15\dots40$ мин).

Для выявления неоднородности состава и структуры материала в результате термической или химико-термической обработки, а также для обнаружения глубины закаленного слоя (рис.4) макрошлиф подвергают химическому травлению 50-процентным раствором HCl в воде в течении 3...5 минут при температуре 70...80 $^\circ\text{C}$. В процессе такой обработки часть поверхностей шлифа, где расположена зона, подвергшаяся закалке, приобретает более темную окраску.

Для выявления толщины поверхностного слоя детали, подвергшегося науглероживанию в процессе цементации, макрошлиф обрабатывают погружением на 1...2 минуты в реактив следующего состава: 2 г $\text{CuCl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ и 1 мл HCl на 100 мл этилового спирта. При этом науглероженный поверхностный слой не изменяется, нецементованная сердцевина окрашивается красным налетом меди.

Для выявления шиферного излома рекомендуется реактив Обергоффера: 3 мл концентрированной HCl , 0,2 мл CuCl_2 , 3 гр FeCl_2 , 0,1 гр SnCl_2 , по 100 мл спирта и воды.

Для выявления макроструктуры стального сварного соединения макрошлиф травят в 15 %-ном растворе персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ в течение 5...8 сек. После травления шлиф тщательно промывают для удаления с поверхности сажистого налета. Выявляются на макрошлифе структура наплавленного металла шва, зона термического влияния, поры, непровары.



Излом с раскрывшейся шиферностью (рис. 1.П2, *и*) характеризуется короткими расщеплениями в поверхностной зоне, образующимися в процессе деформации металла при поломке пробы или образца. Каждое расщепление имеет двустороннюю утяжку (сужение).

Тесты для самоконтроля (могут быть несколько правильных ответов)

Вопросы	Ответы
1	2
1.1. Макроструктура – это:	1) строение металла, видимое невооруженным глазом или с помощью лупы; 2) строение металла, изучаемое с помощью микроскопа; 3) специально изготовленный образец металла; 4) строение металла, изучаемое с помощью лупы
1.2. Макроанализ применяется для:	1) выявления дендритов и ликвации; 2) выбора участка детали для окончательного исследования микроструктуры под микроскопом; 3) установления волокнистой структуры; 4) для визуального выявления дефектов деталей; 5) все ответы правильные
1.3. Макроанализ основан на:	1) внешнем осмотре деталей; 2) установлении дефектов сварки; 3) изучении изломов и разрезов; 4) анализе макроструктуры; 5) все ответы правильные
1.4. Излом – это:	1) поверхность, образованная после разрушения детали или специального образца; 2) часть разрушенной детали; 3) специально вырезанная часть разрушенной детали; 4) отполированная и протравленная поверхность детали, подлежащая детальному изучению; 5) все ответы правильные
1.5. Разрушение деталей в зависимости от степени пластической деформации может быть:	1) вязким; 2) хрупким; 3) усталостным; 4) смешанным; 5) все ответы правильные

1	2
1.6. Интеркристаллитным называется разрушение детали:	1) по макротрещинам; 2) по телу зерна; 3) по поверхности детали; 4) по границам зёрен; 5) все ответы правильные
1.7. Транскристаллитным называется разрушение детали	1) по границам зёрен; 2) по телу зерна; 3) по поверхности детали; 4) по готовым макротрещинам; 5) все ответы правильные
1.8. По внешнему виду изломы делятся:	1) вязкий, матовый; 2) хрупкий, светлый; 3) дендритный, шиферный; 4) усталостный; 5) все ответы правильные
1.9. Вязкий излом характеризуется:	1) волокнистым строением с мелкими уступами в виде ямок; 2) волнообразным рельефом с чередующимися впадинами и выступами; 3) ячеистым строением с характерными чётко выраженными границами ячеек; 4) ступенчатым рельефом; 5) все ответы правильные
1.10. Хрупкий излом по виду бывает:	1) камневидным; 2) крупно – и мелкокристаллическим; 3) нафталинистым; 4) форфоровидным; 5) все ответы правильные
1.11. Усталостный излом образуется:	1) кратковременным действием значительных нагрузок; 2) длительным действием постоянной нагрузки; 3) циклическим воздействием растягивающих и сжимающих нагрузок; 4) при эксплуатации деталей при высоких температурах со значительной нагрузкой; 5) все ответы правильные

1	2
1.12. Усталостный излом имеет зоны:	1) очага разрушения; 2) усталостного разрушения; 3) долома; 4) все ответы правильные
1.13. Ликвацией называется	1) разнотернистость; 2) местные скопления химических элементов или соединений в теле отливки; 3) многокомпонентность; 4) анизотропия свойств
1.14. Газовые раковины – это дефект в виде:	1) полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами; 2) скопления мелких усадочных раковин; 3) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании; 4) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате усадки металла при его затвердевании
1.15. Газовая пористость – это дефект в виде:	1) полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами; 2) скопления мелких усадочных раковин; 3) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании; 4) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате усадки металла при его затвердевании
1.16. Волокнистое строение поковок, волокна которых располагаются по их профилю, обеспечивает:	1) обрабатываемость резанием; 2) высокую конструкционную прочность; 3) высокие упругие свойства и плохую свариваемость; 4) измельчение структуры и высокую прочность

1	2
1.17. По структурному признаку различают следующие виды разрушения:	1) транскристаллитное; 2) интеркристаллитное; 3) шиферное; 4) дендритное; 5) все ответы правильные
1.18. Песчаные раковины – дефект в виде:	1) полости, полностью или частично заполненной формовочной смесью; 2) полости, полностью или частично заполненной шлаком; 3) частичного заполнения формы формовочной смесью; 4) частичного заполнения формы шлаком
1.19. Усадочная пористость – это дефект в виде:	1) полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами; 2) скопления мелких усадочных раковин; 3) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании; 4) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате усадки металла при его затвердевании
1.20. Газовые поры располагаются в сварном шве:	1) неупорядоченно; 2) ближе к поверхности отдельными группами; 3) скученно посередине шва; 4) равномерно по сечению шва или отдельными группами
1.21. Отбел – дефект:	1) в виде твёрдых труднообрабатываемых скоплений цементита в структуре СЧ; 2) образования белых пятен на поверхности чугунных деталей из-за сильного перегрева при заливке; 3) в виде скоплений свободного углерода, образованного в структуре чугунов при затвердевании отливки; 4) термической обработки чугунных отливок

1	2
1.22. Структурная неоднородность отливок:	<p>1) присутствие в структуре отливках наружной зоны мелких равноосных кристаллов, внутренней зоны столбчатых кристаллов и внутренней зоны равноосных произвольно ориентированных зерен; 2) структура отливок, состоящая только из дендритов с химической неоднородностью;</p> <p>3) разнотельная структура в отливках; 4) все ответы правильны</p>
1.23. Шлаковые включения – это:	<p>1) полости в металле сварного шва, заполненные шлаками;</p> <p>2) трещины в сварном шве, заполненные расплавленными продуктами покрытия электрода;</p> <p>3) поры в сварном шве, заполненные шлаком;</p> <p>4) заполненные газом и шлаком поры в сварном шве</p>
1.24. Непровар – это:	<p>1) несплавление основного металла с наплавленным или отдельных слоёв при многослойной сварке;</p> <p>2) брак сварочного процесса в виде надреза отдельных участков сварного шва; 3) неполное формирование валика сварного шва из-за недостаточного прогрева места сварки;</p> <p>4) все ответы правильны</p>
1.25. Усадочная раковина – это дефект в виде:	<p>1) открытой или закрытой полости с окисленной грубой шероховатой поверхностью, образовавшейся в результате усадки при затвердевании отливки; 2) полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами;</p> <p>3) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате усадки металла при его затвердевании; 4) мелких пор, образовавшихся в отливке в результате усадки металла при его затвердевании</p>

Альбом макроструктур

Волокнистый излом

Матовый, волокнистый излом (рис.5) освидетельствует о вязком разрушении, при котором материал, обладая достаточной пластичностью, хорошо сопротивляется развитию в нем трещин. Следовательно, деталь разрушается не из-за охрупчивания материала, а, например, вследствие больших перегрузок или из-за наличия в материале крупных неметаллических включений и т. п.

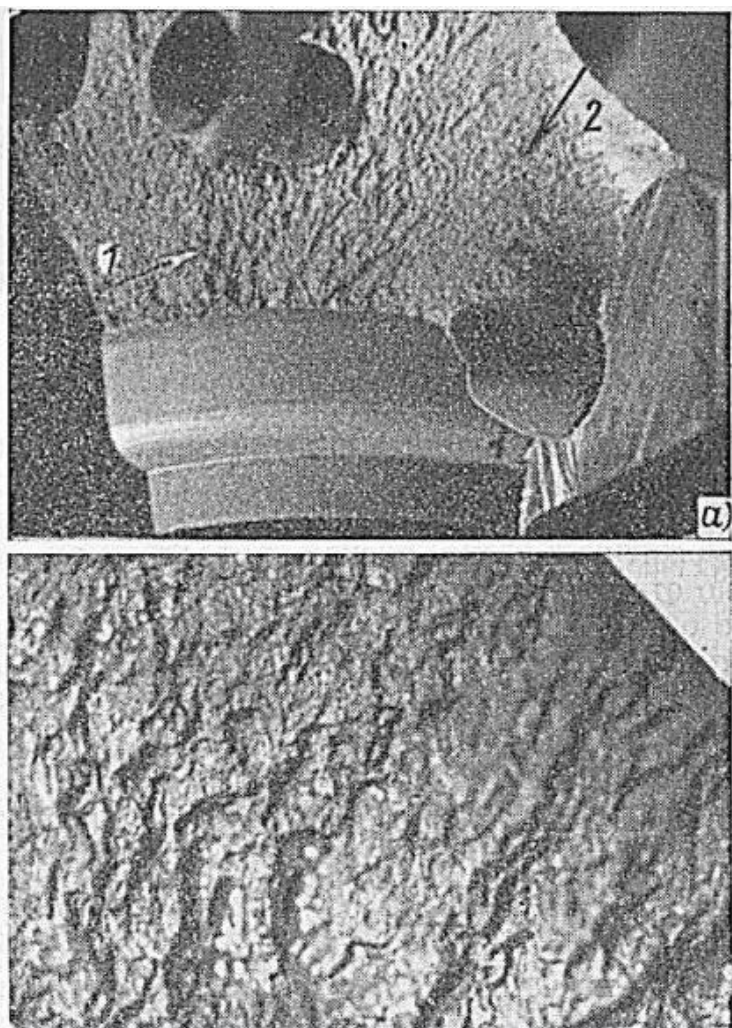


Рис.5. Поверхности вязких изломов

Блестящий вид и кристаллическое строение излома (рис.6) свидетельствует о хрупком разрушении, при котором материал из-за потери пластичности (например, вследствие чрезмерного его упрочнения или за счет снижения температуры) плохо сопротивляется распространению в нем трещины.

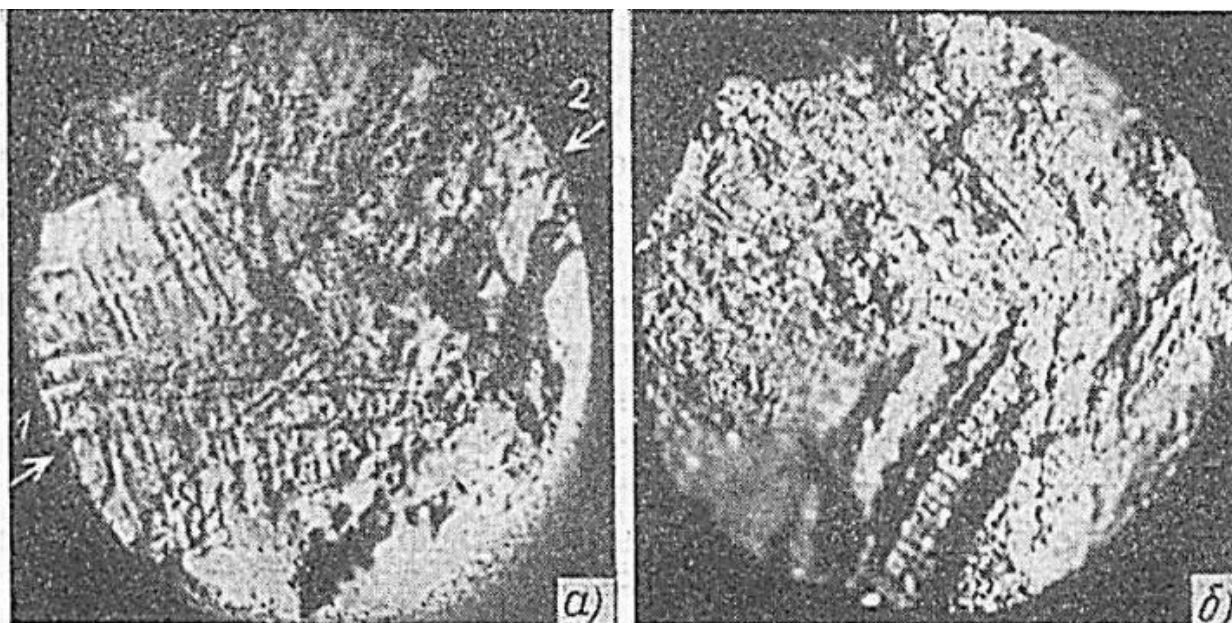


Рис.6. Поверхности хрупких изломов

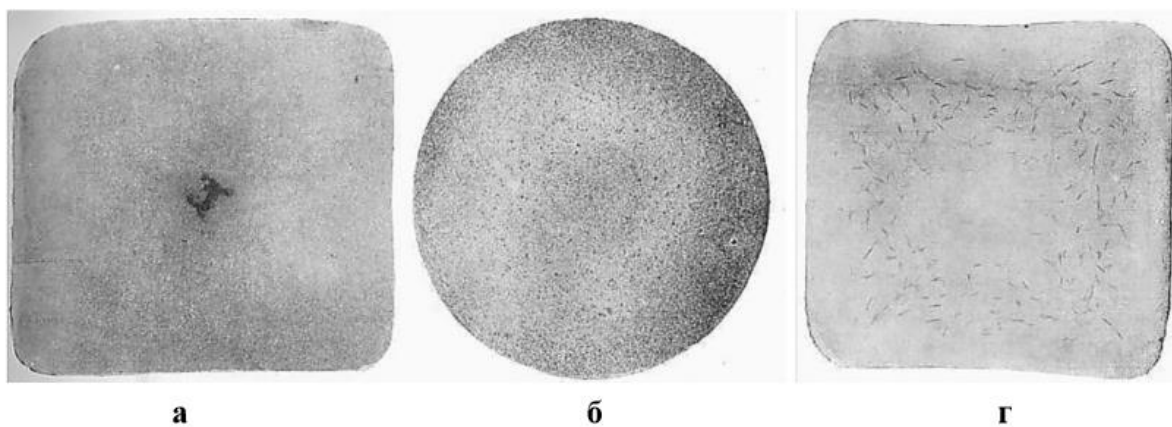


Рис.3 Пороки макроструктуры стали: остатки усадочной раковины (а), общая пористость (б) и флокены (в).

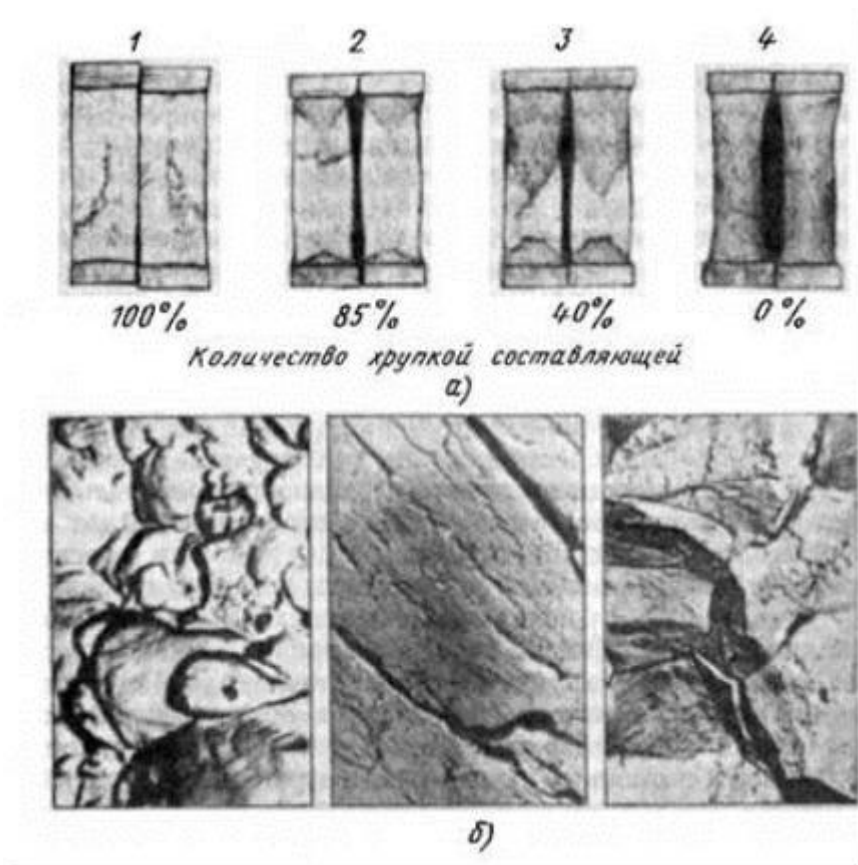


Рис. 56. Изломы стали: а — виды излома; 1 — хрупкий; 2 и 3 — вмешанные; 4 — вязкий; б микрофрактограммы (слева направо) вязкого (чашечный), хрупкого (ручьистый), интеркристаллитного хрупкого изломов (Х6000)