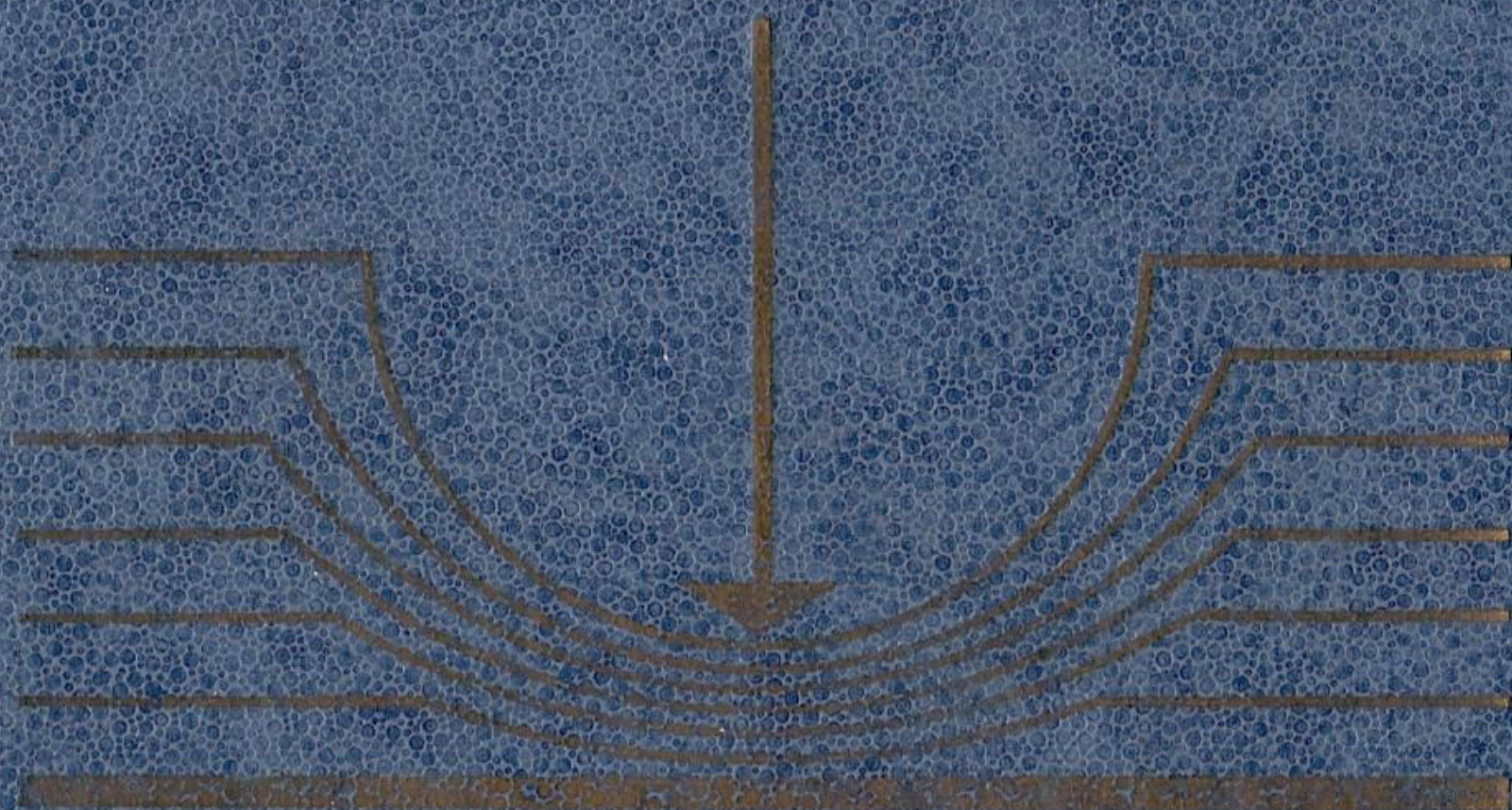


П. П. Костин

ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
ИСПЫТАНИЯ
металлов,
сплавов
и неметаллических
материалов



П. П. Костин

ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
ИСПЫТАНИЯ
металлов,
сплавов
и неметаллических
материалов

*Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебного пособия
для профессионально-технических училищ*



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1990

ББК 34.43я723

К72

УДК 620.178.154.8 : [539.374 + 539.4](075.32)

Рецензенты **Е. П. Солныков** и **М. В. Дозорцев**

Костин П. П.

К72 Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: Учеб. пособие для профессионально-технических училищ. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.: ил.

ISBN 5-217-00830-X

Изложены основы теории прочности и пластичности металлов и сплавов. Рассмотрены устройство, принцип действия и правила эксплуатации приборов и оборудования для проведения испытаний. Приведены математические основы обработки результатов измерений. Учебное пособие может быть использовано при подготовке рабочих на производстве.

К $\frac{2702000000-200}{038(01)-90}$ 200—90

ББК 34.43я723

ISBN 5-217-00830-X

© П. П. Костин, 1990

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ, ПРОТИВОПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ САНИТАРИЯ

1.1. Основные сведения по технике безопасности

Всесоюзный Центральный Совет Профессиональных Союзов (ВЦСПС) СССР устанавливает нормы и правила по технике безопасности труда и производственной санитарии, которые обязательны для каждой отрасли производства, участвует в разработке законодательных актов, регламентирующих режимы рабочего времени, отдыха и отпусков трудящихся, а также вопросы охраны труда подростков и женщин, нормы выдачи спецпитания и спецодежды.

В системе мероприятий по охране труда основное значение имеют мероприятия по технике безопасности, позволяющие обеспечить безопасные условия труда рабочих, устранить причины производственного травматизма.

Травмы бывают производственные и бытовые.

Под производственной травмой понимают повреждения, являющиеся результатом электрических, механических, химических, радиационных и других воздействий на организм человека при выполнении им производственного задания. Травмы, полученные в домашней обстановке и не связанные с работой на производстве, относятся к бытовым травмам.

К производственным травмам относятся: ушибы, порезы, переломы, электрические удары, электрические ожоги, металлизация кожи при ожогах, отравление газом, радиоактивное облучение и т. д. Производственные травмы могут быть получены от движущихся частей станков, от обрабатываемых деталей, от инструментов и приспособлений, от осколков испытываемых деталей и от перемещающихся грузов.

Производственные травмы могут быть также результатом загроможденности рабочих мест и проходов заготовками, деталями и полуфабрикатами, нарушения нормального хода технологического процесса, отсутствия или неисправного состояния средств индивидуальной защиты (спецодежды, рукавиц, очков, щитков, шумозащитных наушников и др.), отсутствия или недостаточного инструктажа рабочих по вопросам безопасных методов работы на оборудовании. Производственные травмы рабочие получают вследствие нарушения правил техники безопасности.

Знание правил техники безопасности является обязательным для всех трудящихся профессионального труда в СССР.

Руководство и контроль за соблюдением правил техники безопасности осуществляет главный инженер предприятия. Правильное и своевременное проведение инструктажа по безопасности труда и производственной санитарии обеспечивается руководителем предприятия или подразделения предприятия (цеха, лаборатории, участка).

Инструктаж по технике безопасности проводят как для вновь поступающих, так и для всех работающих на основе правил и инструкций по охране труда с учетом конкретных условий производства. Инструктаж может быть двух видов: вводный, который знакомит рабочих с общими правилами техники безопасности; инструктаж на рабочих местах, проводимый мастером цеха, участка; такой инструктаж в свою очередь делится на первичный, повторный и внеочередной.

Контроль за своевременным и качественным проведением инструктажа и обучением работающих безопасным приемам и методам работы проводит инженер по технике безопасности предприятия вместе с руководством подразделения предприятия (цеха, лаборатории и др.).

Если рабочий не выполняет правила и инструкции по безопасности труда, он считается нарушителем производственной дисциплины и привлекается к ответственности согласно правилам внутреннего трудового распорядка предприятия.

Для работающих на оборудовании, эксплуатация которого связана с повышенной опасностью (например, для персонала, обслуживающего котельные установки, электрические устройства, испытательное оборудование, грузоподъемные машины, сосуды под давлением, рентгеновские установки и т. д.), кроме типовых разработаны специальные правила и инструкции по эксплуатации такого оборудования.

Разрешается работать на оборудовании только лицам, допущенным к работе на этом оборудовании и выполняющим работу, порученную им администрацией цеха.

Запрещается доверять оборудование другому рабочему без разрешения руководителя цеха. Запрещается опираться и облакачиваться на оборудование во время его работы и позволять делать это посторонним лицам. О любом несчастном случае необходимо немедленно сообщить руководителю подразделения и срочно обратиться в медицинский пункт предприятия.

При ремонте станка или пускового устройства необходимо вывесить предупредительный знак «Не включать — ремонт».

Строго запрещается работать на неисправном и не имеющем необходимых ограждений оборудовании, особенно на испытательном, и производить ремонт оборудования самостоятельно без службы главного механика.

Обрабатываемую (испытуемую) деталь необходимо надежно и жестко закрепить, при этом надо помнить, что масса и габариты детали должны соответствовать паспортным данным применяемого оборудования.

Разрешается устанавливать и снимать вручную только детали массой не более 16 кг; для остальных — более 16 кг — необходимо использовать специальные подъемные механизмы. Работать на специальных подъемных механизмах разрешается рабочему после обучения и аттестации.

Рабочие места должны быть освещены в соответствии с установленной нормой. Местное освещение должно быть отрегулировано так, чтобы оно достаточно освещало рабочую зону и в то же время не слепило глаза. При внезапном отключении общей системы снабжения электроэнергией необходимо немедленно отключить электрооборудование станка.

Предупредительные меры по безопасности труда:

1) содержать в чистоте рабочее место в течение всего рабочего времени, не загромождать его заготовками, деталями, металлическими отходами и т. п.;

2) обязательно пользоваться спецодеждой, спецобувью и индивидуальными защитными средствами (респиратор, маска, защитные очки, наушники и т. д.);

3) при обнаружении возможной опасности предупредить товарищей и срочно сообщить руководству подразделения предприятия;

4) при закреплении и снятии детали использовать только исправный слесарно-монтажный инструмент соответствующего размера (гаечные ключи, отвертки, кусачки, бокорезы и т. д.);

5) нельзя мыть руки в эмульсии, керосине, масле, кислоте и вытирать руки обтирочными концами, загрязненными стружкой;

6) нельзя оставлять спецодежду на рабочем месте.

Перед включением оборудования необходимо убедиться, что запуск станка безопасен для окружающих. Привести в порядок рабочую одежду: застегнуть или подвязать обшлага рукавов, надеть головной убор; женщины должны убрать волосы под косынку, подвязанную без свисания концов. При приемке станка у сменщика необходимо проверить, как произведена уборка станка и рабочего места, ознакомиться с имевшимися в предыдущей смене неполадками в работе станка и с принятыми мерами по их устранению. Кроме того, необходимо проверить ограждение участка станка, на которых имеются открытые зубчатые, цепные и ременные передачи, а также проверить исправность токопроводящих частей электроаппаратуры, проверить заземляющие и предохранительные устройства и узлы для крепления инструментов.

Кроме знания общих правил и мероприятий по безопасности труда, лаборанту по физико-механическим испытаниям необходимо изучить меры по безопасности работы на установках с вы-

соким напряжением. Основными причинами несчастных случаев от поражения электрическим током при работе на высоковольтных установках являются:

а) случайное прикосновение к токопроводящим частям, находящимся под напряжением, в результате производства работ вблизи или непосредственно на частях, находящихся под напряжением; неисправность защитных средств, которыми пострадавший прикасался к токопроводящим частям; ошибка пострадавшего, принявшего части станка, находящиеся под напряжением, за отключенные;

б) возникновение напряжения на металлических корпусах ограждения и частях электрооборудования в результате повреждения изоляции токопроводящих частей электрооборудования; падение электропровода, находящегося под напряжением, и замыкание фазы на землю;

в) появление напряжения на отключенных токопроводящих частях, на которых проводится работа, в результате ошибочного включения под напряжение отключенной установки; появление напряжения от соседних электроустановок, которые находятся в работе; замыкание между отключенными и находящимися под напряжением токоведущими частями и т. д.; следует помнить, что ток силой 10—15 мА (при 50 Гц) вызывает сильные и болезненные судороги мышц рук.

Для защиты от поражения электрическим током необходимо провести следующие мероприятия:

1) обеспечить недоступность токопроводящих частей, находящихся под напряжением, для случайного прикосновения человека;

2) ликвидировать возможность поражения при появлении напряжения в частях электрооборудования, т. е. осуществить одно из следующих мероприятий: применить защитное заземление, зануление, защитное отключение, использовать малые напряжения, защитное разделение сетей, двойную изоляцию, выравнивание потенциала;

3) обеспечить безопасную эксплуатацию электроустановок; применять специальные защитные средства, т. е. использовать переносные приборы и устройства.

При работе на испытательных установках с ультразвуковыми излучателями необходимо знать и соблюдать специальные меры по безопасности труда.

Ультразвуковые колебания характеризуются уровнем звукового давления (дБ) и частотой (Гц). Допустимый уровень звукового давления на рабочих местах регламентирован ГОСТ 12.1.001—83 «Ультразвук. Общие требования безопасности».

Согласно ГОСТ 12.1.001—83 допустимые уровни звукового давления на рабочих местах составляют при средней частоте ультразвуковых полос 125 кГц — 80 дБ, при 16,0 кГц — 90 дБ,

при 20,0 кГц — 100 дБ, при 25,0 кГц — 105 дБ, 31,5—100,0 кГц — 110 дБ. Допустимые нормы звукового давления рассчитаны при воздействии ультразвука в течение восьмичасового рабочего дня.

При измерении характеристик ультразвукового оборудования используют комплект аппаратуры, в который входит анализатор мод. С5-2 или С5-3, конденсаторный микрофон мод. МК-6 и самописец уровня мод. Н-110 или акустический комплект № 7 фирмы РГТ (ГДР). Этот комплект позволяет производить измерения в диапазоне частот до 1000 кГц.

Снизить или устранить опасное воздействие ультразвука на организм рабочего можно:

- 1) применением звукоизолирующих защитных кожухов и экранов;
- 2) применением автоблокировки, т. е. автоматического отключения оборудования и приборов при выполнении вспомогательных операций;
- 3) звукоизоляцией помещения, где установлено оборудование;
- 4) применением оборудования с дистанционным управлением;
- 5) использованием против шумов (по ГОСТ 12.4.051—87).

Необходимы периодические медицинские осмотры лиц, работающих в условиях повышенного уровня звукового давления

1.2. Противопожарная безопасность

Противопожарная безопасность на предприятии должна обеспечиваться предупредительными мероприятиями и мероприятиями, ограничивающими распространение пожара в случае его возникновения.

К предупредительным противопожарным мероприятиям относят разработку технологического процесса, учитывающего требования пожарной безопасности, а также мероприятия организационно-технического плана, т. е. правильный монтаж электрооборудования, надежное хранение горюче-смазочных и легковоспламеняющихся материалов.

На основании общесоюзного законодательства по пожарной безопасности ответственность за обеспечение пожарной безопасности предприятия возлагается на руководителя и главного инженера предприятия.

За пожарную безопасность подразделений предприятия (цехов, участков, лабораторий и т. д.) отвечает руководитель данного подразделения, а в его отсутствие — лицо, исполняющее его обязанности.

С учетом типовых правил на каждом подразделении предприятия разрабатывают конкретные инструкции о мерах пожарной безопасности, утверждаемые руководителем предприятия. Эти инструкции должны быть вывешены на видных местах.

Соблюдение правил противопожарной безопасности является обязательным для работников данного предприятия. Каждый работающий на предприятии обязан изучить и строго соблюдать правила пожарной безопасности, не допускать действий, которые могут привести к пожару. Лица, виновные в нарушении инструкции по противопожарной безопасности, несут ответственность в дисциплинарном, административном или судебном порядке в зависимости от ущерба, нанесенного предприятию.

Рабочие, служащие и инженерно-технические работники проходят специальную противопожарную подготовку в системе производственного обучения, которая состоит из первичного и вторичного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму.

Первичный противопожарный инструктаж проводят для всех вновь принимаемых на работу.

Вторичный инструктаж проводят на рабочих местах ответственные за пожарную безопасность конкретного подразделения предприятия. Занятия по противопожарной безопасности проводятся по программе, утвержденной руководителем предприятия. По окончании изучения программы все слушатели сдают зачет.

Территорию предприятия необходимо всегда содержать в чистоте, систематически очищать от отходов производства. Проходы, выходы, коридоры, тамбуры и лестницы не разрешается загромождать различными предметами и оборудованием. Все двери эвакуационных выходов должны свободно открываться в направлении выхода из здания. Металлическую стружку и использованные обтирочные материалы по мере накопления необходимо убирать в металлические ящики с плотно закрывающимися крышками, а по окончании смены удалять их из производственных помещений.

Пожарные краны внутреннего противопожарного водопровода во всех помещениях должны быть оборудованы рукавами и стволами, установленными в специальные шкафы, которые пломбируют. Пожарные рукава должны быть сухими, правильно (без скручивания) скатаны и подсоединены к кранам и стволам. На дверце шкафа пожарного крана должны быть указаны: надпись «ПК», порядковый номер пожарного крана, а также номер телефона ближайшей пожарной части.

Первичные средства пожаротушения — лопаты, кирки, ведра и песок — должны быть размещены в производственных зданиях и на территории промышленного предприятия на специальных пожарных щитах, окрашенных в красный цвет.

1.3. Производственная санитария

На основании Положения о правах профсоюзного комитета предприятия, учреждения, организации необходим общественный контроль за выполнением администрацией предприятия

законодательства о труде, правил и норм техники безопасности и производственной санитарии. Такую работу осуществляет комиссия по охране труда и общественные инспекторы по охране труда. Комиссия по охране труда организуется из рабочих, служащих и инженерно-технических работников предприятия (цеха, участка).

Производственные помещения предприятия должны иметь установки для отопления и вентиляции, обеспечивающие метеорологические условия в соответствии с требованиями санитарных норм промышленных предприятий. На предприятиях организуются санитарно-промышленные лаборатории для контроля за метеорологическими условиями.

Производственные помещения предприятия, где при работе образуются пыль и газы, должны быть снабжены специальными вытяжными вентиляционными устройствами. Стекла световых проемов в цехах и участках необходимо протирать не реже двух раз в год, а осветительную арматуру и лампы очищать от загрязнений не реже двух раз в месяц. Пол на рабочих местах и в проходах следует содержать в чистоте, регулярно убирать отходы производства.

Для обеспечения нормальных условий работы оборудование должно быть оснащено противозумными устройствами, защитными кожухами от стружки и осколков металла. Выходы из цехов и главные проходы предприятия необходимо оборудовать аварийным освещением с подачей электропитания от отдельной электросети или аккумуляторных установок.

Санитарно-бытовые помещения предприятия должны быть снабжены информационными знаками, например: «Раздевалка», «Вода для питья», «Душ», «Туалет», «Курить запрещается». Кроме того, опасные зоны должны быть четко и ярко обозначены: «Внимание — высокое напряжение», «Внимание — поезд», «Внимание — опасная зона» и т. д.

Устройство и содержание производственных помещений регламентируется правилами СН245—71 «Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий» и СНиП II.09.04—87 «Административные и бытовые здания».

Контрольные вопросы

1. Назовите виды травм.
2. В чем заключаются меры по обеспечению безопасности труда?
3. Какие мероприятия по противопожарной безопасности относят к предупредительным?
4. Кто осуществляет контроль за производственной санитарией на предприятии?

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

2.1. Исходные металлические материалы.

Основные сведения о производстве металлов и сплавов

Исходным материалом для получения металлов и их сплавов является руда. В самородном виде в природе встречаются только химически стойкие металлы (золото, платина, серебро, медь). Остальные металлы в результате высокой химической активности встречаются в виде соединений (окислов, сульфидов, карбидов и др.), которые входят в состав сложных минералов. Эти минералы образуют горные породы. Горные породы, из которых получают тот или иной металл, называют рудами. Часть руды, в которой содержится металл, называется рудным минералом, а часть, не содержащая металл, — пустой породой.

Название руды соответствует названию основного металла в ней (алюминиевая, железная, никелевая и т. д.). Существуют в природе и полиметаллические (комплексные) руды, в которых содержатся разные металлы. В пустой породе встречаются чаще всего кремнезем (SiO_2), глинозем (Al_2O_3), известковые соединения (CaO , CaCO_3), магнезиальные соединения (MgO). Руды в зависимости от содержания основного металла бывают богатые и бедные. Богатые руды передают на переработку, а бедные подвергают обогащению, т. е. разделению рудных минералов и пустой породы путем флотации, магнитным, гравитационным, электрическим и иными способами. Обогащенная часть — концентрат идет в производство, а отходы не используются.

Производство черных и цветных металлов из руд состоит из двух этапов:

- 1) отделения минерала, содержащего металл, от породы;
- 2) извлечения металла из рудных минералов.

Процессы извлечения металла из рудных минералов разделяются на термометаллургические, гидрометаллургические, электрометаллургические, химико-металлургические.

Термометаллургический процесс основан на использовании тепловой энергии, получаемой при сжигании топлива и необходимой для протекания химических реакций в жидком расплаве. Используются восстановительная (доменный процесс) и окис-

лительная (производство стали) плавки. Дистилляция (перегонка) используется при производстве цветных металлов: цинка, магния, ртути и др.

Гидрометаллургический процесс базируется на выделении металлов из водных растворов. Он состоит из осаждения и выщелачивания.

Осаждение — это процесс перевода металла из растворов в водорастворимые соединения. Широко используется в производстве алюминия, вольфрама и других металлов.

Выщелачивание — это процесс избирательного растворения металлосодержащего компонента обрабатываемого материала. Используется при производстве цинка и меди.

Электрометаллургический процесс заключается в получении металлов и сплавов в электрических печах и при электролизе металлов из растворов солей. Этим способом получают алюминий, магний, медь, железо, марганец, никель, титан, ванадий.

Химико-металлургический процесс основан на использовании химических и металлургических процессов. Этот процесс используют для производства титана, никеля.

Порошковая металлургия — производство порошков, их пресование и спекание. Используется в основном при производстве антифрикционных и твердых сплавов.

Металлургические процессы классифицируют на первичные и вторичные. К первичным процессам относят выплавку металлов из руд, а ко вторичным — процессы, позволяющие получать чистый металл путем окисления примесей, которые находятся в передельных первичных плавках металла, и удаления этих примесей в виде отходов (шлаков).

Для производства чугунов используют термометаллургические первичные процессы, при которых извлечение металла из руды осуществляют при высокой температуре.

Чугун представляет собой сплав железа с углеродом, содержащий более 2 % углерода. Предельное содержание углерода в чугуне колеблется от 2,4 до 2,8 % для малоуглеродистых чугунов и до 4,5—5,0 % — для белых чугунов, а также для высокоуглеродистых чугунов.

В зависимости от назначения чугуны делятся на передельные и литейные. Передельные чугуны применяют для выплавки стали, а литейные — для изготовления отливок различного назначения. В последнее время широко используют синтетический литейный чугун, полученный насыщением и обогащением передельного чугуна кремнием за счет добавления в него электропечного ферросилиция. Качество чугуна зависит от его химического состава. Содержание химических элементов С, Si, S, Mn, P, Cr, Cu регламентируется техническими требованиями.

Исходным сырьем для выплавки чугуна являются железные руды или марганцевые руды, флюсы и топливо. Железо в рудах содержится в основном в виде окислов, иногда — в виде карбо-

ната железа FeCO_3 . Виды железных руд магнитный железняк, красный железняк, бурый железняк, шпатовый железняк.

Магнитный железняк содержит 50—60 % Fe (железа) в виде магнитной окиси Fe_3O_4 (магнетит). Красный железняк содержит 50—70 % Fe в виде безводной окиси Fe_2O_3 (гематит).

Бурый железняк содержит 25—50 % Fe в виде гидроокиси $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (лимонит) и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (гетит).

Шпатовый железняк содержит 30—40 % Fe в виде карбоната железа FeCO_3 (сидерит).

Марганцевые руды содержат 20—55 % Mn (марганца) в виде различных окислов.

При производстве чугуна в качестве флюса применяют известняк или доломитизированный известняк.

Основным видом топлива при производстве чугуна является кокс в виде крупных, прочных и пористых кусков, в которых содержится большое количество углерода. В качестве топлива используют также природный газ.

Стали в СССР выплавляют в основном из перепельных чугунов. Отливки получают из литейных чугунов.

К сталям относят железоуглеродистые сплавы, содержащие до 2 % углерода.

Производство стали относится к вторичным металлургическим процессам. Стали выплавляются в мартеновских печах, в конвертерах и в электропечах электрошлаковым, вакуумно-дуговым, электронно-лучевым и плазменно-дуговым способами.

Конвертерный способ получения стали заключается в продувке жидкого чугуна воздухом или кислородом. Выплавка стали проводится по бессемеровскому и томасовскому процессам. В томасовском процессе с помощью флюсов извлекают серу и фосфор, а в бессемеровском — в результате взаимодействия основного шлака с кислой футеровкой удаление этих вредных примесей не происходит.

Для выплавки стали в конвертерах, в электрических и мартеновских печах используют чугун, металлолом, железную руду и флюсы.

Основным признаком, по которому классифицируют стали, является их химический состав. Он определяет марку стали.

По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные. По назначению углеродистые и легированные стали делят на конструкционные, инструментальные, стали специального назначения и стали с особыми свойствами.

В зависимости от содержания углерода углеродистые стали бывают низкоуглеродистые ($C < 0,3$ %), среднеуглеродистые ($C = 0,3 \dots 0,7$ %) и высокоуглеродистые ($C > 0,7$ %).

По качественным показателям углеродистые стали подразделяют на стали обыкновенного качества, которые в зависимости от содержания углерода обозначаются Ст1, Ст2, Ст3 и т. д., и на качественные стали с обозначением их 08, 15, 20, 30 и т. д.

Углеродистые стали обыкновенного качества выпускаются в виде листов, прутков, балок и различных профилей в нормализованном состоянии. В зависимости от назначения эта сталь поставляется с гарантируемыми механическими свойствами (группа А); химическим составом (группа Б); механическими свойствами и химическим составом (группа В).

Углеродистые стали обыкновенного качества маркируют буквами Ст и порядковыми номерами от 0 до 6. Для сталей групп Б и В добавляют соответствующую букву перед обозначением марки, например: БСт2, ВСт3 и т. д. Степень раскисления обозначают добавлением индексов: спокойная сталь — сп, полуспокойная — пс, кипящая — кп. Например: Ст3кп, Ст3пс, БСт3сп. Буква Г в обозначении марки стали указывает на повышенное содержание марганца.

Способ выплавки сталей обозначают индексами: М — мартевская, К — кислородно-конвертерная.

Сталь всех групп с номерами марок 1, 2, 3 и 4 производят кипящей полуспокойной и спокойной, с номерами 5 и 6 — полуспокойной и спокойной. Стали марок Ст0 и БСт0 по степени раскисления не разделяют.

Из углеродистых сталей обыкновенного качества изготавливаются строительные конструкции, крепежные детали, листовая и профильная прокат, трубы, арматура, проволока, фитинги (муфты, угольники, тройники, пробки-заглушки, ниппели) и др.

Качественные углеродистые стали производят в мартеновских печах или электропечах. По степени раскисления их делят на спокойные, полуспокойные и кипящие.

В обозначении марок качественных углеродистых сталей первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буква Г — повышенное содержание марганца (около 1 %). В зависимости от содержания марганца стали изготавливают двух групп.

Группа 1 — с нормальным содержанием марганца (08кп, 20, 75), группа 2 — с повышенным содержанием марганца (30Г, 65Г).

Инструментальные углеродистые стали содержат от 0,66 до 1,34 % углерода и до 0,58 % марганца. Они бывают качественные и высококачественные (с пониженным содержанием серы и фосфора). Буквы и цифры в обозначении марок стали означают: У — углеродистая, затем цифра — среднее содержание углерода в десятых долях процента, Г — повышенная массовая доля марганца: например, сталь У7 содержит 0,7 % углерода, сталь У13А — 1,3 % углерода, А — высококачественная.

Из сталей У7, У8, У8А изготавливают зубила, штамповую оснастку, молотки, ножи, метчики, отвертки и другие изделия, которые подвергаются ударным нагрузкам. Из сталей с более высоким содержанием углерода (У10, У11, У10А, У12А, У13А) изготавливают напильники, надфили, фрезы, развертки, плашки, ножовочные полотна (для ручных пил), рашпили и шаберы.

К углеродистым сталям специального назначения относят низкоуглеродистые стали (электротехнические) с содержанием углерода не более 0,25 % (Э11, Э22, Э43 и др.), автоматные стали (А12, А20, А40Г, А30), стали для глубокой вытяжки с содержанием углерода не более 0,2 %. Буквы и цифры в марках электротехнических сталей обозначают: Э — электротехническая, первая цифра — степень легирования кремнием, вторая цифра — гарантирование электротехнических и магнитных свойств.

Во всех автоматных сталях буква А означает — автоматная сталь, цифра — среднее значение углерода в сотых долях процента, буква Г — содержание марганца от 0,25 до 0,45 %.

Легированные стали классифицируют в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов на низколегированные, среднелегированные и высоколегированные. Низколегированные стали имеют суммарное содержание легирующих элементов до 2,5 %, среднелегированные — от 2,5 до 10 %, а высоколегированные — более 10 %. В качестве легирующих элементов используют кремний, марганец, хром, вольфрам, никель, молибден, медь, титан.

Среднелегированные стали делятся на конструкционные легированные, инструментальные стали и стали специального назначения. Конструкционные легированные стали содержат до 0,5 % углерода и делятся на качественные и высококачественные. Высококачественные конструкционные легированные стали отличаются от качественных сталей пониженным содержанием фосфора и серы. Конструкционные легированные стали выпускаются по ГОСТ 4543—71 в виде проката, слитков, поковок, штамповок.

В зависимости от химического состава и свойств конструкционные стали делятся на три категории: качественные, высококачественные с обозначением буквой А и особовысококачественные с обозначением буквой Ш (сталь электрошлакового переплава).

В зависимости от основных легирующих элементов стали делятся на группы. Всего 13 групп таких сталей. Наиболее широко в машиностроении применяются:

1) хромистые стали марок 15Х, 15ХА, 20Х, 30Х, 30ХРА, 35Х, 38ХА, 40Х, 45Х, 50Х с содержанием углерода 0,12—0,54 %, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,40—0,80 %, хрома 0,70—1,30 %;

2) марганцовистые стали марок 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 35Г, 40Г, 10Г2, 35Г2, 40Г2 и др. с содержанием углерода 0,12—0,56 %, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,70—1,80 %;

3) хромомарганцовые стали марок 18ХГ, 18ХГТ, 27ХГР, 30ХГТ, 35ХГФ, 25ХГМ и др. с содержанием углерода 0,15—0,45 %, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,70—1,25 %, хрома 0,40—1,30 %;

4) хромокремнистые стали марок 33ХС, 38ХС, 40ХС с содержанием углерода 0,29—0,45 %, кремния 1,00—1,60 %, марганца 0,30—0,60 %, хрома 1,30—1,60 %;

5) хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали марок 15ХМ, 20ХМ, 30ХМА, 40ХМФА и др. с содержанием углерода 0,11—0,44 %, марганца 0,30—0,70 %, хрома 0,80—2,70 %, молибдена 0,15—0,55 %;

6) хромованадиевые стали марок 15ХФ и 40ХФА с содержанием углерода 0,12—0,18 % и 0,37—0,44 % соответственно, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,40—0,80 %, хрома 0,80—1,10 % и ванадия 0,06—0,12 % и 0,10—0,18 % соответственно;

7) никельмолибденовые стали марок 15Н2М, 20Н2М с содержанием углерода 0,10—0,18 % и 0,17—0,25 % соответственно, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,40—0,70 %, никеля 1,50—1,90 %, молибдена 0,20—0,30 %;

8) хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали марок 20ХН, 40ХН, 45ХН, 50ХН, 12Х2Н4А, 30ХН3А и др. с содержанием углерода 0,09—0,54 %, кремния 0,17—0,37 %, марганца 0,30—0,80 %, хрома 0,40—1,65 %, никеля 0,80—3,65 %;

9) хромокремнемарганцовые и хромокремнемарганцовоникелевые стали марок 20ХГСА, 30ХГС, 35ХГСА, 30ХГСА и др. с содержанием углерода 0,17—0,39 %, кремния 0,90—1,40 %, марганца 0,80—1,30 %, хрома 0,80—1,40 %, а в стали 30ХГСН2А — хрома 1,40—1,80 %.

Из сталей указанных марок изготавливают детали ответственного назначения — шестерни, толкатели, оси, плунжеры, гайки, болты, червяки, кулачки, звездочки, рессоры, пружины, сварные конструкции в самолетостроении, шпиндели, валы.

Инструментальные легированные стали содержат в качестве легирующих элементов от 0,40 до 1,8 % углерода и хрома, а легированные стали специального назначения — около 1,0 % углерода и хрома.

К высоколегированным сталям относятся: инструментальные стали с содержанием углерода до 2,2 % и хрома или вольфрама более 5 %, быстрорежущие стали с содержанием углерода от 0,7 до 1,12 %, вольфрама от 2,5 до 18,5 %, кобальта от 4,8 до 8,5 % и хрома от 3,0 до 4,4 %; коррозионно-стойкие стали с содержанием углерода до 1,0 %, хрома от 10 до 30 % и никеля от 0,4 до 29 %; стали с высоким электрическим сопротивлением, содержащие не более 0,15 % углерода, не более 7 % марганца, от 12 до 28 % хрома, от 3,5 до 5,8 % алюминия и от 55 до 78 % никеля; автоматные стали с содержанием хрома около 13 %, никеля до 20,0 %, фосфора до 0,15 % и серы 0,25 %.

Инструментальные легированные стали используют для изготовления:

а) режущего и измерительного инструмента (7ХФ, 9ХФ, 9ХС, 9ХВГ, 9Х5ВФ, Р6М5, Р9, Р12, Р18, Р6М3, Р9К5, Р9К10, Р18К5Ф2 и др.), буква «Р» в сталях обозначает «режущая»;

б) штампов холодного и горячего деформирования и накатного инструмента (Х6ВФ, 9Х1, Х12Ф1, ХВГ, 3Х2В8Ф, 4Х8В2, 5ХНВС, 4ХС, 4ХВ2С, 6Х6В3МФС, 8Х4В3М3Ф2 и др.).

Сплавы подразделяются на следующие группы:

а) сплавы на никелевой основе с содержанием хрома 8,5—29 %, алюминия 0,15—6,2 %, молибдена 1,8—6,0 % и железа не более 6—20 % (ХН60Ю, ХН55ВМТКЮ, ХН60ВТ, Н70МФ и др.);

б) сплавы на железоникелевой основе с содержанием хрома 14,0—23,0 %, вольфрама 2,8—6,0 %, титана 0,25—3,2 %, никеля 30,0—39,0 % (ХН35ВТ, 06ХН28МДТ и др.);

в) сплавы железоникелевые с высокой магнитной проницаемостью с содержанием никеля 33,5—80,0 %, кремния 0,15—1,5 %, марганца 0,3—1,1 % (50НП, 34НКМП, 50НХС, 80НХС и др.).

Обозначение марок стали при заказе, клеймении, а также на чертежах — буквенно-цифровое.

Первые цифры в обозначении марок легированных сталей и сплавов указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы за цифрами обозначают: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, Е — селен, М — молибден, Л — бериллий, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Ю — алюминий, Х — хром.

Цифры, стоящие после букв, указывают примерное содержание легирующих элементов в целых единицах. Отсутствие цифры означает, что в стали содержится до 1,5 % этого легирующего элемента. Буква А в обозначении марки показывает, что сталь высококачественная. Особовысококачественная сталь обозначается буквой Ш через тире в конце обозначения.

Сплавы применяются в различных отраслях промышленности для изготовления высококачественных деталей и конструкций, обладающих стойкостью против окисления при высоких температурах, способностью сопротивляться коррозии и действию химически агрессивных сред, жаропрочностью под механической нагрузкой при высоких температурах и др.

Передельные чугуны. Чугуны классифицируют по структуре в зависимости от формы содержания в них углерода. Углерод в чугуне может находиться в виде химического соединения с железом, называемого цементитом Fe_3C (белый чугун), или в виде графита (серый чугун).

В белых чугунах углерод находится в связанном состоянии в виде карбида железа. Такой чугун в изломе имеет блестящий белый цвет, высокую твердость, хрупок, трудно поддается механической обработке. Белые чугуны перерабатывают в сталь, и поэтому их называют передельными. Широко используются в промышленности серые чугуны (с пластинчатым графитом), высокопрочные (с шаровидным графитом) и ковкие чугуны, в которых весь углерод или его часть находится в виде хлопьевидного графита. Чем больше в чугуне графита, тем ниже его механические свойства. Однако в некоторых условиях наличие графита в чугуне обеспечивает его хорошую обрабатываемость резанием и

высокие антифрикционные свойства. В изломе чугуна с пластинчатым графитом (литейный) светло-серого или темно-серого цвета. Углерод в нем содержится в форме пластинок графита. Чугун с пластинчатым графитом в расплавленном состоянии обладает высокой жидкотекучестью и хорошо заполняет форму. Условное обозначение марки включает буквы СЧ — серый чугун и значение временного сопротивления при растяжении в кгс/мм² (СЧ10, СЧ15, СЧ21, СЧ30 и др.). Из серого чугуна изготавливают отливки для корпусов насосов, редукторов, подшипников, кареток, маховиков, станин станков, цилиндров и т. д.

При добавке в серый чугун присадок в виде магния или других специальных присадок графит в чугуне приобретает шаровидную форму, что обеспечивает его высокую прочность. Такие чугуны называют высокопрочными. Высокопрочные чугуны обозначают буквами ВЧ и цифрами (ВЧ 40, ВЧ 50 и др.). Условное обозначение марки включает буквы ВЧ — высокопрочный и цифровое обозначение минимального значения временного сопротивления при растяжении в МПа·10⁻². Из таких чугунов изготавливают прокатные валки большой массы, траверсы прессов, шаботы ковочных молотов, корпуса турбин, поршни, коленчатые валы и другие детали ответственного назначения.

Ковкий чугун — это белый чугун, подвергнутый отжигу с получением графита микроструктуры, состоящей из феррита и перлита в различных соотношениях и углерода отжига хлопьевидной формы, что обеспечивает его пластичность. Ковкий чугун обозначают буквами КЧ и цифрами: первая цифра — временное сопротивление разрыву (МПа), следующая — относительное удлинение (%) (КЧ 30-6, КЧ 35-10, КЧ 45-7, КЧ 55-4 и др.).

Из ковких чугунов изготавливают корпуса редукторов, ступицы, крюки, задние мосты автомобилей, гайки, фланцы муфт, карданные валы, тормозные колодки и другие изделия.

Цветные металлы и сплавы. Классификацию цветных металлов и сплавов проводят по химическому составу. Основным показателем качества цветных металлов является минимальное содержание примесей.

По степени чистоты (%) цветные металлы делят на пять групп:
пониженной чистоты — 95—99 %;
средней чистоты — 99,0—99,90 %;
повышенной чистоты — 99,90—99,99 %;
высокой чистоты — 99,99—99,999 %;
особой чистоты — 99,999—99,9999 %.

К цветным металлам относятся алюминий, висмут, галлий, германий, индий, кадмий, кобальт, медь, свинец, кремний, литий, магний, ниобий, никель, олово, ртуть, селен, сурьма, таллий, теллур, титан, цинк и др.

Рассмотрим наиболее широко применяемые цветные металлы и сплавы.

Медь представляет собой красно-розовый монокристаллический металл с плотностью $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления 1083°C . Она имеет высокую электропроводность, хорошую коррозионную стойкость в морской и пресной воде, в органических кислотах. Медь хорошо деформируется, паяется, сваривается и полируется. Марки меди: М00 (99,99% Cu), М0 (99,95% Cu), М1 (99,9% Cu) и др.

Медный сплав — латунь: сплав меди с цинком. Легирование латуни кремнием, марганцем, алюминием, никелем, железом, оловом повышает их коррозионную стойкость и механические свойства. Марки латуни обозначают буквой Л и цифрами, показывающими содержание меди в процентах: Л96, Л70, Л68, Л63, Л062—1, ЛЦ40МцЗЖ, ЛЦ30А3 и др. Обозначение легирующих элементов следующее: А — алюминий, Ж — железо, Мц — марганец, Н — никель, О — олово, К — кремний, С — свинец. Количество легирующих элементов указывается цифрами в той последовательности, в какой они приведены в буквенном обозначении марки.

Сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами называют *бронзами*. Бронзы имеют хорошие литейные и антифрикционные свойства, коррозионную стойкость, обрабатываемость резанием и давлением. В зависимости от содержания (в %) основного легирующего элемента различают оловянные, марганцевые, алюминиевые, бериллиевые, кремнистые, свинцовые и другие бронзы. Бронзы широко используют в различных отраслях промышленности для изготовления деталей ответственного назначения (шестерен, седел клапанов, гаек, нажимных винтов, ободьев, подшипников).

По назначению и механическим свойствам бронзы делят на деформируемые и литейные.

К деформируемым бронзам относят семь марок алюминиевых бронз: БрА5, БрА7, БрАМц9—2; БрАМц10—2, БрАЖ9—4; БрАЖМц10—3—1,5 и БрАЖН10—4—4 с содержанием от 4—6 до 9,5—11 % алюминия. Алюминиевые бронзы имеют высокие антифрикционные свойства, морозостойки, немагнитны, но плохо паяются.

Бериллиевые бронзы включают в свой состав три марки: БрБ2; БрБНТ1,7; БрБНТ1,9 с содержанием бериллия от 1,60—1,85 до 1,85—2,1 %. Бериллиевая бронза легирована еще никелем (0,2—0,5 %). Эти бронзы имеют высокие пределы упругости, прочности, усталости и текучести, высокие электропроводность, теплопроводность, твердость и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Широко используют кремнистые бронзы (БрКМц3—1 и БрКН1—3) и марганцевые бронзы (БрМц5 и др.). Кремнистые бронзы отличаются высокими механическими свойствами, стойкостью к коррозии, высокими антифрикционными свойствами, хорошо свариваются, штампуются и паяются.

К оловянным бронзам, обрабатываемым давлением, относятся бронзы восьми марок с содержанием до 7 % олова: БрОФ6,5—0,4; БрОФ6,5—0,15; БрОФ4—0,25; БрОЦ4—3 и БрОЦС4—4—2,5; БрОФ8,0—0,30; БрОФ7—0,2; БрОЦС4—4—4. Имеют высокие антифрикционные свойства, немагнитны, хорошо свариваются, паяются и не дают искры при ударах, хорошо обрабатываются в горячем и холодном состояниях. В марках бронз после букв Бр даны буквенное обозначение легирующих элементов и цифры (содержание элементов в %).

В промышленности используют также медно-никелевые сплавы — мельхиоры (МН19, МНЖМц30—0,1—1 и др.), нейзильберы (МНц15—20 и др.), куниаль А и Б (МНА13—3, МНА6—1,5) и др.

Мельхиоры отличаются высокой коррозионной стойкостью в морской воде, в органических кислотах, растворах солей, хорошей пластичностью. Применяются в судостроительной, медицинской промышленности, а также для изготовления монет, деталей точной механики.

Нейзильберы имеют более высокую прочность по сравнению с мельхиорами, высокую коррозионную стойкость, упругость, пластичность. Из них изготавливают детали часовых механизмов, приборы точной механики и др.

Алюминий — мономорфный металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 658 °С. Имеет высокую электро- и теплопроводность, малую плотность ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$), коррозионностоек в атмосферных условиях, в морской воде и кислотах, хорошо обрабатывается давлением, сваривается.

В зависимости от содержания примесей различают алюминий особой чистоты А999 (99,999 % Al), высокой чистоты А995 (99,995 % Al), А99 (99,990 % Al), А97 (99,970 % Al), А95 (99,95 % Al) и технической чистоты А85 (99,85 % Al), А8 (99,80 % Al), А0 (99 % Al) и др. Примеси понижают физико-химические свойства и пластичность алюминия, но повышают его прочность и твердость. Алюминий применяют для изготовления электролитических конденсаторов, фольги, проводникового материала и других изделий.

Широкое применение нашли алюминиевые сплавы. Они имеют высокую сопротивляемость инерционным и динамическим нагрузкам, высокую прочность. По способу производства алюминиевые сплавы делятся на литейные, деформируемые и спеченные.

Производятся алюминиевые литейные сплавы 37 марок: АЛ8, АЛ13, АЛ12, АК9 (АЛ4В), АЛ19, АК5М7 (АЛ10В), АЛ11, АЛ25, АЛ30 и др. Литейные сплавы имеют хорошую способность заполнять форму, малую усадку и высокие механические свойства.

Из литейных алюминиевых сплавов изготавливают фасонные отливки, корпуса насосных агрегатов, литые детали приборов и т. д.

К деформируемым сплавам относятся: дуралюмины марок Д1, Д16, содержащие 3,8—4,9 % меди (основной легирующий элемент), а также магний и марганец; сплавы марок АК4-1, АК6, АК8 и др., содержащие медь, магний, марганец и кремний; сплавы марки АВ, имеющие высокую пластичность, хорошую свариваемость, коррозионную стойкость, высокий предел выносливости.

Высокопрочные алюминиевые сплавы, кроме меди, марганца и магния, содержат также цинк (В95, В65, АМц, АМг1, АМцС и др.). Применяются в самолетостроении, для изготовления трубопроводов, палубных надстроек судов, рам и кузовов вагонов, корпусов и мачт судов и т. д.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) получают из алюминиевого порошка, сплавы САП — из алюминиевой пудры.

Сплавы САП получают распылением жидкого алюминия марки А97. Жаропрочны, выдерживают длительную нагрузку при 450 °С, хорошо обрабатываются давлением и резанием, имеют высокую удельную прочность и коррозионную стойкость. Применяются в самолето- и судостроении, в атомных реакторах, в химической и электротехнической промышленности.

Порошковые сплавы САС имеют мелкозернистую структуру с равномерным распределением фаз, без дефектов литья (шлаковых включений, ликваций, волосовин и т. д.). Это позволяет им выдерживать высокую длительную нагрузку при 250—350 °С.

Магний — металл белого цвета с плотностью $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления 651 °С. Он окисляется на воздухе и при повышенных температурах воспламеняется. В авиационной и других отраслях промышленности применяют сплавы на основе магния. Сплавы имеют высокую прочность, хорошую способность к поглощению вибрационных колебаний и ударных нагрузок, высокую удельную теплоемкость, хорошо обрабатываются резанием. Недостаток магниевых сплавов — более низкая по сравнению со сплавами на алюминиевой основе коррозионная стойкость.

Магниевые литейные сплавы можно разделить на три группы:

1) сплавы средней прочности — сплав МЛ3 системы Mg—Al—Zn—Mn;

2) высокопрочные сплавы общего назначения (он) и повышенной чистоты (пч) МЛ5он, МЛ4, МЛ5, МЛ5пч, МЛ6 системы Mg—Al—Zn—Mn; сплав МЛ8 системы Mg—Zn—Zr—Cd; сплав МЛ12 системы Mg—Zn—Zr; сплав МЛ15 системы Mg—Zn—Zr—La;

3) жаропрочные сплавы — МЛ9, МЛ10, МЛ11.

Магниевые деформируемые сплавы можно разделить на три группы:

1) сплавы повышенной коррозионной стойкости — МА1 и МА8;

2) сплавы средней прочности — МА2, МА2-1, МА17 и др.;

3) высокопрочные сплавы — МА5, МА14.

Сплавы магний—алюминий и магний—цинк подвергаются термическому упрочнению.

Титан — металл серебристо-белого цвета с плотностью $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $1665 \text{ }^\circ\text{C}$.

При нормальной температуре титан отличается высокой коррозионной стойкостью и химической стойкостью, так как на его поверхности в атмосферных условиях образуется плотная и прочная окисная пленка. Титан плохо обрабатывается резанием, имеет низкие антифрикционные свойства. Свойства титана зависят от его чистоты. Чистый титан (Ti) при высокой твердости имеет хорошую пластичность. Упрочнение титана достигается легированием его различными элементами, а также термической обработкой. При температуре $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$ α -модификация титана превращается в β -модификацию.

Титановые сплавы можно разделить на три группы. К первой группе относятся α -сплавы, ко второй — β -сплавы и к третьей — $\alpha + \beta$ -сплавы титана.

Сплавы первой группы выпускаются марок ВТ5, ВТ5-1 и др. и технически чистый титан марок ВТ1-00 и ВТ-0. Сплавы хорошо свариваются, но малопластичны и не термоупрочняются.

Однофазные β -сплавы титана образуются при добавлении к титану тантала, хрома, железа, марганца и других элементов. Устойчивая β -фаза сплава титана получается при добавлении к титану дефицитных металлов — ванадия, тантала, ниобия.

Двухфазные $\alpha + \beta$ -сплавы титана третьей группы имеют хорошие технологические и механические свойства, термоупрочняются. Это сплавы марок ВТ6, ВТ14 и др.

Титан и его сплавы производят в виде листов, прутков, слитков, титановые сплавы обладают хорошей жидкотекучестью и плотностью, немагнитны, коррозионно-стойки.

Литейные титановые сплавы марок ВТ5Л, ВТ3-1Л, ВТ20Л, ВТ21Л используют для изготовления отливок сложной формы.

Никель — металл с плотностью $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $T_{пл} = 1455 \text{ }^\circ\text{C}$. Имеет высокую прочность, пластичность и химическую стойкость.

Сплавы никеля с медью, железом, марганцем имеют высокие коррозионную стойкость и механические свойства, удовлетворительную пластичность в горячем и холодном состояниях. Сплав никеля марки НМЖМц28-2,5-1,5 (монель) применяют для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах.

Сплав никеля с 9 % хрома марки НХ 9,5 (хромель Т) используют для изготовления термодпар. Сплав никеля с 20 % хрома — нихром (Х20Н80-Н) и сплав никеля с железом и хромом — ферронихром (Х15Н60) применяют для изготовления нагревательных элементов и элементов сопротивления.

Нимоники (ХН78Т, ХН77ТЮР и др.) — жаропрочные никелевые сплавы, применяемые для изготовления деталей газовых тур-

бин и других конструкций, работающих при температурах до 1000 °С.

Сплавы тугоплавких и благородных металлов. Золото и серебро, а также платиновые металлы (платину, палладий, осмий, иридий, рутений, родий) относят к группе благородных металлов. Эти металлы химически инертны.

Иридий выпускается двух марок: И 99,9 (иридия не менее 99,90 %) и И 99,8 (иридия не менее 99,80 %). Родий представлен также двумя марками: Рд 99,9 (родия не менее 99,90 %) и Рд 99,8 (родия не менее 99,80 %). Эти металлы применяют в аппарато-строении, приборостроении и в атомной промышленности.

Платина и платиновые сплавы представлены тремя марками платины Пл 99,93, Пл 99,9 и Пл 99,8 (соответственно 99,93, 99,90 и 99,80 % платины) и двадцатью четырьмя марками сплавов на основе платины.

Палладий и палладиевые сплавы: выпускают палладий двух марок (Пд 99,9 и Пд 99,8 с 99,9 и 99,8 % палладия соответственно) и сплавы семи марок.

В зависимости от химического состава установлены две марки золота (Зл 999,9 и Зл 999) и 37 марок сплавов на основе золота.

Широкое применение находят тугоплавкие металлы — вольфрам, рений, ниобий, тантал, молибден и др.

Самый тугоплавкий металл — вольфрам с температурой плавления 3410 °С. Его сплавы используют в электротехнике, в ракетостроении, атомной энергетике и других отраслях промышленности.

Рений — второй после вольфрама тугоплавкий металл, увеличивает пластичность, понижает температуру перехода в хрупкое состояние, улучшает обрабатываемость давлением и снижает электропроводность сплавов. Он используется в электровакуумных приборах.

Ниобий и его сплавы как сверхпроводящие материалы применяют в химической промышленности, ракетной технике, сверхмощных атомных ускорителях.

Тантал и его сплавы с вольфрамом, ниобием, молибденом имеют высокую химическую стойкость в сильных кислотах, в расплавах щелочных металлов. Применяют в электровакуумной и химической промышленности, а также в атомной энергетике.

Молибден является легирующим элементом в сплавах, он образует высокодисперсные карбиды, упрочняющие сплавы.

Порошковые материалы изготавливают из металлического порошка или из его смеси с неметаллическим порошком.

Методы порошковой металлургии имеют преимущества по сравнению с обычными методами производства материалов и изделий: снижение температуры процесса при замене плавления спеканием, возможность получения сплавов (композиций) из элементов, не сплавляющихся между собой или значительно отличающихся по температурам плавления или плотностям,

возможность получения изделий сложной формы и точных размеров, а также изделий с особой структурой.

По назначению порошковые материалы делятся на следующие группы:

твердые спеченные сплавы для режущего и горнодобывающего инструмента, для изделий конструкционного назначения;

материалы электротехнического назначения;

фрикционные и антифрикционные материалы;

пористые материалы;

жаропрочные и жаростойкие материалы.

Изделия из порошковых материалов изготавливают в следующей технологической последовательности: получение, смешивание и прессование металлических порошков; спекание порошковой формовки.

Изготовление металлических порошков — важная операция, от которой зависят их химический состав, физические и технологические свойства. Химический состав порошков определяется содержанием основных компонентов, а также газов и примесей. Физические свойства определяются размером частиц порошка, их формой, магнитными и другими свойствами. Технологические свойства порошков характеризуются их насыпной плотностью, прессуемостью, уплотняемостью и формуемостью.

Промышленность выпускает различные металлические порошки: железные порошки (ПЖ1—ПЖ5), медные порошки (ПМА, ПМ, ПМС-2, ПМС-К и др.), кобальтовые порошки (ПК-1 и ПК-2), никелевые порошки (ПНЭ1, ПНК1Л6 и др.), цинковые порошки (ПЦВ, ПЦ0, ПЦ3 и др.), легированные порошки (Р6М5КМП, МП, ПХ18Н15-1, Р9М4К8МП и др.), порошки драгоценных металлов, алюминиевые порошки (САП-1, САП-2, САП-3, САП-4, ПАП-1, ПАП-2 и др.), наплавочные порошки, твердые спеченные сплавы (ВК6, ВК8, ВК15, ВК8-В, ВК20-КС, ТТ7К12, Т30К4, ТТ10К8-Б и др.).

2.2. Основные свойства металлов и сплавов

Металлы и сплавы характеризуются комплексом физических, механических, химических и технологических свойств.

Физические свойства металлов и сплавов — блеск, плотность, температура плавления, теплопроводность, теплоемкость, электропроводность, магнитные свойства, расширяемость при нагревании и фазовых превращениях.

Механические свойства металлов и сплавов — твердость, упругость, прочность, хрупкость, пластичность, вязкость, износостойкость, сопротивление усталости, ползучесть.

Химические свойства металлов и сплавов определяют их способность сопротивляться воздействию окружающей среды. При контакте с окружающей средой металлы и сплавы подвергаются коррозии, растворяются, окисляются и снижают свою жаропрочность.

Технологические свойства металлов и сплавов — ковкость, свариваемость, прокаливаемость, склонность к обезуглероживанию, обрабатываемость резанием, жидкотекучесть, закаливаемость. Они характеризуют способность металлов и сплавов обрабатываться различными методами. Кроме того, они позволяют определить, насколько экономически эффективно можно изготовить изделие.

Ковкость — способность металла и сплава обрабатываться путем пластического деформирования.

Свариваемость — способность металла и сплава образовывать неразъемное соединение, свойства которого близки к свойствам основного металла (сплава).

Прокаливаемость — способность металла и сплава закаливаться на определенную глубину.

Склонность к обезуглероживанию металла и сплава — возможность выгорания углерода в поверхностных слоях изделий из сплавов и сталей при нагреве в среде, содержащей кислород и водород.

Обрабатываемость резанием — поведение металла и сплава под воздействием режущего инструмента.

Жидкотекучесть — способность расплавленного металла и сплава заполнять литейную форму.

Закаливаемость — способность металла и сплава к повышению твердости при закалке (нагрев и быстрое охлаждение).

Физические свойства металлов и сплавов важны для самолетостроения, автомобилестроения, медицины, строительства, изготовления космических аппаратов и часто являются основными характеристиками, по которым определяют возможность использования того или иного металла или сплава.

Блеск — способность поверхности металла и сплава направленно отражать световой поток.

Плотность — масса единицы объема металла или сплава. Величину, обратную плотности, называют удельным объемом.

Температура плавления — это температура, при которой металл или сплав целиком переходит в жидкое состояние. **Теплопроводность** — количество теплоты, проходящее в секунду через сечение изделия в 1 см^2 , когда на расстоянии в 1 см изменение температуры составляет 1°C . **Теплоемкость** — количество теплоты, необходимой для повышения температуры тела на 1°C .

Электрическая проводимость — величина, обратная электрическому сопротивлению. Под удельным электрическим сопротивлением понимают электрическое сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения в 10^{-6} м^2 при пропускании по нему электрического тока.

К магнитным свойствам металлов и сплавов относятся: начальная магнитная проницаемость, максимальная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, ин-

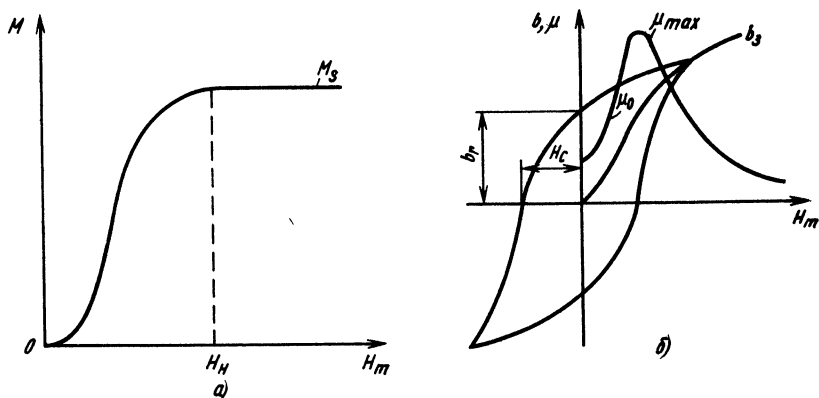


Рис. 2.1. Кривые намагничивания ферромагнитного материала:
 а — начальная; б — петля гистерезиса

дукция насыщения, остаточная магнитная индукция, точка Кюри, петля гистерезиса.

При помещении стального образца в магнитное поле возникающая в нем магнитная индукция (b) является функцией напряженности магнитного поля (H_m).

Намагниченность (M) пропорциональна напряженности магнитного поля. Эти величины связаны между собой коэффициентом χ_m , который называется магнитной восприимчивостью стали или сплава:

$$M = \chi_m H_m. \quad (2.1)$$

Между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля существует аналитическая связь

$$b = \mu_v (H_m + M), \quad (2.2)$$

где μ_v — магнитная проницаемость вакуума.

Для ферромагнетиков (сплавов, способных намагничиваться до насыщения в малых магнитных полях) $b = \mu H_m \mu_v$, где $\mu = 1 + \chi$ — коэффициент магнитной проницаемости.

При намагничивании ферромагнитных материалов (стали, полученные соединением ферромагнетиков с парамагнетиками) намагниченность сначала плавно возрастает, потом резко повышается и постепенно достигает насыщения M_s (рис. 2.1, а). При уменьшении напряженности магнитного поля H_m после намагничивания и реверсирования (изменение направления поля) его кривая изменения индукции образует замкнутую петлю. Эта петля называется петлей гистерезиса (рис. 2.1, б).

Основными параметрами начальной кривой и петли гистерезиса являются остаточная индукция b_r , коэрцитивная сила H_c ,

напряженность насыщающего поля H_n и намагниченность насыщения M_s . По начальной кривой определяется кривая магнитной проницаемости, в которой основными точками являются начальная магнитная проницаемость μ_0 и максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} .

Наибольшее значение индукции на петле гистерезиса называется индукцией насыщения b_s .

Ферромагнетики при нагреве до определенной температуры переходят в парамагнитное состояние (в состояние с малой магнитной восприимчивостью). Эта температура называется точкой Кюри. Точка Кюри определяется в основном химическим составом сплава или стали и не зависит от давлений, напряжений и других факторов.

Все характеристики ферромагнитных материалов можно разделить на структурно нечувствительные и структурно чувствительные. К структурно нечувствительным характеристикам относятся точка Кюри, намагниченность насыщения, зависящие от произвольной намагниченности, к структурно чувствительным — магнитная проницаемость, остаточная индукция и коэрцитивная сила.

Структурно нечувствительные характеристики ферромагнитных материалов зависят в основном от химического состава и числа фаз и практически не зависят от кристаллической структуры, размера частиц зерна металла. Следовательно, измерение точки Кюри, намагниченности насыщения и т. д. необходимо для качественного фазового анализа стали и сплава.

Измерение структурно чувствительных характеристик необходимо при изучении структурных изменений в сплавах и сталях при термической или механической обработке.

Магнитная проницаемость, коэрцитивная сила и остаточная индукция изменяются при обработке сплавов и сталей.

Расширение при нагревании изделий из сталей и сплавов — изменение размеров и формы зерен, характеризуется температурными коэффициентами объемного расширения и линейного расширения. Расширение при нагревании в интервале температур фазовых превращений сталей и сплавов характеризуется коэффициентом линейного расширения отдельных фаз. Внутренние (фазовые и структурные) превращения в металлах и сплавах характеризуются изменением объема, линейных размеров и коэффициента расширения. При фазовых превращениях в металлах и сплавах происходит выделение или поглощение скрытой теплоты превращения, изменяется теплоемкость изделия. Поэтому при изменении структуры металла или сплава, нагреваемого или охлаждаемого с постоянной скоростью, могут появиться отклонения от нормальной кривизны на кривых изменения температуры по времени. По этим кривым, называемым термическими кривыми, определяют температуру (температурный интервал) превращения.

Механические свойства металлов и сплавов. Твердость — это свойство металлов и сплавов оказывать сопротивление местной пластической деформации или хрупкому разрушению в поверхностном слое в определенных условиях испытания.

Упругость — свойство металлов и сплавов восстанавливать первоначальные размеры и объем после снятия нагрузки.

Прочность — свойство металлов или сплавов в определенных условиях и пределах, не разрушаясь, воспринимать те или иные воздействия (нагрузки, неравномерные температурные, магнитные, электрические и другие поля). Прочность характеризуется пределом текучести и временным сопротивлением. Существуют два вида предела текучести: физический и условный.

Временное сопротивление σ_b — напряжение, которое соответствует максимальной нагрузке, выдерживаемой образцом до разрушения.

Пластичность — свойство металла или сплава под действием внешних нагрузок изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после снятия этих нагрузок. Пластичность характеризуется относительным удлинением и сужением образца при механических испытаниях.

Вязкость — свойство металла или сплава необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании. Вязкость непосредственно не измеряется, но косвенным показателем ее является ударная вязкость.

Ударная вязкость — механическая характеристика, оценивающая работу разрушения надрезанного образца при ударном изгибе на маятниковом копре.

Хрупкость — способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без заметной пластической деформации.

Износостойкость — свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в условиях трения.

Сопротивление усталости — свойство материала противостоять усталости (усталость — процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин и разрушению).

Ползучесть — свойство металлов и сплавов медленно пластически деформироваться под действием нагрузки. Ползучесть определяется пределом ползучести — напряжением, которое за определенное время при данной температуре вызывает заданное суммарное удлинение или заданную скорость деформации.

2.3. Неметаллические материалы, их свойства и области применения

Неметаллические материалы представляют собой большую группу простых веществ, не обладающих свойствами металлов. Они не имеют металлического блеска, нековки, плохие проводники теплоты и электричества.

Одну из групп неметаллических материалов составляют **высокомолекулярные соединения (полимеры)** — сложные вещества с большой молекулярной массой.

Полимеры классифицируют на природные полимеры (натуральный каучук, целлюлоза, природные смолы и др.) и синтетические (карбамидные и фенолоформальдегидные смолы). Полимеры подразделяются в зависимости от химического состава, формы макромолекул, фазового состояния.

Полимеры делятся на органические полимеры (смолы, каучук и др.), которые отличаются прочностью и эластичностью; элементоорганические полимеры (в состав их входят атомы неорганических элементов Ti, Al, Si и др., которые обеспечивают полимерам теплостойкость); неорганические полимеры (силикатные стекла, слюда и др.). Основу неорганических полимеров составляют окислы кремния, алюминия, щелочно-земельных металлов.

По форме макромолекул полимеры делят на линейные, разветвленные и сетчатые.

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на аморфные (полистирол, каучук и др.) и кристаллические (полиэтилен низкого давления и др.). Эти полимеры прочны и теплостойки.

Полимеры делят на термопласты и реактопласты. Термопласты способны обратимо размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении, т. е. могут формоваться повторно. При нагреве реактопластов в них происходят химические превращения, делающие их непригодными для повторного формования.

Пластическими массами называют материалы, полученные на основе природных или синтетических полимеров. Из пластических масс при нагревании под давлением изготавливают изделия заданной формы, которые устойчиво сохраняют ее после охлаждения.

Пластмассы широко используют в машиностроении, электротехнике, радиотехнике, в строительстве. Детали из пластмасс имеют высокие фрикционные и антифрикционные свойства, хорошую химическую и коррозионную стойкость, хорошие электроизоляционные свойства, низкую теплопроводность, малую плотность, высокую удельную прочность, хорошо склеиваются, свариваются и обрабатываются резанием. По сравнению с металлами и сплавами пластмассы имеют малые ударную вязкость и модуль упругости.

В промышленности широко используют следующие виды пластмасс.

Полиэтилен — продукт полимеризации газа этилена. Имеет высокую прочность, эластичен, сохраняет полученную при обработке форму при температурах до 60 °С, хороший диэлектрик, морозостоек до —60 °С. Это легкий, водостойкий материал, из которого изготавливают в основном пленки, трубы и емкости для агрессивных жидкостей.

Полистирол — твердый бесцветный материал, продукт полимеризации стирола. Производится в виде листов, стержней, порошка и блоков. Полистирол — хороший диэлектрик, широко используется как электроизоляционный материал в высокочастотной технике. Полистирол плохо растворяется в бензине и в спиртах.

Фотостирол — кристаллический полимер, имеющий высокую химическую стойкость к кислотам, растворам щелочей, органическим растворителям. Морозостоек до -195°C , является хорошим антифрикционным материалом. Из него изготавливают трубы, насосы и шланги, используют также в качестве диэлектрика и защитного покрытия металлов.

Полиметилметакрилат — твердый бесцветный материал. Изготавливается в виде листового материала толщиной от 0,8 до 24 мм. Широко используется в авиации, светотехнике, автомобилестроении и в других отраслях промышленности.

Поликапроамид (капрон, перлон и др.) — термопласт, стоек к щелочам, кислотам, бензину и маслам. Используют главным образом в производстве пленок, волокна, а также подшипников, втулок, червячных и зубчатых колес, электроизоляционных и бытовых изделий.

Фенопласты — термореактивные пластмассы на основе фенолальдегидных смол. Кроме смолы (связующего), могут содержать наполнитель (50—70 %), отвердитель, краситель и др. Наполнителями служат порошки (например, древесная, кварцевая мука, графит, микроасбест), а также волокнистые материалы (хлопковые, асбестовые, стеклянные). Фенопласты термостойки (до 200°C), коррозионно-стойки, нетоксичны. Используют для изготовления электроизоляционных деталей и бытовых изделий.

Компаунды полимерные (литая изоляция) — композиции на основе оксидных и полиэфирных смол, жидких кремнийорганических каучуков. Содержат наполнители, например кварцевый песок, фарфоровую пыль, слюдяную муку, ускорители отверждения. Предназначены для изоляции токопроводящих схем и деталей в электротехнической, радиотехнической и электронной аппаратуре. Одно из основных требований к компаундам полимерным — низкая вязкость, позволяющая использовать их для заливки (заполнения промежутков между деталями устройств) и пропитки деталей электроаппаратуры, например, обмоток трансформаторов.

На основе фенолоформальдегидных смол производят *волокниты*, *асбоволокниты*, *стекловолокниты* и т. д. В качестве наполнителей используют хлопковое, асбестовое и стеклянное волокно. Стекловолокниты применяют для изготовления деталей с повышенной механической прочностью и термостойкостью.

Из конструкционных слоистых материалов в промышленности широко применяют текстолит, гетинакс и стеклотекстолит.

Гетинакс — слоистый прессованный материал на основе бумаги, пропитанной терморезактивной синтетической смолой (например, фенолоформальдегидной). Он хорошо обрабатывается резанием, имеет высокие механические и электроизоляционные свойства. Применяется в электротехнике, а также в качестве декоративного материала.

Текстолит — слоистый материал на основе ткани из природного волокна, пропитанной синтетической смолой (главным образом фенолоформальдегидной). Используют для изготовления прокладочных колец, шестерен, вкладышей подшипников, деталей в радио- и электротехнике.

Стеклотекстолит — слоистый материал на основе стеклоткани и полимерного связующего. Характеризуется высокими теплостойкостью и морозостойкостью, прочностью и хорошими электроизоляционными свойствами. Используют для изготовления крупногабаритных изделий (корпуса судов, кузова автомобилей и т. д.), а также как электроизоляционный материал.

В промышленности широко используют также неметаллические материалы: картон, фибру, резину, эбонит и др.

Картон вырабатывают из бумажной массы на бумагоделательных машинах способом многократного наслаивания листов с последующим их прессованием и сушкой. Фибру получают пропиткой специальной бумаги концентрированным раствором хлорида цинка и последующим прессованием; используют как электроизоляционный материал.

Резина — конструкционный материал с уникальными свойствами. Важнейшее из них — высокая эластичность в широком интервале температур. Ценные свойства резины — масло-, бензо- и морозостойкость, стойкость к действию кислот и щелочей. Резина нерастворима, но обладает свойством набухать.

Эбонит (твердая резина) — продукт вулканизации каучука большим количеством серы. Имеет хорошие электроизоляционные свойства. При нагреве переходит в пластичное состояние и может подвергаться штамповке.

Большую группу неметаллических материалов составляют **строительные материалы**.

К строительным материалам относятся кирпич, цемент, древесина, бетон, керамика, изоляционные материалы. Строительные материалы характеризуются комплексом физико-механических свойств.

Цвет — свойство тел вызывать определенное зрительное ощущение в соответствии со спектральным составом и интенсивностью отражаемого или испускаемого ими видимого излучения.

Блеск — свойство поверхности материала направленно отражать световой поток. Хороший блеск имеют гладкие, зеркальные поверхности, плохой блеск — поверхности, имеющие односторонние неровности.

Текстура — рисунок, образующийся на поверхности материала после механической обработки.

Влажность — отношение количества удаленной влаги к массе образца абсолютно сухого материала.

Усушка — уменьшение линейных размеров и объема образцов при удалении из них связанной влаги.

Влагопоглощение (гигроскопичность) — способность материала поглощать влагу из окружающей атмосферы (воздуха).

Разбухание — увеличение линейных размеров и объема материала при увеличении содержания в нем связанной влаги. Разбухание — процесс, обратный усушке.

Водопоглощение — способность материала поглощать капельно-жидкую влагу при непосредственном контакте с ней.

Плотность — отношение массы образца к его объему.

Гидрофильность — способность материала смачиваться водой.

Гидрофобность — неспособность материала смачиваться водой.

Водопроницаемость — способность материалов пропускать через свою толщу воду при наличии разности давлений.

Водостойкость — способность материалов не изменять свои свойства при насыщении водой.

Прочностные и деформационные показатели неметаллических материалов (предел прочности, твердость, ударная вязкость и др.) в значительной степени характеризуют их как конструкционный материал. Эти показатели определяют в лабораторных условиях при испытаниях на сжатие, растяжение, статический изгиб, сдвиг, кручение и др.

Контрольные вопросы

1. Назовите исходные материалы для изготовления металлов и сплавов.
2. Чем отличаются стали от чугунов?
3. Перечислите физические и механические свойства металлов и сплавов.
4. Назовите неметаллические материалы и укажите их физико-механические характеристики.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ

3.1. Общая характеристика и атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов

Физические и механические свойства металлов и сплавов зависят от их химического состава, структурного состояния, наличия посторонних включений и т. д. Изучение связи между составом, структурой и свойствами металлов и сплавов, а также закономерностей изменения этих свойств при тепловом, механическом, химическом и других внешних воздействиях позволяет разрабатывать сплавы с заданными физико-механическими свойствами, совершенствовать технологию их производства.

Металлы характеризуются высокими электропроводностью и теплопроводностью, пластичностью и прочностью, ковкостью и блеском. Свойства металлов в основном зависят от содержания в них примесей, даже незначительное количество примесей изменяет свойства металлов. С уменьшением доли примесей в металле увеличиваются его электропроводность и пластичность, но значительно уменьшается прочность.

По содержанию примесей металлы делят на технически чистые с содержанием примесей до 0,1—0,5 %, химически чистые — до 0,01—0,1 % примесей и сверхчистые — менее 0,001 %. Абсолютно чистых металлов не существует, однако специальные методы очистки позволяют получить металлы с содержанием примесей порядка 10^{-4} — 10^{-10} %.

Обычно в промышленности металлы применяют не в чистом виде, а в виде сплавов. Металлы и сплавы делят на черные, к которым относят железо и сплавы на его основе, и цветные (нежелезные), к которым относят все остальные металлы и сплавы.

По физическим и химическим свойствам и характеру залегания в земной коре цветные металлы подразделяют на легкие, тяжелые, благородные, тугоплавкие, рассеянные, редкоземельные и радиоактивные. К легким металлам относятся алюминий, магний, бериллий, титан, рубидий, кальций, натрий, калий, литий, цезий, барий и стронций, к тяжелым — медь, никель, свинец, кобальт, ртуть, олово, кадмий, цинк, сурьма и висмут.

К благородным (драгоценным) металлам, характеризующимся высокой коррозионной стойкостью, относятся золото, серебро, платина и платиноиды (рутений, радий, палладий, осмий, иридий). Тугоплавкими металлами являются вольфрам, ниобий,

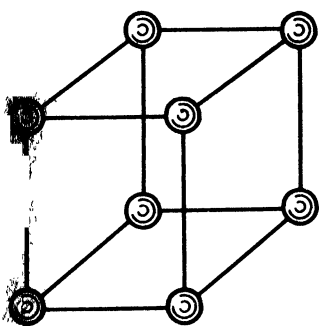


Рис. 3.1. Простая кубическая решетка кристаллического твердого тела

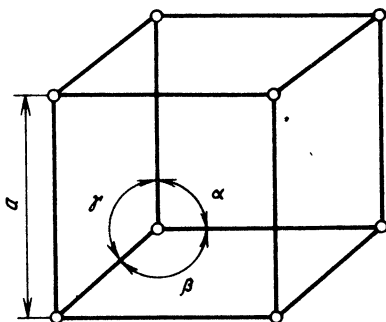


Рис. 3.2. Основные параметры кристаллической решетки

молибден, рений, тантал, хром, ванадий, гафний и цирконий, а рассеянными — таллий, галлий, индий. Скандий, иттрий, лантан и все лантаноиды относятся к редкоземельным цветным металлам. Радиоактивную группу цветных металлов составляют радий, полоний, уран, актиний, торий, франций, технеций, протактиний и все трансурановые элементы.

В природе все вещества могут находиться в аморфном и кристаллическом состояниях. В аморфных веществах молекулы расположены беспорядочно, произвольно. Аморфное вещество изотропно, т. е. имеет одинаковые физические свойства по всем направлениям.

Металлы и сплавы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение, т. е. атомы располагаются в пространстве в строго определенном порядке. Кристаллическое строение (структура) вещества характеризуется свойством симметрии и упорядоченным взаимным расположением атомов, ионов и молекул.

Строение кристаллического тела графически изображается в виде периодически повторяемой пространственной решетки, которая состоит из элементарных кристаллических ячеек. Элементарные ячейки имеют различные кристаллические системы. Существует семь типов кристаллических решеток — кубическая, гексагональная, тетрагональная, тригональная, ромбическая, моноклинная и триклинная. Кубическая решетка (рис. 3.1) является простейшей кристаллической решеткой твердого тела.

Кристаллические решетки, в которых частицы (атомы, ионы, молекулы) расположены только в узлах решетки, относятся к простым. В сложных кристаллических решетках с плотной упаковкой атомов частицы находятся не только в вершинах, но и внутри ячеек или на их границах.

Свойства металлов и сплавов зависят от формы кристаллической решетки и от строения атомов. Простейшая кубическая решетка является основой сложных кубических решеток, из которых состоят металлы и сплавы.

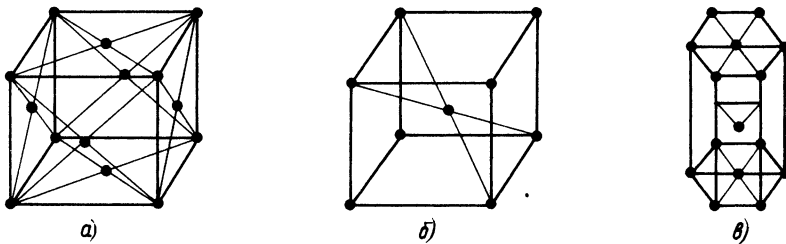


Рис. 3.3. Кристаллические решетки металлов:

a — гранецентрированная кубическая; *b* — объемно-центрированная кубическая; *v* — гексагональная плотноупакованная

Кристаллическая решетка характеризуется параметрами решетки, углами между осями координат (α , β , φ), координационным числом, коэффициентом компактности и базисом решетки (рис. 3.2).

Кубическую решетку определяет один параметр — длина ребра куба a .

Координационное число — число ближайших равноудаленных соседних атомов, окружающих каждый атом в кристалле.

Коэффициент компактности решетки — отношение объема, занятого атомами, ко всему объему решетки. С увеличением коэффициента компактности и координационного числа решетки увеличивается плотность «упаковки» частиц в кристалле.

Под базисом (плотностью упаковки) решетки понимают число атомов, приходящееся на одну элементарную ячейку. При допущении, что атомы имеют форму шара и касаются друг друга, можно установить объем, который занимают атомы, для каждого вида кристаллической решетки. При изучении кристаллических решеток металлов можно установить различную плотность заполнения атомами кристаллографических плоскостей, при этом расстояние между атомами в одной и той же плоскости по разным направлениям неодинаково.

Металлы и сплавы состоят в основном из кристаллических решеток трех типов: из объемно-центрированных кубических (ОЦК), гранецентрированных кубических (ГЦК) и гексагональных плотноупакованных (ГПУ) решеток (рис. 3.3).

Объемно-центрированная кубическая решетка является основой таких металлов, как хром, титан, ванадий, цирконий, тантал, молибден, вольфрам, железо и др.

Гранецентрированная кубическая решетка является основой следующих металлов: γ -железа, алюминия, родия, кобальта, палладия, меди, серебра, платины, золота и других металлов, включая редкоземельные.

Гексагональная плотноупакованная решетка наблюдается в кристаллах бериллия, таллия, магния и кадмия. Так как физические свойства кристаллов зависят от плотности и характера взаимного расположения атомов, следовательно, свойства металла

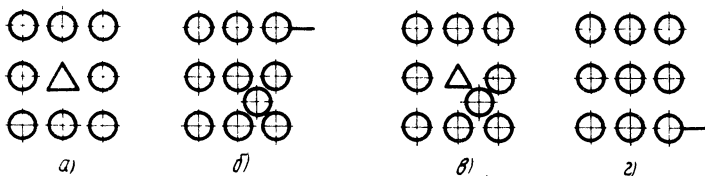


Рис. 3.4. Точечные дефекты кристаллической решетки металлов:
 а — пустой узел (вакансия); б — междуузельный атом; в — вакансия и междуузельный атом; г — примесный атом

будут различными в разных направлениях измерений. Неодинаковость физических свойств в разных направлениях называется анизотропией. Она сильно проявляется в монокристаллах (однокристаллических твердых телах).

Металлы и сплавы имеют поликристаллическую структуру, т. е. состоят из большого числа кристаллических зерен, ориентированных произвольно одно относительно другого. Металлы и сплавы имеют практически одинаковые свойства в разных направлениях, поэтому они изотропны, их свойства не зависят от направления кристаллической решетки.

Структура реальных кристаллов металлов и сплавов имеет много дефектов строения, которые сильно влияют на свойства металлов. Особенно много дефектов в сплавах. Под сплавом понимают кристаллическое твердое тело с характерными металлическими свойствами, полученное при сплавлении или спекании двух и более компонентов. Основой всех металлических сплавов являются металлы. В качестве компонентов применяют, как правило, другие металлы, а также неметаллы (например, углерод в сталях и чугунах и устойчивые химические соединения).

Сплавы могут быть двойными, тройными, многокомпонентными в зависимости от числа компонентов.

Плохо очищенный от примесей металл также можно отнести к сплаву.

Дефекты в кристаллах металлов и сплавов могут быть точечными и линейными.

Точечные дефекты характерны для элементарных кристаллических решеток и очень разнообразны. Точечные дефекты малы во всех трех измерениях, их размеры не превышают нескольких атомных диаметров. Они получаются в результате пластической деформации, загрязненности металла примесями и т. д.

Точечные дефекты (рис. 3.4) встречаются в виде вакансий (пустой узел решетки), междуузельного (смещенного) атома, вакансии и междуузельного атома, примесного атома.

Точечные дефекты вызывают искажение кристаллической решетки и создают в ней внутренние напряжения, что повышает прочность, а также электрическое сопротивление металлов и сплавов.

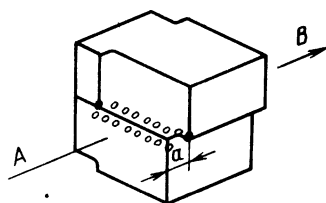
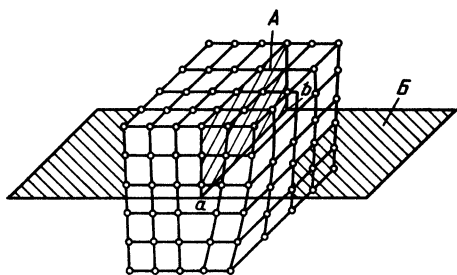


Рис. 3.5. Краевая дислокация кристаллической решетки

Рис. 3.6. Винтовая дислокация кристаллической решетки (A — линия дислокации; B — направление пластического сдвига; a — межатомное расстояние)

Кроме того, возможно искажение геометрической формы кристаллической решетки. Кристаллы с искаженной (деформированной) решеткой называются кристаллитами (зернами).

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях решетки и большую протяженность в третьем измерении решетки кристалла. Такие дефекты называют дислокациями, они приводят к более протяженному нарушению кристаллической структуры, чем точечные, и захватывают значительные области кристалла. Дислокации делят на краевые и винтовые.

Под краевой дислокацией понимают дислокацию, которая является результатом появления в кристаллической решетке добавочной плоскости A (рис. 3.5).

Линия *ab* пересечения добавочной плоскости с плоскостью скольжения B (плоскость деформации монокристалла) называется линией дислокации, а точки *a* и *b* пересечения линии дислокации с перпендикулярными к ней кристаллографическими плоскостями называют центрами дислокаций. Краевые дислокации условно делят на положительные (\perp) и отрицательные (∇) в зависимости от расположения добавочной плоскости относительно плоскости скольжения. Краевая дислокация положительна, если добавочная плоскость расположена выше плоскости скольжения; отрицательной краевая дислокация считается в том случае, когда добавочная плоскость находится ниже плоскости скольжения.

Винтовая дислокация образуется в результате разрыва кристалла по плоскости скольжения и смещения частей кристалла на одно межатомное расстояние *a* (рис. 3.6). Линию, расположенную в плоскости разрыва кристалла и проходящую в зоне наибольшего искажения решетки, называют линией винтовой дислокации (A). Дислокацию называют винтовой потому, что смещенные из положений равновесия атомы располагаются в пространстве по винтовой линии.

В кристаллах наблюдается большое число дислокаций и образуются они на стадии кристаллизации металла и сплава. Дислокации при выходе на поверхность изделия исчезают, но за счет того, что в процессе деформации металлических изделий дисло-

кации размножаются, их число возрастает в холоднодеформированных металлах и сплавах, что обеспечивает их упрочнение.

В металлах и сплавах наблюдаются линейные дефекты пространственной решетки. Они малы только в одном измерении пространственной решетки. Линейные дефекты представляют собой поверхности раздела между отдельными зернами или их блоками в поликристаллическом металле. Такие зерна по разные стороны границ имеют неодинаковую пространственную ориентировку. Различие в ориентации составляет десятки градусов, в связи с этим межзеренные границы называют высокоугловыми. Ширина границ равна 5—10 межатомных расстояний. Наличие таких границ зерен способствует упрочнению поликристаллов, так как переход дислокаций из одного зерна в другое невозможен.

Зерна состоят из блоков. Границы блоков имеют дислокационное происхождение, разориентировка их составляет не более 5° (малоугловые границы). На границах блоков и субзерен скапливаются примесные атомы, в связи с этим на межзеренных границах появляются зародыши новой фазы при фазовых превращениях в твердом состоянии.

Кристаллическое твердое тело является одним из трех агрегатных состояний материала (твердое, жидкое и газообразное). Нахождение твердого тела, в том числе металла, в том или ином состоянии определяется давлением и температурой.

Все превращения в металлах происходят, как правило, при постоянном давлении, поэтому переменным параметром является температура.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое называется первичной кристаллизацией. Металлы кристаллизуются при постоянной температуре, называемой критической температурой (точной) фазового превращения.

Под фазой понимают часть системы, которая отделена от остальных частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую структура и свойства вещества меняются скачкообразно.

Чистый металл представляет собой однокомпонентную систему, находящуюся в зависимости от температуры в однофазном (жидком или твердом) и двухфазном (жидком и твердом) состояниях.

Кристаллическое состояние металла характеризуется упорядоченным расположением атомов, равновесием между силами притяжения и отталкивания, наличием определенного объема и формы.

— Жидкое состояние металла является промежуточным между твердым и газообразными состояниями и определяется упорядоченным расположением атомов и молекул в малых объемах. Жидкость имеет собственный объем при отсутствии определенной формы и принимает форму емкости, которую заполняет.

Газообразное состояние металла характеризуется свободным движением частиц (молекул, атомов, ионов), имеющих слабую

связь между собой и заполняющих весь предоставленный им объем.

При повышении температуры металла происходит усиленное колебание атомов кристаллической решетки. По достижении металлом температуры плавления амплитуда этих колебаний превосходит допустимую величину, что нарушает взаимосвязь атомов и приводит к их свободному относительному перемещению. Металл в этот момент переходит из твердого состояния в жидкое. Дальнейшее повышение температуры до температуры кипения приводит к переходу металла из жидкого состояния в газообразное. Температура плавления и кипения каждого металла и сплава при постоянном давлении является постоянной величиной. В отличие от кристаллических материалов некристаллические аморфные материалы не имеют строго определенных температур перехода из одного состояния в другое (стекло, пластмассы и т. д.).

Для получения информации о поведении металлов и сплавов в различных условиях эксплуатации необходимо проведение комплексных испытаний, позволяющих оценить влияние химического состава материала и его структуры на физико-механические свойства. Известно, что даже незначительное присутствие примесей в кристалле может сильно изменять свойства металла.

Различают следующие виды структур металлов и сплавов: макроструктура, микроструктура и тонкая структура.

Макроструктура — строение металла (сплава), видимое невооруженным глазом или с помощью лупы на отшлифованных и протравленных образцах (макрошлифах). По макроструктуре определяют трещины, усадочные раковины, газовые пузыри, химическую неоднородность в распределении примесей (ликвации), структурную неоднородность (волоконистость, полосчатость).

Микроструктура — строение металла (сплава), определяемое с помощью микроскопа (оптического или электронного) (рис. 3.7).

По микроструктуре определяют величину зерна, наличие и распределение фаз, неметаллических включений и дислокаций на микрошлифах.

Тонкая структура — строение металла (сплава) на атомно-кристаллическом уровне. Такая структура устанавливается с по-

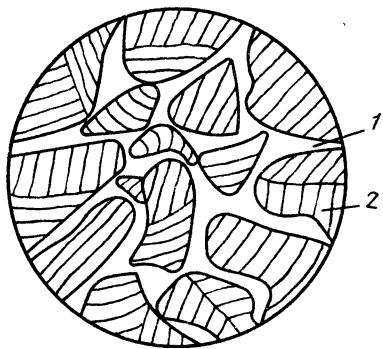


Рис. 3.7. Микроструктура стали У7:
1 — феррит; 2 — перлит

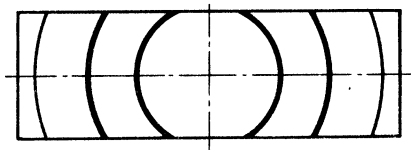


Рис. 3.8. Характерные формы линий при рентгеновской съемке тонкой структуры металлов

мощью рентгенографии и нейтронографии. Тонкая структура позволяет выявить форму и размеры элементарной ячейки кристалла, степень совершенства кристаллической структуры, остаточные напряжения, влияние легирующих элементов на параметры кристаллической решетки (рис. 3.8).

3.2. Понятие о напряженно-деформированном состоянии

Современные материалы должны иметь высокие физико-механические свойства для обеспечения надежности конструкций, машин и агрегатов. Повышение этих свойств возможно только при постоянном всестороннем контроле изделий хорошо разработанными методами с привлечением современных достижений науки.

Для определения механических свойств материалов необходимо установить зависимость между деформациями и напряжениями на основе анализа напряженно-деформированного состояния металла.

Под напряженно-деформированным состоянием понимают совокупность напряжений и деформаций, возникающих при приложении внешней нагрузки.

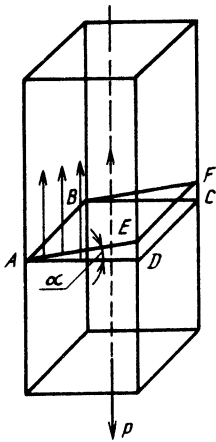
Внешние силы, действующие на тело, делят на объемные и поверхностные. К объемным относят силы, которые действуют на все материальные точки тела, пропорциональны их массам (силы тяжести, силы инерции и др.) и при анализе напряженно-деформированного состояния изделия не учитываются.

К поверхностным относят силы, прикладываемые к поверхности тела. Они могут быть распределенными и сосредоточенными (нагрузка сосредоточена на очень малой площадке). При определении напряженного состояния тела принимают, что тело однородно, изотропно и представляет собой систему непрерывных точек. При нахождении системы (тела) в равновесии внешние силы уравновешиваются и система считается жесткой.

В теле металла (сплава) между атомами существуют силы взаимного притяжения и отталкивания, которые в свободном состоянии взаимно уравновешиваются. При приложении к телу внешних сил в нем появляются внутренние силы, уравновешивающие внешние силы. Предел отношения внутренних сил, действующих на какую-либо элементарную площадку, выделенную в рассматриваемой точке тела, к ее площади при неограниченном уменьшении последней называется напряжением. Напряжения графически изображаются векторами (стрелками), направленными в сторону действия напряжений. Напряжения растяжения считаются положительными, а напряжения сжатия — отрицательными.

Представим себе металлическое тело в форме стержня, один конец которого жестко зафиксирован, а к другому концу приложена внешняя нагрузка. В сечении $ABCD$ этого стержня, перпендикулярном его оси, возникает напряжение σ (рис. 3.9), которое

Рис. 3.9. Схема напряженного состояния образца при приложении внешней растягивающей нагрузки



можно определить по зависимости

$$\sigma = P/F, \quad (3.1)$$

где P — равнодействующая внутренних сил; F — площадь сечения $ABCD$.

В сечении $ABFE$, расположенном под углом α к продольной оси стержня, возникает напряжение

$$\sigma_a = P/F_{a^*}, \quad (3.2)$$

где $F_{a^*} = F/\cos \alpha$ — площадь сечения стержня $ABFE$.

Напряжение является величиной векторной и совпадает с направлением внутренних сил, действующих на элементарную площадку. На основании правила параллелограмма напряжение разложим на две составляющие, одна из которых действует в направлении, перпендикулярном площадке, другая — в плоскости площадки. Первую составляющую называют нормальным напряжением и обозначают σ_n , вторую — касательным напряжением и обозначают τ (см. рис. 3.9).

Напряжения, действующие в сечении $ABFE$ (см. рис. 3.9), вычисляют по формулам:

$$\sigma_n = \sigma_a \cos \alpha; \quad (3.3)$$

$$\tau = \sigma_a \sin \alpha. \quad (3.4)$$

С учетом выражений (3.1) и (3.2) и уравнений (3.3) и (3.4) получим значения нормального и касательного напряжений, действующих в сечении $ABFE$:

$$\sigma_n = \sigma \cos^2 \alpha; \quad (3.5)$$

$$\tau = 0,5 \sigma \sin 2\alpha. \quad (3.6)$$

Согласно выражениям (3.5) и (3.6) нормальные и касательные напряжения зависят от угла наклона элементарной площадки к сечению, перпендикулярному действию приложенной нагрузки P (рис. 3.10).

При угле наклона площадки к сечению $\alpha = 45^\circ$ касательные напряжения достигают экстремального значения, так как $\sin 2\alpha = 1$; нормальные напряжения достигают экстремального значения при $\alpha = 0$, так как $\cos^2 \alpha = 1$.

В результате находим

$$\tau_{\max} = 0,5 \sigma; \quad (3.7)$$

$$\sigma_{\max} = P/F. \quad (3.8)$$

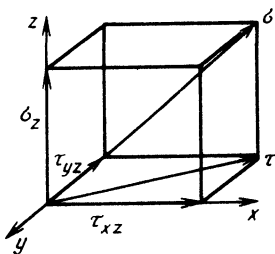


Рис. 3.10. Схема и определение составляющих полного напряжения

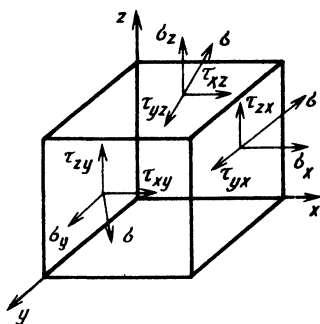


Рис. 3.11. Схемы напряжений на гранях элементарного параллелепипеда

На площадках, перпендикулярных направлению действия приложенной нагрузки, касательные напряжения отсутствуют; действуют только нормальные напряжения. Такие площадки называют главными, действующие на них нормальные напряжения — главными нормальными напряжениями, а направления, вдоль которых действуют главные напряжения, — главными направлениями.

При объемном напряженном состоянии частицу металла представляют в виде элементарного параллелепипеда, на гранях которого действуют касательные и нормальные напряжения (рис. 3.11).

В любой точке элементарного параллелепипеда, выделенного в теле, находящемся в напряженном состоянии, действуют три главных нормальных напряжения: σ_1 , σ_2 и σ_3 , причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (рис. 3.12).

Максимальные касательные напряжения, действующие в диагональных плоскостях элементарного параллелепипеда, определяют по формулам:

$$\tau_{12} = \pm (\sigma_1 - \sigma_2)/2; \quad (3.9)$$

$$\tau_{23} = \pm (\sigma_2 - \sigma_3)/2; \quad (3.10)$$

$$\tau_{31} = \pm (\sigma_3 - \sigma_1)/2. \quad (3.11)$$

Индексы при τ обозначают, полуразность каких главных напряжений равна данному τ и к каким осям плоскость действия этого напряжения наклонена под углом 45° .

Для оценки механических свойств металлов и сплавов важно правильно установить момент перехода их в пластическое состояние и момент начала их разрушения.

При линейном напряженном состоянии это определяется при испытании образцов на разрыв. Как известно, момент перехода металла (сплава) в пластическое состояние характеризуется пределом текучести, а начало разрушения — временным сопротивлением.

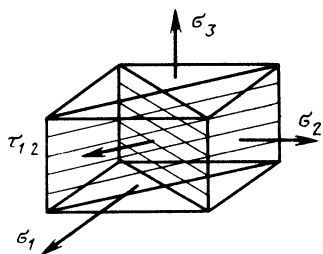


Рис. 3.12. Схема действия главных напряжений

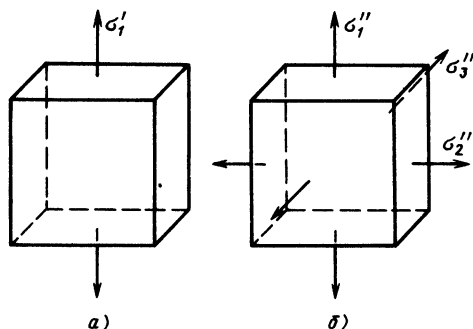


Рис. 3.13. Схемы линейного (а) и объемного (б) напряженных состояний

При объемном напряженном состоянии (например, при растяжении круглого образца с кольцевой проточкой) нельзя точно определить момент начала пластической деформации, поэтому для оценки момента перехода металла или сплава из упругого состояния в пластическое устанавливают критерий предельного состояния.

Существуют четыре гипотезы предельных состояний: наибольших нормальных напряжений, наибольших линейных деформаций, максимальных касательных напряжений и энергии формоизменения.

Согласно гипотезе наибольших нормальных напряжений линейное и объемное напряженные состояния считают эквивалентными, если наибольшие главные напряжения равны, т. е. (рис. 3.13):

$$\sigma'_1 = \sigma''_1. \quad (3.12)$$

По гипотезе максимальных касательных напряжений линейное и объемное напряженные состояния считают эквивалентными, если максимальные касательные напряжения, действующие в каждом из образцов, равны между собой:

$$\tau'_{\max} = \frac{\sigma'_1}{2}; \quad (3.13)$$

$$\tau'_{\max} = \frac{\sigma''_1 - \sigma''_3}{2}; \quad (3.14)$$

$$\sigma'_1 = \sigma''_1 - \sigma''_3. \quad (3.15)$$

На основании гипотезы наибольших линейных деформаций линейное и объемное напряженные состояния считают эквивалентными при условии равенства наибольших деформаций:

$$\epsilon = \sigma'_1/E; \quad (3.16)$$

$$|\epsilon_{\max}| = \frac{\sigma''_1}{E} - \nu \left(\frac{\sigma''_2}{E} + \frac{\sigma''_3}{E} \right), \quad (3.17)$$

откуда

$$\sigma'_1 = \sigma'_1 - \mu(\sigma'_2 + \sigma'_3), \quad (3.18)$$

где E — модуль упругости металла образца; μ — коэффициент Пуассона образца.

По гипотезе энергии формоизменения линейное и объемное напряженные состояния считают эквивалентными при условии равенства энергий, затраченных на изменение формы элементарного объема при объемном и линейном напряженных состояниях.

Это условие выражается зависимостью

$$\sigma'_1 = \sqrt{0,5(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1) + (\sigma'_2 - \sigma'_3)}. \quad (3.19)$$

Лучшие результаты дают зависимости (3.13)—(3.15).

Зависимость (3.12) целесообразно применять для испытания хрупких материалов, так как она дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

3.3. Упругая и пластическая деформации

При действии на металл внешней нагрузки он ведет себя либо как упругое тело, либо как пластическое. Деформация считается упругой, если она исчезает после снятия внешней нагрузки, и пластической, если деформация полностью не исчезает.

При упругой и пластической деформации количественная оценка процесса характеризуется показателями деформации, которые определяют изменение линейных размеров тела, изменение углов и площадей.

Линейная деформация — это изменение какого-либо одного размера деформируемого тела.

Угловая деформация характеризует изменение угла между двумя линиями, проведенными в деформируемом теле. Угловое изменение (деформация) деформируемых элементов тела называют еще деформацией сдвига.

Объемные деформации — это изменение объема деформируемого тела. Поверхностные деформации — это изменение площади какого-либо сечения или участка поверхности деформируемого тела.

Деформации различают абсолютные, относительные и логарифмические.

Абсолютной деформацией называют абсолютное изменение какого-либо линейного размера, углового размера, площади сечения или участка граничной поверхности элемента деформируемого тела.

Относительная деформация характеризуется отношением абсолютной деформации к начальному размеру деформируемого изделия. Относительная деформация по высоте определяется как

$$\varepsilon_h = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (3.20)$$

где h_0 и h — высота изделия соответственно до и после деформации.

Относительная поперечная деформация

$$\epsilon_b = \frac{b - b_0}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad (3.21)$$

где b_0 и b — ширина изделия соответственно до и после деформации.

Относительная продольная деформация

$$\epsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3.22)$$

где l_0 и l — длина изделия соответственно до и после деформации.

Относительное изменение площади поперечного сечения находят по формуле

$$\psi = \frac{S - S_0}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0}, \quad (3.23)$$

где S_0 и S — площадь поперечного сечения соответственно до и после деформации.

Логарифмическая деформация является разновидностью относительной деформации и представляет собой натуральный логарифм отношения измененного размера изделия к первоначальному размеру изделия. Она определяется по формулам

$$\delta_l = \ln \frac{l}{l_0}; \quad (3.24)$$

$$\delta_b = \ln \frac{b}{b_0}; \quad (3.25)$$

$$\delta_h = \ln \frac{h}{h_0}. \quad (3.26)$$

Когда к телу прилагается внешняя нагрузка, вначале оно деформируется упруго. Упругая деформация сопровождается некоторым изменением объема.

После снятия внешней нагрузки упругая деформация исчезает. По мере нагружения тела внешними силами напряжения в нем достигают определенной величины и возникает пластическая деформация, которая остается после снятия внешней нагрузки. Как упругая, так и пластическая деформации осуществляются без разрушения деформируемого тела (без нарушения сплошности). Пластичность металла или сплава можно оценить максимальной пластической деформацией до разрушения деформируемого изделия.

Основным законом пластической деформации является закон постоянства объема, согласно которому объем образца при пластической деформации не изменяется. Эксперименты показали, что объем образца после пластической деформации изменяется по сравнению с исходным образцом, но эти изменения незначительны и ими в практических расчетах пренебрегают.

Изменения объема образца возможны при пластической деформации литой структуры металла и сплава в результате заполнения металлом раковин, пустот, микротрещин.

При значительных степенях деформации при холодной пластической обработке металлов и сплавов наблюдается некоторое увеличение объема в результате появления микротрещин в образце.

При пластической и упругой деформациях образца происходит смещение атомов из состояния устойчивого равновесия. Упругая деформация существует в изделии и при пластической деформации. Установлено, что определенное число атомов под действием внешней нагрузки деформируется упруго, сохраняя при этом свое первоначальное положение, а остальные атомы, вышедшие из первоначального положения, попадают в новое место, при этом не могут войти в состояние устойчивого равновесия в связи с несоответствием в этом месте сил взаимодействия между атомами. В то же время в новом месте кристаллической решетки за счет появления атомов возникают дополнительные напряжения, которые уравниваются внутренними силами. Отсюда следует, что в условиях пластической деформации общая (полная) деформация содержит как пластическую составляющую, так и упругую, которая исчезает после снятия внешней нагрузки.

После снятия деформирующих сил атомы в металле или сплаве стремятся занять положение равновесия и установить исходные межатомные расстояния, поэтому пластическая деформация не может заметно изменить объем деформируемого образца.

Связь между напряжениями и деформациями при упругом деформировании устанавливается законом Гука. Относительная упругая деформация и напряжение в поперечном сечении растягиваемого образца связаны соотношением

$$\varepsilon = \sigma/E, \quad (3.27)$$

где $\varepsilon = \Delta l/l$ — относительная упругая деформация (l — начальная длина образца); σ — напряжение, возникающее в поперечном сечении образца; E — модуль упругости, равный тому напряжению, при котором относительная деформация равна единице, а абсолютное удлинение образца — первоначальной длине.

Графики, построенные по результатам испытаний на растяжение, дали возможность установить связь между деформациями и напряжениями, а также закономерности, сопровождающие процесс растяжения образцов.

На рис. 3.14 приведена зависимость деформации от напряжения при растяжении. Прямая, пропорциональная зависимости между деформацией и напряжением (прямая OA), сохраняется до уровня напряжения $\sigma_{\text{гд}}$ (предел пропорциональности). Угол наклона прямой OA к оси абсцисс характеризует жесткость металла (сплава), т. е. способность металла (сплава) сопротивляться появлению

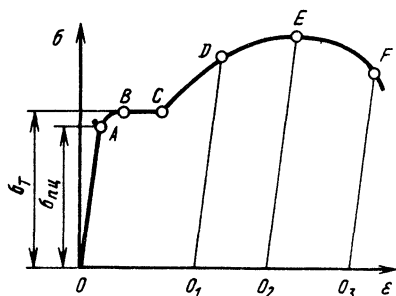


Рис. 3.14. Зависимость деформации от напряжения при растяжении

деформации, и зависит от внутренних сил. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки прямая переходит в кривую. Это говорит о том, что в образце появляются остаточные деформации. Напряжение $\sigma_{0,05}$, превышение которого вызывает незначительные остаточные деформации (0,001—0,05 %) (участок кривой AB), называют пределом упругости.

Выше предела упругости наблюдается резкое повышение деформации, после чего металл (сплав) входит в такое состояние, при котором не требуется увеличивать внешнюю нагрузку для увеличения деформации. В этот момент наступает течение металла образца (участок BC) при относительно постоянной внешней нагрузке, а напряжение σ_T , при котором происходит течение, называют пределом текучести.

При уменьшении нагрузки до напряжения $\sigma_{пл}$ связь между σ и ϵ определится прямой, а если разгружать образец от точек D , E и F , которые находятся за пределом пропорциональности, то зависимости между σ и ϵ будут соответствовать прямые DO_1 , EO_2 и FO_3 , которые можно принять параллельными прямой OA .

После достижения предела текучести при дальнейшем увеличении деформации напряжение возрастает и наибольшего значения оно достигает на графике (точка E) в момент наибольшей нагрузки, которую выдерживает испытуемый образец. Это напряжение называют пределом прочности.

Увеличение нагрузки на образец на участке EF приводит к падению напряжения, а в дальнейшем и к разрушению образца.

На графике (см. рис. 3.14) OO_1 соответствует остаточной (пластической) деформации, OA — упругой деформации, а OO_2 — полной деформации.

Приведенный график не только характеризует упругие и пластические свойства металлов и сплавов, но и позволяет оценить прочностные параметры испытуемого материала.

Для начала пластической деформации в монокристалле необходимо, чтобы касательные напряжения достигли некоторой критической величины. Эти касательные напряжения могут вызвать два основных вида деформации: трансляционное скольжение по некоторым плоскостям кристаллов металла или двойникование.

Трансляционное скольжение (или просто скольжение) наблюдается при холодной и горячей пластической деформациях металлов и сплавов. Трансляционное скольжение — это скольжение одних слоев атомов кристалла по другим слоям (полосы скольжения), причем перемещение происходит на дискретную величину,

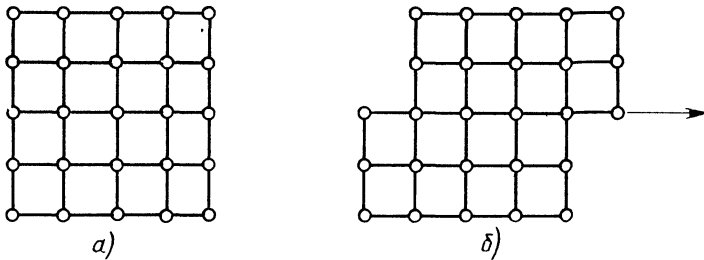


Рис. 3.15. Схема трансляционного скольжения кристалла до деформации (а) и после деформации (б)

равную целому числу атомных связей (рис. 3.15, а и б). При таком скольжении расположение атомов в элементарных ячейках кристалла не изменяется, поэтому не изменяется кристаллическое строение тела. Пластическая деформация такого вида осуществляется не по смежным атомным плоскостям, а по плоскостям, находящимся на больших расстояниях друг от друга. Такая деформация происходит по плоскостям с наиболее плотной упаковкой атомов. Несовершенства кристаллической решетки (дислокации, пустоты и лишние атомы) вносят дополнительные особенности в скольжение слоев. При перемещении дислокаций, например, происходит смещение всех атомов вдоль плоскости скольжения на одно межатомное расстояние (см. рис. 3.15, б).

Двойникование кристалла происходит, когда касательные напряжения достигают критической величины. При этом часть кристаллической решетки поворачивается относительно некоторой плоскости (рис. 3.16, а и б). Каждый слой кристалла при деформации смещается на пропорциональное расстояние, в результате чего монокристалл получает зеркальное отображение первоначального кристалла.

В конечном счете в результате деформации кристаллическое строение сохраняется, и в то же время в процессе деформации оно временно нарушается.

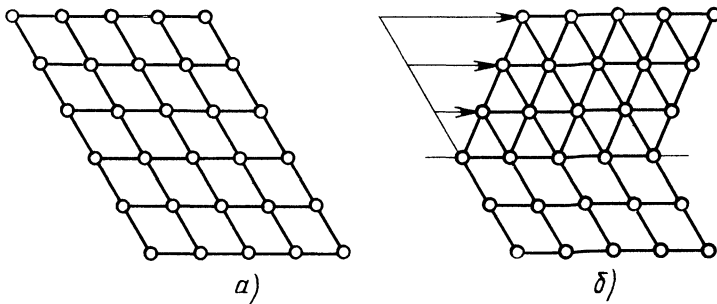


Рис. 3.16. Схема двойникования кристалла до деформации (а) и после деформации (б)

Современные представления о кристалле, полученные многими исследователями, показали, что в реальных кристаллах скольжение осуществляется последовательным смещением отдельных групп атомов, а не одновременным перемещением всех атомов одной плоскости относительно атомов другой плоскости.

Повышение температуры кристалла приводит к скольжению по плоскостям, отличным от плоскостей скольжения, наблюдаемых при комнатной температуре.

У металлов пластическая деформация является в основном результатом скольжения.

Механизм деформации поликристаллов. Поликристалл является более сложным структурным элементом, чем монокристалл, поэтому пластическая деформация поликристалла зависит от размеров и формы его зерен, а также от их относительного смещения. Различают внутрикристаллитную и межкристаллитную деформации кристалла. Некоторые зерна поликристаллов деформируются аналогично монокристаллу при скольжении и двойниковании.

Наличие большого числа зерен в поликристалле обуславливает некоторые особенности пластической деформации. Зерна в поликристалле взаимодействуют друг с другом и поэтому не могут деформироваться свободно, кроме того, между зернами имеются границы, вблизи которых свойства зерен отличаются от свойств их внутренних частей.

Плоскости скольжения в отдельных зернах поликристалла ориентированы в пространстве произвольно. Такая ориентация приводит к тому, что пластическая деформация начинается не одновременно во всех зернах. Вначале она происходит в зернах с наиболее благоприятной ориентацией плоскостей скольжения, при которой плоскости скольжения совпадают с площадками действия наибольших по величине касательных напряжений в данном поликристалле. Другие зерна в это время деформируются упруго и получают небольшие относительные смещения. Для обеспечения возможности деформироваться зернам с неблагоприятной ориентацией в пространстве необходимо повысить внешнюю нагрузку.

Металлы с гранцентрированной решеткой имеют более высокую пластичность, чем металлы с объемно-центрированной решеткой. Это объясняется не только большим числом возможных систем скольжения в кристалле, но и благоприятной ориентировкой плоскостей скольжения в пространстве.

Вблизи границ зерна деформируются в меньшей степени, чем вдали от них. На границах зерен расположены зоны затрудненной деформации. Упрочнение пограничных слоев зерен происходит также в результате затрудненной деформации сдвига взаимодействующих зерен, ориентированных различным образом в пространстве. Установлено, что упрочняющее действие зоны затрудненной деформации увеличивается с увеличением протяженности

границ в поликристалле. Протяженность границ у мелких зерен поликристалла больше, чем у крупных, поэтому, чем мельче зерна, тем затруднительнее пластическая деформация поликристалла. Микропустоты и примеси снижают прочность поликристаллического тела.

В связи с упрочнением на границах зерен холодная пластическая деформация поликристалла происходит вследствие внутрикристаллитной деформации. С увеличением степени деформации повышаются пределы упругости, пропорциональности, текучести, прочности, а также твердость; при этом уменьшаются показатели пластичности — относительное удлинение, относительное сужение площади поперечного сечения образца и ударная вязкость. Наряду с этим увеличивается электрическое сопротивление и уменьшаются коррозионная стойкость и теплопроводность, а также изменяются магнитные свойства металла. Изменение механических свойств металлов и сплавов с увеличением степени деформации в значительной степени объясняется повышением сопротивления смещению дислокации в поликристалле. Упрочнение (наклеп) — это изменение структуры и свойств металлов в процессе пластической деформации.

С помощью упрочнения можно повысить в 2—3 раза предел прочности, предел текучести и твердость, применив холодную обработку давлением (прокатку, ковку, штамповку, обкатку роликами).

При холодной пластической деформации с большими степенями деформации наблюдается искажение кристаллической решетки, и состояние атомов решетки становится менее устойчивым. Для снятия напряжений, полученных в результате холодной деформации, и восстановления искаженной кристаллической решетки изделие нагревают до температур $(0,25—0,30) t_{пл}$. Это явление называют возвратом.

В результате холодной пластической деформации зерна изменяют свою форму: вытягиваются в направлении деформации растяжения, а в направлении деформации сжатия — сжимаются. В результате этого структура металла приобретает волокнистое строение, т. е. наблюдается анизотропия — неоднородность физико-механических свойств в разных направлениях металлического тела. Холодная пластическая деформация может изменить не только форму зерен, но и ориентацию их решетки.

Как известно, зерна в поликристалле до пластической деформации находятся в хаотическом состоянии, а после пластической деформации ориентация решетки изменяется так, что в наибольшем числе зерен их кристаллографические элементы располагаются строго ориентированно, что особенно заметно при деформации около 50 %. Расположение кристаллографических элементов зерен в строго ориентированном направлении в результате деформирования определяет текстуру материала. Она зависит от типа кристаллической решетки обрабатываемого сплава и металла.

При значительных степенях пластической деформации в результате межкристаллитных и внутрикристаллитных нарушений возникают микротрещины, которые снижают пластичность металла.

Холодная пластическая деформация реальных металлов и сплавов, сопровождающаяся внутрикристаллитными и межкристаллитными искажениями, разрушением межзеренных прослоек, появлением текстуры и остаточных напряжений, приводит к изменению коррозионной стойкости, электрической проводимости, модуля упругости, магнитных свойств и теплопроводности.

Доказано, что коррозионная стойкость металла снижается из-за остаточных напряжений, модуль упругости металла увеличивается под влиянием изменения текстуры при наклепе, наклеп ферромагнитов (сплавов железа, никеля и кобальта) приводит к снижению магнитной проницаемости; снижение электрической проводимости в результате наклепа связано с межкристаллитными и внутрикристаллитными искажениями и нарушением межзеренных прослоек.

Для получения изделий из металлов и сплавов с заданными физико-механическими свойствами необходимо учитывать явления, происходящие при холодной пластической деформации.

3.4. Влияние температуры на прочность и пластичность металлов и сплавов

В процессе холодной деформации повышается твердость металлов и сплавов, одновременно с этим снижается их пластичность. Металлы (сплавы) при этом находятся в очень напряженном состоянии и обладают большой внутренней энергией. Атомы таких металлов и сплавов медленно перестраиваются в устойчивую структуру при комнатной температуре.

При повышении температуры упрочненного металла (сплава) происходит его разупрочнение, восстанавливается нормальное структурное состояние металла, а значит и его пластичность. Такие изменения происходят при нагреве металла до определенных температур — температур возврата. Для чистых металлов температура возврата составляет $(0,25—0,30) t_{пл}$ ($t_{пл}$ — температура плавления металла). Присутствие растворимых примесей в металле увеличивает температуру возврата. Возврат повышает коррозионную стойкость металлов и сплавов и резко уменьшает возможность образования трещин в них. В углеродистых сталях при возврате возникает явление старения, сопровождающееся повышением прочности и снижением пластичности сталей.

Изменение механических характеристик металла в процессе старения есть результат выпадения мелкозернистых частиц примесей на плоскости скольжения кристалла. Процесс возврата не изменяет размеры и форму зерен.

Нагрев металла или сплава до высоких температур (выше температуры возврата) создает условия для возрастания подвиж-

ности атомов, что приводит к рекристаллизации (т. е. образованию и росту новых зерен взамен деформированных при холодной деформации).

Различают два вида рекристаллизации: первичная и собирательная.

При первичной рекристаллизации образуются ядра и происходит рост новых зерен с неискаженной кристаллической решеткой поликристалла. Ядра новых зерен образуются у границ и на пересечении границ зерен. На участках искаженной кристаллической решетки атомы перемещаются и восстанавливается форма решетки. Первичная рекристаллизация происходит до полного заполнения объема металла недеформированными зернами.

Для чистых металлов температура начала рекристаллизации наблюдается при $t_{рек} = 0,4t_{пл}$. При рекристаллизации увеличивается диффузия атомов как внутри кристаллов, так и по границам зерен. Это способствует выравниванию химической неоднородности зерен и восстановлению поврежденных зерен в результате межкристаллитной деформации.

Размеры зерен после рекристаллизации находятся в прямой зависимости от времени выдержки нагретого металла при температурах, превышающих температуру первичной рекристаллизации. При значительной выдержке при температуре собирательной рекристаллизации одни зерна растут за счет объединения с другими вследствие перехода атомов через границы зерен.

Для снятия деформационного упрочнения применяют рекристаллизационный отжиг для сталей при температурах 600—700 °С, для латуни и бронзы — при температурах от 560 до 700 °С, для алюминия — от 350 до 450 °С.

Температура рекристаллизации обратно пропорциональна степени деформации металла: чем больше степень деформации, тем ниже температура рекристаллизации, а чем больше степень деформации, тем меньше размер зерна после отжига (рис. 3.17).

Увеличение температуры нагрева металла (сплава) приводит к существенному изменению его механических свойств. С повышением температуры уменьшается сопротивление пластической деформации. При нагреве, например, углеродистых сталей до 100 °С уменьшается сопротивление деформированию и увеличивается пластичность. При повышении температуры до 300 °С значительно уменьшается пластичность и ударная вязкость, а также возрастает прочность стали. Эту температуру называют температурой синеломкости стали, что связано с выпадением мельчайших частиц карбидов по плоскости скольжения.

Дальнейшее повышение температуры стали приводит к значительному уменьшению прочности: так, при температурах 800—1000 °С предел прочности сталей уменьшается примерно в 10 раз. При этом пластичность возрастает несколько меньше.

Уменьшение пластичности сталей в области температур фазовых превращений связано с наличием в деформируемом металле

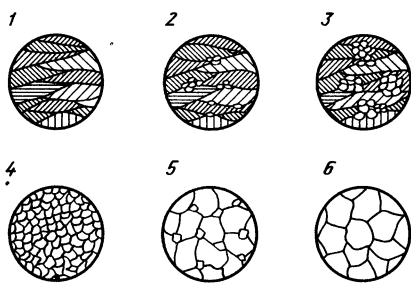


Рис. 3.17. Зависимость механических свойств и структуры холоднодеформированного металла от рекристаллизационного отжига

одновременно двух фаз с различными свойствами, что приводит к увеличению неравномерности напряженного состояния металла. В области температур ниже температуры плавления сталей или сплавов пластичность резко снижается, что является результатом роста зерен и образования окислов по границам зерен (окислительные удлинение и сужение растут с повышением температуры).

Пластичность сталей при высоких температурах связана с содержанием серы. У мягких конструкционных сталей, которые содержат до 0,4 % С и 0,25—0,5 % Мп, 0,25 % S и выше, появляется хрупкость при деформировании с 1070 °С и выше. При температурах ниже 1070 °С стали с указанным содержанием серы пластически деформируются удо-

влетворительно, а стали, содержащие меньше 0,15 % S, становятся хрупкими после нагрева до 1030 °С и выше. У большинства сталей и сплавов, начиная с температуры их нагрева 600—700 °С, площадка текучести на диаграмме напряжение — деформация, полученной при испытании на растяжение, отсутствует, поэтому нагрев до этих температур и выше даже при небольших нагрузках, действующих длительное время, приводит к возникновению пластической деформации. Свойство сталей пластически деформироваться под влиянием длительно действующих внешних нагрузок называют ползучестью или крипом. Сопротивление разрыву в таких условиях зависит от длительности испытания, оно уменьшается с увеличением времени действия нагрузки.

Ударная вязкость сталей растет с повышением температуры до 100—200 °С, а затем вязкость уменьшается, достигая минимума для α-состояния стали при температурах 350—450 °С. За этим снижением ударной вязкости начинается увеличение ее значения вплоть до нижней критической точки нагрева стали при отжиге. Ударная вязкость сталей и сплавов в области высоких температур

падает. Это явление называют красноломкостью. Красноломкость, однако, не свидетельствует о плохой пластичности металла при этих температурах.

Все металлы и сплавы имеют наибольшую пластичность при температурах рекристаллизации, при которых наблюдаются наименьшие прочность и сопротивление деформированию.

3.5. Сведения о процессе разрушения

Надежность изделий в большой степени определяется способностью материала изделия противостоять разрушению. Разрушение — это макроскопическое нарушение сплошности материала в результате тех или иных воздействий на него.

Долгое время считалось, что процесс разрушения происходит мгновенно при возникновении в изделии максимальных напряжений. Однако позднее было установлено, что разрушение может развиваться в изделии задолго до достижения максимальной нагрузки. С появлением высокопрочных металлов и сплавов было установлено, что такие механические характеристики материала, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость и др., не всегда достаточно точно определяют конструкционную прочность изделия.

Изучение макро- и микроструктуры излома испытуемого материала позволяет оценить сопротивляемость материала распространению трещины.

Разрушение может быть вязким и хрупким. Между вязким и хрупким разрушением имеются существенные отличия.

Характер разрушения определяется энергией процесса разрушения при том или ином виде нагружения. Вязкому разрушению соответствует большая энергия (большая работа, затрачиваемая на распространение трещин). Энергия хрупкого разрушения мала (работа, затрачиваемая на распространение трещин, близка к нулю). При вязком разрушении скорость распространения трещины мала, а при хрупком разрушении скорость распространения трещины близка к скорости звука.

Вязкое и хрупкое разрушения различаются характером поверхностного излома изделия. Волокнистый излом характерен для вязкого разрушения, а кристаллический излом изделия — для хрупкого разрушения. При испытании высокопрочных металлов и сплавов характер излома необходимо определять на электронном микроскопе по тонкой структуре, так как визуально определить характер разрушения на таких материалах трудно. Вязкое разрушение характеризуется волокнистым (чашечным) изломом, а хрупкое — кристаллическим (ручьистым) изломом.

Для большинства конструкционных материалов переход от вязкого состояния к хрупкому осуществляется в интервале температур хладноломкости. Температурный интервал изменения характера разрушения называется порогом хладноломкости. Ин-

тервал температур между верхним и нижним порогами хладноломкости определяется разбросом значений ударной вязкости (работы разрушения), изменением макро- и микроструктуры излома.

Для металлов и сплавов характерны два вида кристаллического разрушения — транскристаллитное и интеркристаллитное. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по зерну в поликристаллическом материале, а при интеркристаллитном разрушении — по границам зерен. Межзеренное разрушение — хрупкое. Хрупкое разрушение аустенитных хромоникелевых сталей происходит с выделением карбидов по границам зерен, конструкционных легированных сталей — в состоянии отпусковой хрупкости, железа — при повышенном содержании кислорода, а стали — в состоянии перегрева при термической обработке.

Хрупкое транскристаллитное разрушение распространяется вдоль простой кристаллографической плоскости — плоскости скола внутри отдельных зерен поликристалла. Хрупкое разрушение является неуправляемым процессом, происходящим с большой скоростью, поэтому оно представляет наибольшую опасность для работающих. Необходимо знать признаки и уметь предсказывать хрупкое разрушение.

Разрушение изделия происходит в две стадии: зарождение трещины и ее распространение. Трещины возникают в основном в процессе пластической деформации, предшествующей разрушению.

Установление механизма зарождения трещин возможно на основе дислокационной теории кристаллических твердых тел. Возможны три вида моделей зарождения трещин. К первому виду относятся модели, в которых скопления дислокаций образуются в некоторых плоскостях скольжения поликристалла. Образование скоплений возникает как результат встречи дислокаций с препятствиями, что приводит к концентрации напряжений, достаточной для образования трещин. Препятствиями могут быть границы двойников, субзерен, зерен, межфазные границы в гетерогенных структурах, инородные включения.

Ко второму виду относятся модели, в которых появление микротрещин связано с образованием скоплений дислокаций в процессе пластической деформации и взаимодействием дислокаций, расположенных в пересекающихся плоскостях скольжения.

К третьему виду относятся безбарьерные модели образования трещин: на базе взаимодействия дефектов кристаллической решетки (вакансий); в результате возникновения растягивающих напряжений от двух скоплений дислокаций противоположного знака, расположенных в параллельных плоскостях скольжения. Установлены случаи, когда трещина образуется внутри дислокационного скольжения, а не перед ним. Скопление дислокаций перед препятствием приводит к изгибу атомных плоскостей, парал-

лельных плоскости скольжения, и сопровождается образованием трещины в плоскости скольжения.

Основой механизма разрушения хрупкого тела является так называемая «линейная механика разрушения». Согласно этой теории источником разрушения хрупких аморфных тел являются микроскопические трещины в материале в исходном состоянии. Эти зародышевые трещины не увеличиваются, если отсутствуют условия для их развития. Как только трещина достигает критического размера, она увеличивается без дальнейшего увеличения нагрузки, затем происходит разрушение изделия.

Контрольные вопросы

1. Назовите типы кристаллических решеток металлов.
2. Какие напряжения действуют в элементарном объеме?
3. Какие существуют деформации при нагружении образца внешними силами?
4. Назовите виды разрушений металлических изделий.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

4.1. Классификация методов испытаний

Механические испытания — определение механических свойств материалов и изделий на образцах в строго регламентированных условиях (скорость, среда, температура, время, схема приложения механической нагрузки и др.). Осуществление механических испытаний и сравнение их результатов для отдельных изделий и их групп связано с анализом признаков, характеризующих этапы подготовки и проведения испытаний, требования к оборудованию и приборам для испытаний.

Классификацию механических испытаний проводят по следующим признакам:

а) способу и времени действия нагрузки (статические, динамические, усталостные);

б) типу и схеме приложения нагрузки (на растяжение, сжатие, изгиб, кручение);

в) температуре, при которой проводят испытания (при нормальной, пониженной или повышенной температуре).

Методы механических испытаний регламентированы государственными стандартами: испытания металлов и сплавов на твердость, растяжение, ударную вязкость, сжатие, изгиб и др.

Объективная оценка механических свойств материалов и изделий возможна только с помощью машин и приборов, прошедших аттестацию, т. е. проверенных и признанных годными к испытаниям специальными органами Госстандарта СССР.

4.2. Статические испытания

Нагрузка на образец при статических испытаниях возрастает медленно и плавно или остается постоянной в течение длительного времени. При этом в процессе нагружения образца ускорение движущихся частей испытательной машины настолько мало, что возникающими в них силами инерции пренебрегают.

К статическим испытаниям металлов и сплавов относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытания на растяжение. Методы испытаний на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них регламентируются ГОСТ 1497—84. Испытания на растяжение проводят при темпера-

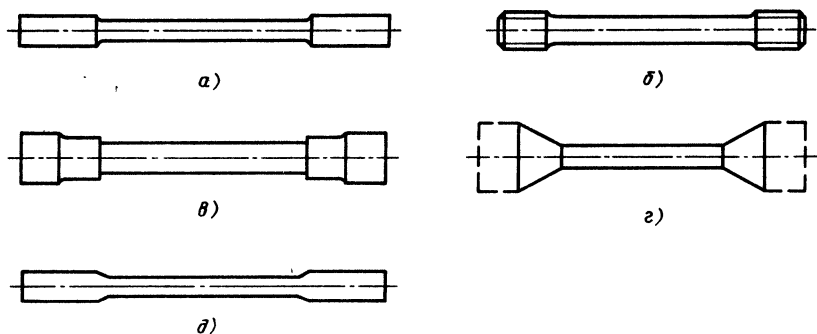


Рис. 4.1. Образцы для испытания на растяжение металлов:

а, б, в и г — цилиндрические образцы с гладкими (а), резьбовыми (б), ступенчатыми (в) и коническими (г) головками; д — плоский образец

туре (20^{+15}_{-10}) °С. При растяжении образцов определяют следующие механические характеристики материала: предел пропорциональности; предел упругости; модуль упругости; предел текучести физический; предел текучести условный; временное сопротивление; относительное равномерное удлинение; относительное удлинение после разрыва; относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Испытания на растяжение заключаются в закреплении цилиндрических или плоских образцов в захватах испытательной машины и растягивании их под действием постепенно возрастающей нагрузки. Обычно испытания на растяжение проводят в статическом режиме, когда в любой момент испытания соблюдается равенство сил, приложенных к образцу и силоизмерительному устройству испытательной машины. Испытание на растяжение является наиболее универсальным по сравнению с другими видами испытаний, так как оно позволяет определять механические свойства материала на всех стадиях его деформации (от упругой деформации до разрушения).

Разрывная машина оснащена специальным регистрирующим прибором, автоматически вычерчивающим диаграмму растяжения — зависимость удлинения образца от прилагаемой нагрузки. При испытании на растяжение определяют нагрузку и удлинение (деформацию). Испытания проводят на стандартных образцах с соблюдением соответствующих методик по проведению испытаний.

Образцы для испытаний на растяжение. Размеры и типы образцов установлены ГОСТ 1497—84, а правила отбора образцов установлены ГОСТ 7564—73. Испытания на растяжение проводят на образцах с гладкими зажимными головками (плоскими или цилиндрическими), используя клиновые зажимные приспособления (рис. 4.1). На внутренней стороне захватов приспособления имеется насечка, которая прочно удерживает головку образца

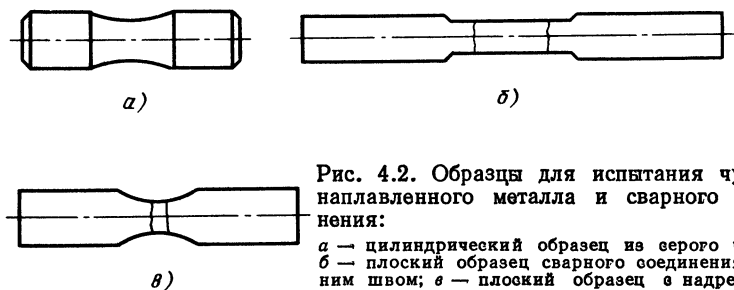


Рис. 4.2. Образцы для испытания чугуна, наплавленного металла и сварного соединения:

a — цилиндрический образец из серого чугуна; *b* — плоский образец сварного соединения в одном швом; *v* — плоский образец в надрезом во сварным швом

при приложении к нему нагрузки. Для точных измерений (например, при определении предела текучести) или для испытания при низких или повышенных температурах используют образцы с резьбовой головкой, головкой с буртиком или конусной головкой. В отдельных случаях допустимо использовать нестандартные образцы, например, для испытания хрупких металлов (пластинчатый чугун) используют короткие массивные образцы (рис. 4.2, *a*), так как удлинение образцов при испытании не измеряют.

Для испытания наплавленного металла и сварного соединения применяют образцы, показанные на рис. 4.2, *b* и *v*.

Стандартные образцы с расчетной длиной $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ считают короткими, а образцы с $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$ — длинными. Для цилиндрических образцов рабочая длина должна составлять от $l_0 + 0,5d_0$ до $l + 2d_0$, для плоских образцов — от $l_0 + 1,5\sqrt{F}$ до $l_0 + 2,5\sqrt{F_0}$. Применение коротких образцов предпочтительнее.

Подготовка образцов к испытанию. Подготовка образцов к испытанию начинается с их контроля (осмотр внешнего вида, оценка шероховатости их поверхности и измерение размеров). Образцы с механическими повреждениями, заусенцами, неправильной маркировкой, с нарушением требований к шероховатости поверхности, а также с размерами, превышающими допустимые, к испытанию не допускаются. Размеры поперечного сечения образца контролируют микрометром с ценой деления 0,01 мм, длину образца — штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм.

Диаметр (сторону) цилиндрического (плоского) образца, если он не превышает 10 мм, измеряют с погрешностью до 0,01 мм, а при больших размерах — до 0,05 мм. Размеры поперечного сечения плоских образцов толщиной до 2 мм измеряют с помощью микрометра с погрешностью до 0,01 мм и до 0,05 мм при большей толщине образца. Длину образца измеряют с погрешностью до 0,1 мм.

Начальную расчетную длину l_0 с погрешностью до 1 % ограничивают на рабочей длине образца кернами или рисками с помощью штангенциркуля и разметочного приспособления. Измере-

ние размеров образцов проводят в трех местах: в средней части и на границах рабочей длины образца. По наименьшему из полученных результатов измерений определяют начальную площадь F_0 поперечного сечения образца в его рабочей части с отклонением не более 0,01 мм². Результаты измерений заносят в протокол испытаний.

Выбор испытательных машин. Испытание образцов на растяжение осуществляют на серийно выпускаемых испытательных машинах, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ 7855—84.

Тип испытательной машины, шкалу силоизмерителя и скорость нагружения определяют исходя из следующих условий: наименьшая предельная нагрузка машины должна составлять 0,2 нижнего диапазона нагружения, но не более 0,04 от наибольшей предельной нагрузки; скорость нагружения образца должна быть от 1,0 до 30,0 МПа·с⁻¹.

Испытания образцов на растяжение при нормальной температуре проводят в диапазоне 15—30 °С. Наибольшую предельную нагрузку рассчитывают исходя из площади поперечного сечения рабочей части образца и ориентировочных значений временного сопротивления. Например, для горячекатаной и ковальной стали, выпускаемой в виде прутков круглого или квадратного сечения, полос, толстых листов и кованых цилиндров (шайб), $\sigma_{вр} = 900$ МПа; для холоднотянутой шлифованной стали со специальной отделкой поверхности (серебрянки), ленты и тонкого листа $\sigma_{вр} = 1300$ МПа.

Наименьшее сечение имеют образцы стального прутка со специальной отделкой поверхности диаметром 3 мм. Максимальная нагрузка для образцов этого диаметра $P_{max} = F\sigma_{вр} = 3^2 \cdot 3,14 \cdot 130 = 36\,780$ Н, поэтому машина для растяжения должна иметь максимальное усилие не более $P_{max} = 3678/0,04 = 919\,500$ Н и шкалу силоизмерителя не более 10 000 Н. Скорости нагружения составляют от 0,5 до 100 мм/мин. Аналогично выбирают испытательные машины для толстых листов, кованых цилиндров и других образцов из сталей и сплавов.

Подготовка машины к испытанию состоит в следующем:

- 1) установить захваты или выбрать приспособление для крепления образцов;
- 2) установить шкалу силоизмерителя;
- 3) подготовить записывающий прибор (диаграммный аппарат);
- 4) определить масштаб записи диаграммы;
- 5) заправить ленту и перо (подготовить самописец диаграммы);
- 6) убрать с машины посторонние предметы;
- 7) включить двигатель машины и опробовать ее без нагрузки для проверки влияния перемещения подвижных частей машины на чувствительность силоизмерительного устройства, стрелку которого необходимо установить на нуль шкалы и поставить перо

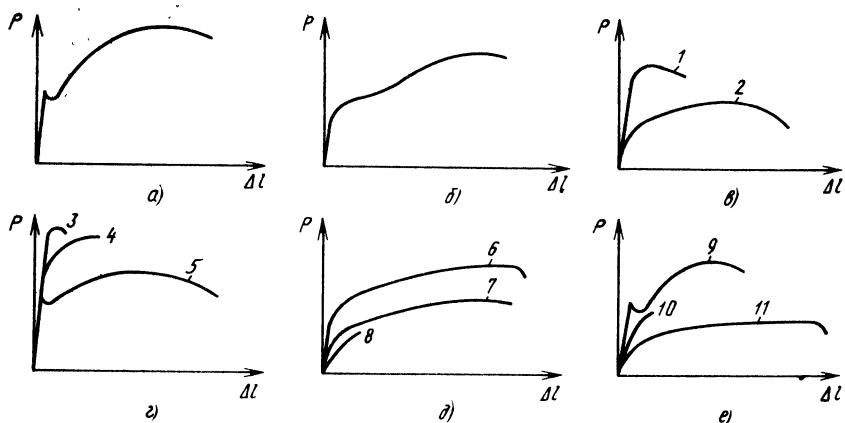


Рис. 4.3. Типовые диаграммы растяжения различных металлов:

a — углеродистая сталь; *б* — аустенитная сталь; *в* — медь холоднодеформированная (1) и рекристаллизационная (2); *г* — углеродистая закаленная сталь (3), улучшенная (4) и отожженная (5); *д* — чугун с шаровидным графитом (6), с пластинчатым графитом (7), ферритный ковкий чугун (8); *е* — высокоуглеродистая сталь (9), серый чугун (10), алюминий (11)

записывающего прибора на нулевую отметку, а также проверить действие тормозного устройства силоизмерителя;

8) установить рабочий стол (траверсу) машины в положение, необходимое для фиксации испытательного образца;

9) при включенной машине установить образец, соосно закрепив головки (захваты для крепления образца).

Проведение испытаний. Установив образец на машине и выбрав зазоры, медленно нагружают образец, через 3—7 с увеличивают нагрузку на образец до заданного (выбранного) значения. Нагрузку следует увеличивать плавно, чтобы испытатель (лаборант) мог следить за положением стрелки силоизмерителя относительно шкалы в любой момент испытания, при нарушении плавности возрастания нагрузки следует снизить скорость нагружения. После разрыва образца немедленно выключают машину, записав максимальную нагрузку, снимают образец и диаграмму. Стол (траверсу) и стрелку силоизмерителя возвращают в исходное положение. Рабочее пространство машины очищают от осколков образца и от масла, после этого приступают к испытанию следующего образца.

Типовые диаграммы растяжения различных материалов приведены на рис. 4.3.

Результаты испытаний записывают в соответствующие графы протокола. В протоколе указывают марку стали или сплава, число образцов, тип испытательной машины, масштаб измерения, а также скорость нагружения образца.

Для каждого образца в протоколе записывают его порядковый номер и условное обозначение (клеймо), а также размеры расчет-

ной части образца до испытания (начальную расчетную длину l_0 , диаметр d_0 рабочей части цилиндрического образца или начальную толщину a_0 и начальную ширину b_0 плоского образца). Кроме того, в протоколе испытаний записывают также рассчитанную начальную площадь поперечного сечения образца F_0 . После разрыва образца измеряют и заносят в протокол размеры образца: l_k , d_k , a_k , b_k , F_k , а также указывают максимальную нагрузку P_{\max} и нагрузки $P_{\text{щ}}$ и $P_{0,2}$, соответствующие пределу пропорциональности и условному пределу текучести.

Определение предела упругости и модуля упругости при испытании на растяжение. Предел упругости $\sigma_{0,05}$ — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % от первоначальной длины образца. Предел упругости характеризует прочность металлических материалов в области очень малых деформаций. Он используется для расчета размеров конструкций и изделий, которые подвергаются статическим нагрузкам, и позволяет сравнить свойства различных материалов в разных состояниях.

Предел упругости $\sigma_{0,05}$ определяют с помощью тензометров (прибор для измерения деформации) при разгрузке и нагрузке (расчетный способ) и графическим способом по начальному участку диаграммы растяжения, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации.

При определении предела упругости $\sigma_{0,05}$ способом разгрузки после установки тензометра на нагрузку на образец постепенно увеличивают до значения, в 2 раза превышающего начальное P_0 (соответствующее напряжению, равному 5—10 % предполагаемого предела упругости $\sigma_{0,05}$), и после выдержки в течение 5—7 с разгружают до начальной нагрузки, затем увеличивают до значения, соответствующего напряжению, равному 70—80 % предполагаемого предела упругости $\sigma_{0,05}$. Далее нагружение проводят ступенями с выдержкой на каждой ступени 5—7 с и с последней разгрузкой образца до начальной нагрузки P_0 с измерением остаточного удлинения после разгрузки.

Испытание прекращают, если остаточное удлинение образца после разгрузки превысит установленный допуск.

По результатам испытаний определяют нагрузку $P_{0,05}$, по которой вычисляют предел упругости $\sigma_{0,05}$. Предел упругости $\sigma_{0,05}$, МПа, определяют по формуле

$$\sigma_{0,05} = P_{0,05}/F_0. \quad (4.1)$$

При определении предела упругости $\sigma_{0,05}$ при нагрузке с допуском на полное удлинение (упругое и остаточное) образец после установки на него тензометра нагружают равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70—80 % предполагаемого предела упругости $\sigma_{0,05}$. Затем нагружение проводят более мелкими ступенями с выдержкой не более 7 с.

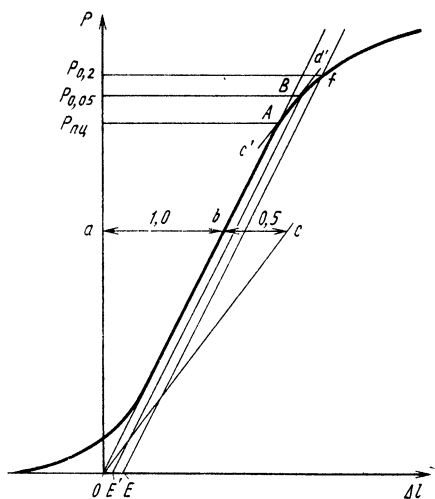


Рис. 4.4. График и определение $\sigma_{\text{пц}}$ и $\sigma_{0,2}$

Для определения изменения длины образца l_0 и коэффициента усиления $K_{\text{усил}}$ тензомера, которое соответствует остаточному удлинению, равному 0,05 % начальной расчетной длины образца ($\Delta l_{0,05} = 0,0005 l_0 K_{\text{усил}}$, мм). Полученное значение откладывают по оси абсцисс вправо от начала координат O диаграммы. Для определения нагрузки $P_{0,05}$ при остаточном удлинении образца $\Delta l_{0,05}$ от прямой OA проводят параллельную ей прямую. Точка пересечения этой прямой с диаграммой растяжения дает искомую нагрузку $P_{0,05}$. Затем по формуле (4.1) определяют предел упругости $\sigma_{0,05}$. Если при снятии диаграммы растяжения приложенная предварительная нагрузка на образец не проявляется на кривой, то при расчете $\sigma_{0,05}$ ее не обязательно прибавлять к найденному графическим способом значению $P_{0,05}$. Если прямая пропорциональности (прямая Гука) начинается не в точке O кривой растяжения, необходимо выполнить корректировку начала отсчета путем продолжения прямой диаграммы растяжения до пересечения ее с осью абсцисс (осью Δl).

Определение модуля упругости. Модуль упругости E представляет собой постоянную материала, характеризующую обусловленную нагрузкой деформацию конструкции или детали в пределах действия закона Гука. Модуль упругости важен при расчетах на прочность, жесткость, устойчивость конструкций. Модуль упругости определяют как отношение растягивающего напряжения к упругой деформации

$$E = \sigma/\varepsilon. \quad (4.2)$$

Определяют допуск на полное удлинение образца суммированием определенного среднего упругого удлинения и подсчитанного остаточного удлинения. Определяют нагрузку $P_{0,05}$, соответствующую установленному допуску на полное удлинение образца. Затем по формуле (4.1) определяют предел упругости $\sigma_{0,05}$.

Определение предела упругости $\sigma_{0,05}$ графическим способом проводят по начальному участку диаграммы растяжения, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации (рис. 4.4). С помощью снятой диаграммы растяжения

На диаграмме растяжения модуль упругости можно представить как тангенс угла наклона прямой — начального участка диаграммы растяжения. Основой для расчета модуля упругости является закон Гука, т. е. графический способ, но в тех случаях, когда нет диаграммы нагрузки—удлинение, но зафиксировано удлинение образца под нагрузкой, модуль упругости определяют расчетным способом.

Модуль упругости E , МПа, вычисляют по формуле

$$E = \frac{\Delta P l_0}{\Delta l_{cp} F_0} \quad (4.3)$$

Тензомер или измеритель деформации устанавливают на образец после приложения к нему начальной нагрузки P_0 , соответствующей напряжению, равному 10—15% предполагаемого предела пропорциональности $\sigma_{пц}$. Затем нагрузку на образец увеличивают равными ступенями до значения, соответствующего напряжению, равному 70—80% предполагаемого предела пропорциональности $\sigma_{пц}$. Ступень нагружения должна составлять 5—10% предполагаемого предела пропорциональности $\sigma_{пц}$. По результатам нагружения и деформации определяют среднее приращение удлинения образца Δl_{cp} (мм) на ступень нагружения ΔP , Н.

Определение предела пропорциональности. Предел пропорциональности — напряжение, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука. Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ при растяжении образца определяют с помощью тензомеров (расчетный способ) и графическим способом по начальному участку диаграммы, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации.

Расчетный способ заключается в следующем. После приложения к образцу начальной нагрузки P_0 , соответствующей напряжению, равному 5—10% предполагаемого предела пропорциональности $\sigma_{пц}$, устанавливают измеритель деформации на образец. Затем опять проводят нагружение образца равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению, равному 70—80% $\sigma_{пц}$. Число ступеней нагрузки должно быть не менее 4. Время выдержки на каждой ступени до 5—7 с. Далее нагружение проводят более мелкими ступенями до момента, когда приращение удлинения для малой ступени нагружения превысит среднее значение приращения удлинения (при той же ступени нагрузки). Определяют среднее значение приращения удлинения на малую ступень нагружения. Найденное значение приращения удлинения увеличивают в соответствии с принятым допуском. Определяют нагрузку $P_{пц}$ на образец, соответствующую подсчитанному приращению удлинения. Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\sigma_{пц} = P_{пц}/F_0 \quad (4.4)$$

Определение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ графическим способом проводят по начальному участку диаграммы растяжения, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации. Для этого определяют нагрузку $P_{\text{пц}}$ следующим образом (см. рис. 4.4). На начальном участке диаграммы, соответствующем упругой деформации образца, через точку, находящуюся примерно на середине участка, проводят горизонтальную линию. Отрезок ab принимают за единицу. На продолжении линии, вправо от точки b , откладывают отрезок bc , равный половине отрезка ab . Точку c соединяют с точкой O . Затем проводят касательную $d'd'$ к диаграмме растяжения, параллельную Oc . Ордината точки касания A определяет нагрузку $P_{\text{пц}}$, соответствующую пределу пропорциональности. Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ определяют по формуле (4.4).

Определение предела текучести физического $\sigma_{\text{т}}$. Предел текучести физический — наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки.

Предел текучести физический $\sigma_{\text{т}}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{т}} = P_{\text{т}}/F_0. \quad (4.5)$$

Существуют предел текучести физический $\sigma_{\text{т}}$, верхний предел текучести $\sigma_{\text{тв}}$ и нижний предел текучести $\sigma_{\text{тн}}$. Им соответствуют нагрузки $P_{\text{т}}$, $P_{\text{тв}}$ и $P_{\text{тн}}$.

Предел текучести определяют при растяжении образца под действием непрерывно и плавно возрастающей нагрузки. Показание силоизмерителя в момент заметного падения (на рычажных машинах) нагрузки или остановки указательной стрелки — это нагрузка $P_{\text{т}}$, соответствующая пределу текучести.

Предел текучести физический можно определить по диаграмме растяжения, записанной на испытательной машине, если 1 мм диаграммы по оси нагрузок соответствует напряжению не более 10 МПа (1 кгс/мм²). Нагрузкой $P_{\text{т}}$ в этом случае считают нагрузку, соответствующую точке на кривой, где длина образца начинает увеличиваться при постоянной нагрузке (рис. 4.5).

Определение предела текучести условного $\sigma_{0,2}$. Под пределом текучести условным понимают напряжение, при котором остаточное удлинение образца соответствует 0,2 % его начальной длины.

Для металлов, не имеющих четко выраженного предела текучести, применяют предел текучести условный $\sigma_{0,2}$.

Предел текучести условный определяют расчетным или графическим способом. Определение предела текучести условного расчетным способом проводят аналогично определению предела упругости с той лишь разницей, что нагрузку $P_{0,2}$ определяют исходя из соответствия ее пределу текучести условному $\sigma_{0,2}$.

Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0. \quad (4.6)$$

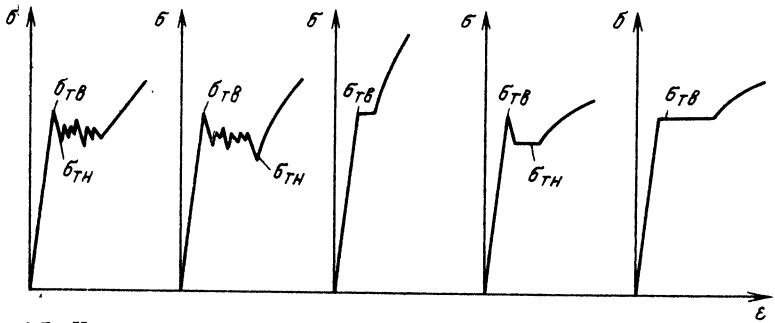


Рис. 4.5. Кривые пределов текучести

Нагрузку, соответствующую пределу текучести условному, при графическом способе находят следующим образом. На горизонтальной прямой откладывают отрезок OE , равный $0,002 l_0 M$, где M — масштаб диаграммы растяжения по оси деформации образца (см. рис. 4.4). Через точку E параллельно участку диаграммы Ob проводят прямую, которая пересекает диаграмму в точке f . Ордината Of определяет нагрузку $P_{0,2}$, соответствующую пределу текучести условному. Используя найденное значение $P_{0,2}$ по диаграмме растяжения, по формуле (4.6) находят предел текучести условный $\sigma_{0,2}$.

Определение временного сопротивления σ_b . Временное сопротивление является основным показателем прочности металла и представляет собой напряжение в образце, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Временное сопротивление σ_b , МПа, вычисляют по формуле

$$\sigma_b = P_{\max}/F_0. \quad (4.7)$$

Для определения временного сопротивления σ_b образец подвергают растяжению под действием плавно возрастающей нагрузки до разрушения. Наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца, принимают за нагрузку P_{\max} , соответствующую временному сопротивлению образца.

Временное сопротивление вычисляют с точностью до 5 МПа, если оно не превышает 500 МПа, и до 1,0 МПа, если оно больше 500 МПа.

Относительное удлинение образца после разрыва (δ). Относительное удлинение — отношение приращения расчетной длины образца l_k — l_0 после разрушения к начальной расчетной длине, %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100. \quad (4.8)$$

Для нахождения конечной длины образца после разрыва l_k разрушенные части образца складывают так, чтобы они образовали

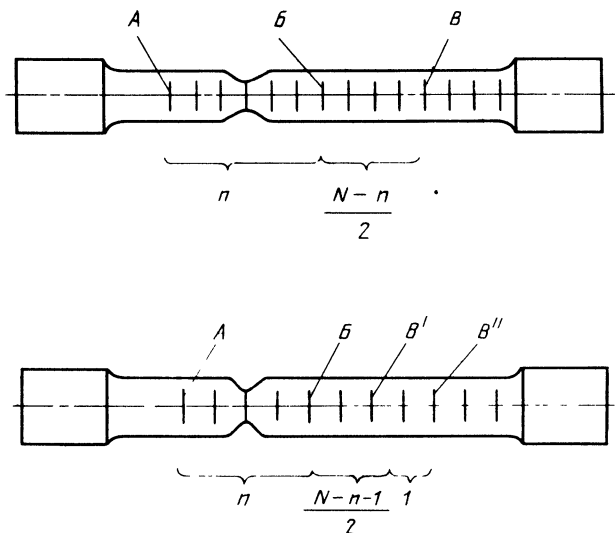


Рис. 4.6. Схемы и определению удлинения при разрушении

одно целое. Расстояние между крайними рисками на образце измеряют с точностью до 0,1 мм.

Значения относительного удлинения, определенные на коротких или длинных образцах, обозначают соответственно δ_5 и δ_{10} .

На начальной расчетной длине образца l_0 перед испытанием наносят N меток на равных расстояниях одна от другой (рис. 4.6). После разрыва крайнюю метку на короткой части образца обозначают буквой A . На длинной части образца буквой B обозначают метку, расположенную примерно на таком же расстоянии от места разрыва, что и метка A . Расстояние от A до B составляет n интервалов. Тогда относительное удлинение δ , % можно определить по следующим формулам:

если разность $(N-n)$ — число четное, то

$$\delta = \frac{AB + 2BB - l_0}{l_0} 100, \quad (4.9)$$

если разность $(N-n)$ — число нечетное, то

$$\delta = \frac{AB + BB' + BB''}{l_0} 100. \quad (4.10)$$

Относительное равномерное удлинение образца вычисляют по формуле

$$\delta_p = \frac{l_{кр} - l_{нр}}{l_{нр}} 100. \quad (4.11)$$

Для определения относительного равномерного удлинения δ_p выбирают большую из частей образца после разрыва. На расстоя-

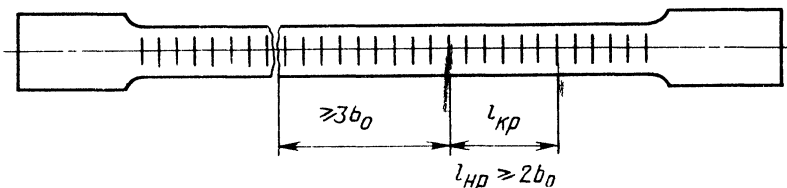


Рис. 4.7. Схема к расчету относительного равномерного удлинения образца

нии не менее чем $3d_0$ или $3b_0$ от места разрыва отмечают начальную метку участка образца на его рабочей части l_{HP} (участок для определения относительного равномерного удлинения δ_p). Отсчитав на этом участке число меток, соответствующее $l_{HP} = 2d_0$ (или $2b_0$), определяют длину участка после разрыва l_{KP} , на котором вычисляют δ_p с учетом расстояний между метками на начальной расчетной длине образца l_{HP} перед его испытанием (рис. 4.7) с помощью формулы (4.11).

Относительное сужение поперечного сечения после разрыва (ψ). Относительное сужение — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к первоначальной площади поперечного сечения, выраженное в процентах:

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} 100. \quad (4.12)$$

Для определения минимальной площади поперечного сечения образца после испытания F_K нужно с помощью микрометра на плоскости излома измерить его наименьший диаметр d_K или наименьшую толщину и ширину (для плоского образца) с точностью до 0,05 мм. Затем по измеренному диаметру d_K и исходному диаметру d_0 образца следует подсчитать площади поперечных сечений F_0 и F_K и по формуле (4.12) рассчитать относительное сужение ψ после разрыва образца.

Относительное равномерное удлинение, относительное удлинение, относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва в зависимости от их значения определяют со следующей точностью: до 10 % — с точностью 0,2 %, от 10 до 20 % — с точностью до 0,5 %, от 20 до 50 % — с точностью до 1,0 %, свыше 50 % — с точностью 2,0 %.

При оценке деформируемости большое значение имеет исследование зависимости истинного напряжения от остаточной деформации при растяжении образца. Эту зависимость характеризуют кривой истинных напряжений или касательной к ней, называемой ориентировочной прямой. Ориентировочную прямую можно построить, если известны механические характеристики металла образца: $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ , ψ . По значениям этих характеристик рассчитывают две величины: $\psi_{ш}$ и $\sigma_{ш}$, характеризующие состояние материала в момент образования шейки на образце. Известно, что в этот момент весь объем металла образца переходит в пластиче-

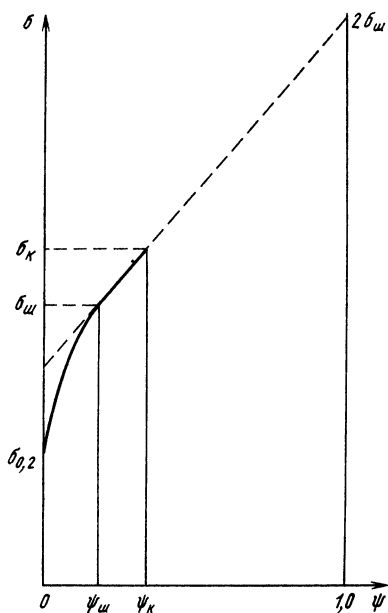


Рис. 4.8. Зависимость истинного напряжения от остаточной (пластической) деформации при растяжении образца

проводят прямую, затем первую точку соединяют плавной кривой с точкой $\sigma_{0,2}$, находящейся на вертикальной оси. Из точки ψ_k восстанавливают перпендикуляр до пересечения с ориентировочной прямой. Ордината точки пересечения соответствует истинному напряжению в момент разрушения образца $\sigma_{ист}$. Ориентировочная прямая показывает, что пластическая деформация сопровождается упрочнением металла вплоть до разрушения образца (см. рис. 4.8).

Испытание на растяжение при повышенных и пониженных температурах. Испытания на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них при повышенных температурах регламентируются ГОСТ 9651—84, при пониженных — ГОСТ 11150—84. Установлены размеры и форма образцов для испытаний на растяжение, а также температурные режимы испытаний. Испытания на растяжение при повышенных и пониженных температурах проводят в основном так же, как и при нормальной температуре (ГОСТ 1497—84). Образец растягивают постепенно с постоянной скоростью деформации (или нагружения). Образец предварительно нагревают или охлаждают до необходимой температуры, которую поддерживают на протяжении всего испытания в нужных пределах. Определяемые механические характеристики черных и цвет-

ское состояние. Истинное сопротивление разрыву (истинное напряжение) — напряжение, определенное отношением нагрузки в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в месте разрыва:

$$\sigma_{ист} = P_{max}/F_k.$$

Значения $\psi_{ш}$ и $\sigma_{ш}$ вычисляют по формулам:

$$\psi_{ш} = \frac{\delta}{1 + \delta}; \quad (4.13)$$

$$\sigma_{ш} = \frac{\sigma_{в}}{1 - \psi_{ш}}. \quad (4.14)$$

Ориентировочную прямую строят в координатах ψ — σ (рис. 4.8). В этом случае по горизонтальной оси откладывают значения $\psi_{ш}$, ψ , $\psi = 1$, а по вертикальной — σ , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{ш}$, $2\sigma_{ш}$. На графике отмечают две точки, которые принадлежат ориентировочной прямой ($\psi_{ш}$, $\sigma_{ш}$ и $\psi = 1$, $\sigma = 2\sigma_{ш}$). По этим точкам

ных металлов: предел пропорциональности, предел упругости, модуль упругости, предел текучести физический, предел текучести условный, временное сопротивление, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Для испытаний на растяжение при повышенных температурах образцы нагревают до 20—1200 °С, для испытаний при пониженных температурах — охлаждают до 20—100 °С.

Испытания на растяжение тонких листов и лент, проволоки и труб. Кроме основных стандартов на методы испытаний при нормальной, повышенной и пониженной температурах имеются стандарты на методы испытаний на растяжение тонких листов и лент толщиной от 0,5 до 3 мм (ГОСТ 11701—84), проволоки (ГОСТ 10446—80) и труб (ГОСТ 10006—80). Методики проведения испытаний на растяжение продукции указанных видов имеют некоторые особенности.

При испытании тонких листов особое внимание следует обратить на установку образцов по центру в захватах разрывной машины. В стандартах также указана погрешность измерения ширины b_0 и толщины a_0 образцов до испытания.

Важной особенностью испытания тонколистовой стали является скорость испытания. Скорость движения активного захвата машины следует регулировать так, чтобы скорость увеличения напряжения в образце до достижения предела текучести не превышала 10 МПа/с, начиная от начального напряжения, равного 50 МПа.

Испытание на растяжение проволоки (ГОСТ 10446—80) заключается в растяжении образца (отрезка проволоки) круглого, квадратного или прямоугольного сечения размером, не превышающим 16 мм, а также специального профиля с отношением ширины к толщине не более 4. Поперечное сечение проволоки может быть постоянным или периодически изменяющимся по длине. Механические характеристики определяют по методикам ГОСТ 1497—84.

Рабочая длина образцов при определении временного сопротивления и относительного сужения после разрыва должна быть 100—200 мм, а начальная расчетная длина при определении относительного удлинения после разрыва должна быть 100 или 200 мм в зависимости от требований, указанных в нормативно-технической документации на проволоку.

Для определения удлинения с отнесением места разрыва к середине расчетной длины отметки наносят по всей рабочей длине образца через равные промежутки чернилами, карандашом, краской, возможно нанесение царапин; при этом образец проволоки предварительно окрашивают быстросохнущими красками.

Начальную длину измеряют с погрешностью $\pm 0,1$ мм.

При определении предела пропорциональности, упругости и текучести малая ступень нагружения принимается 200—400 МПа,

а при определении предела текучести разрешается задавать не нагрузку по шкале силоизмерителя, а остаточную деформацию — по шкале тензометра.

Методы испытаний на растяжение труб устанавливает ГОСТ 10006—80. Для испытаний применяют продольные и поперечные образцы.

При испытании труб определяют: предел текучести (физический), предел текучести (условный), временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва.

Испытание на сжатие. Статические испытания на сжатие проводят для определения механических характеристик черных и цветных металлов и сплавов. Методы статических испытаний на сжатие при температуре $(20_{-10}^{+15})^{\circ}\text{C}$ устанавливает ГОСТ 25.503—80.

По результатам испытаний образцов на сжатие определяют следующие механические характеристики материалов: модуль упругости, предел пропорциональности, предел упругости, физический предел текучести, условный предел текучести и предел прочности.

Механические характеристики образцов, определяемые при испытаниях на сжатие, необходимы для выбора металлов, сплавов и обоснования конструкторских разработок машин и узлов; для статистического приемочного контроля, нормирования механических характеристик и оценки качества металла; для разработки технологических процессов и проектирования изделий; для расчета на прочность деталей машин.

При статических испытаниях на сжатие необходимо учитывать схему напряженного состояния, так как она влияет на механические свойства и на характеристики деформации. Нормальные напряжения при сжатии в большей степени способствуют активизации пластичности, чем нормальные напряжения при растяжении образца. Следовательно, чем больше роль напряжений сжатия в схеме напряженного состояния образца, тем схема считается «мягче», так как деформационная способность (пластичность) материала в таком напряженном состоянии больше.

В отличие от испытаний на растяжение при испытании на сжатие деформациями образца являются не удлинение, а укорочение, не сужение, а увеличение поперечного сечения образца.

Форма и размеры образцов для испытания на сжатие регламентированы ГОСТ 25.503—80. Для испытаний на сжатие используют цилиндрические образцы четырех типов: с гладкими торцами (типы I—III) и торцовыми выточками (тип IV) (рис. 4.9, а и б). Погрешность измерения диаметра образца до испытания должна быть не более 0,01 мм, для образца диаметром до 10 мм погрешность должна быть не более 0,01 мм, а для образца свыше 10 мм — не более 0,05 мм.

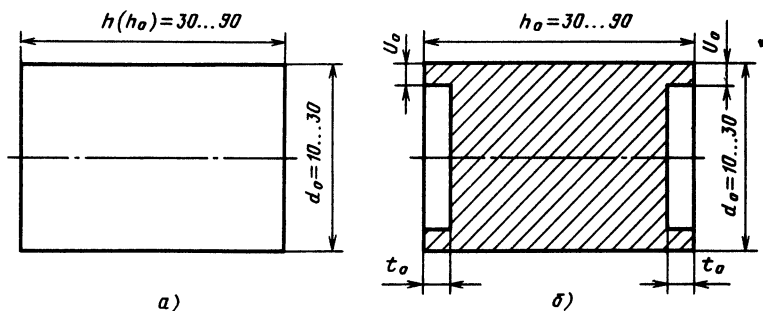


Рис. 4.9. Образцы для испытания на сжатие с гладкими торцами (а) и с торцевыми выточками (б)

Измерение диаметра образцов до испытания проводят в двух взаимно перпендикулярных сечениях. Результаты измерений усредняют, вычисляют площадь поперечного сечения образца, округляя ее от 0,01 до 1,0 мм² в зависимости от площади поперечного сечения образца.

Погрешность измерения высоты образца типа III до испытания должна быть не более 0,002 мм при деформациях $\epsilon_l \leq 0,002$ и не более 0,05 мм при $\epsilon_l \geq 0,002$; для образцов типа IV эта погрешность всегда должна быть не более 0,05 мм.

При испытании на сжатие число образцов для получения среднего значения механической характеристики материала должно быть не менее трех.

Для определения модуля упругости при сжатии используют образцы типа I. Образец нагружают до напряжения $\sigma_0 = 0,10 \times (\sigma_{\text{пц}}^c)^{\text{ож}}$, где $(\sigma_{\text{пц}}^c)^{\text{ож}}$ — напряжение, соответствующее ожидаемому значению предела пропорциональности. Схема нагружения образца при сжатии приведена на рис. 4.10.

Предел пропорциональности вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{пц}}^c = F_{\text{пц}}^c / A_0, \quad (4.15)$$

где $F_{\text{пц}}^c$ — нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности; A_0 — начальная площадь поперечного сечения образца.

Образец нагружают до напряжения $\sigma_0 = 0,10 (\sigma_{\text{пц}}^c)^{\text{ож}}$. Затем на образец устанавливают тензометры и нагрузку увеличивают ступенями до напряжения $(0,7—0,8) (\sigma_{\text{пц}}^c)^{\text{ож}}$. По результатам испытаний строят диаграмму сжатия образца в следующей зависимости $F^c = f(\Delta h)$ (рис. 4.11). Модуль упругости при сжатии определяют по формуле

$$E^c = \frac{\Delta F^c h_0}{\Delta h_{\text{ср}} A_0}, \quad (4.16)$$

где ΔF^c — ступень нагрузки при сжатии, Н; $\Delta h_{\text{ср}}$ — средняя абсолютная деформация (укорочение) образца при нагружении на ΔF^c , мм.

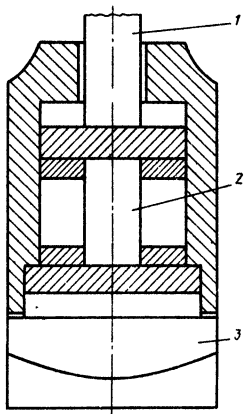


Рис. 4.10. Схема нагружения образца при сжатии:

1 — пуансон; 2 — образец; 3 — опора

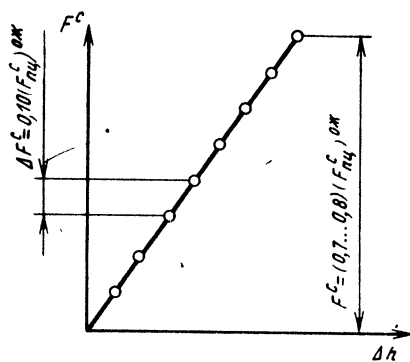


Рис. 4.11. Диаграмма сжатия образца

Определяют $\Delta h_{\text{ср}} = h_{\text{оср}} - h_{\text{к ср}}$ ($h_{\text{оср}}$ — среднее значение начальной расчетной высоты образца до испытаний по трем и более измеренным образцам; $h_{\text{к ср}}$ — среднее значение конечной расчетной высоты образца после испытаний по трем и более измеренным образцам). При использовании установок с самопишущим прибором для определения модуля упругости при сжатии образцы нагружают непрерывно до $\sigma = (0,7-0,8) (\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$. Диаграмму $F^c = f(\Delta h)$ записывают в масштабе по оси абсолютной деформации Δh не менее $200 : 1$ и по оси нагрузок не более $A_0 \cdot 10$ МПа ($A_0 \cdot \text{кгс/мм}^2$) на 1 мм.

Для определения предела пропорциональности при сжатии используют образцы типа II. Предел пропорциональности при сжатии — напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и абсолютным укорочением образца достигает такого значения, что тангенс угла наклона, образованного касательной к диаграмме $F^c - \Delta h$ в точке $F_{\text{пц}}^c$ с осью нагрузок, увеличивается на 50 % на линейном участке. Образец нагружают до напряжения $\sigma_0 = 0,10 (\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$. При напряжении σ_0 на образец устанавливают тензометр и нагрузку увеличивают ступенями до напряжения $(0,7-0,8) (\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$. При этом перепад напряжений на соседних ступенях нагружения составляет $\Delta \sigma = (0,10-0,15) (\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$. После этого ступени нагружения увеличивают до $\Delta \sigma = 0,02 (\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$, и когда значение абсолютной деформации образца Δh превысит среднее значение абсолютной деформации Δh на начальном линейном упругом участке в 2—3 раза, испытания прекращают. Затем строят диаграмму и определяют предел пропорциональности при сжатии, используя формулу (4.15).

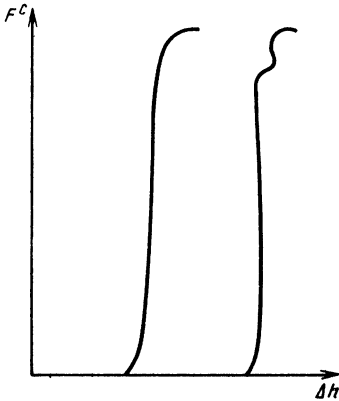


Рис. 4.12. Диаграммы сжатия образца, записанные на самопишущем приборе испытательной установки

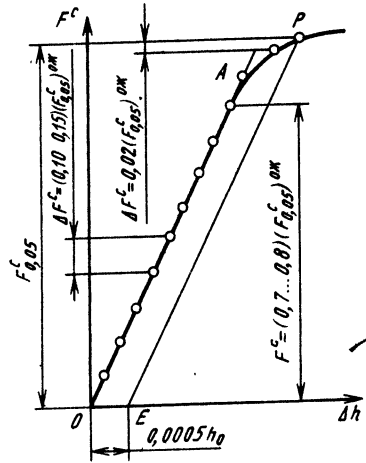


Рис. 4.13. Диаграмма сжатия образца при определении предела упругости

Для определения предела пропорциональности при сжатии по диаграмме $F^c = f(\Delta h)$, записанной на самопишущем приборе (рис. 4.12), образец нагружают непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение предела пропорциональности $(\sigma_{\text{пц}}^c)_{\text{ож}}$. По диаграмме сжатия определяют значения $F_{\text{пц}}^c$ и Δh , по формуле (4.15) находят предел пропорциональности при сжатии. ✓

Для определения предела упругости при сжатии $\sigma_{0,05}^c$ используют образцы типа II. Предел упругости при сжатии — напряжение, при котором относительная остаточная (пластическая) деформация ε (укорочение) образца достигает 0,05 % от начальной расчетной высоты образца.

Относительную деформацию (укорочение), %, образца определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_{\text{к}}}{h_0} 100,$$

где $h_{\text{к}}$ — конечная расчетная высота образца после испытания до заданной деформации или при разрушении.

Принцип нагружения образца при определении предела упругости следующий. Образец нагружают до напряжения $\sigma_0 = 0,10 (\sigma_{0,05}^c)_{\text{ож}}$, т. е. до 0,10 ожидаемого значения предела упругости при сжатии. При напряжении σ_0 на образец устанавливают тензометр и нагрузку увеличивают ступенями до напряжения $(0,7-0,8) (\sigma_{0,05}^c)_{\text{ож}}$. Затем ступени нагружения увеличивают до $\Delta \sigma = 0,05 (\sigma_{0,05}^c)_{\text{ож}}$. Когда остаточное укорочение образца превысит заданный допуск, испытания прекращают.

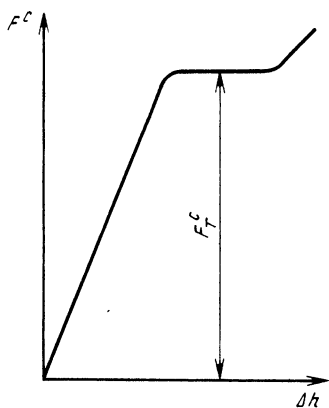


Рис. 4.14. Диаграмма сжатия образца при определении физического и условного пределов текучести

По результатам испытаний строят диаграмму и определяют предел упругости при сжатии (рис. 4.13). Для этого определяют деформацию Δh исходя из базы тензометра. Согласно масштабу диаграммы (200 : 1) увеличивают абсолютную деформацию и откладывают ее значение — отрезок OE по оси абсцисс вправо от начала координат (см. рис. 4.13). Из точки E проводят прямую EP , параллельную прямой OA . Точка P пересечения с диаграммой определяет высоту ординаты, т. е. нагрузку $F_{0,05}^c$, соответствующую пределу упругости. Предел упругости вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,05}^c = F_{0,05}^c / A_0. \quad (4.17)$$

Для определения предела упругости при сжатии $\sigma_{0,05}^c$ по диаграмме $F^c = f(\Delta h)$, записанной на самопишущем приборе, образец нагружают непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение предела упругости $(\sigma_{0,05}^c)^{ож}$. Используя диаграмму и формулу (4.17), вычисляют предел упругости при сжатии $\sigma_{0,05}^c$.

Для определения физического предела текучести при сжатии σ_T^c используют образцы типа III.

Под физическим пределом текучести при сжатии понимают наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения сжимающей нагрузки. Для определения этого параметра образец нагружают непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение $(\sigma_T^c)^{ож}$, и записывают диаграмму на самопишущем приборе в установленном ГОСТ 25.503—80 масштабе (рис. 4.14). Физический предел текучести вычисляют по формуле

$$\sigma_T^c = F_T^c / A_0. \quad (4.18)$$

Условный предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2}^c$ определяют на образцах типа III.

Условный предел текучести при сжатии — напряжение, при котором относительная остаточная деформация (укорочение) образца достигает 0,2 % от начальной расчетной высоты образца.

При определении $\sigma_{0,2}^c$ образец нагружают непрерывно до напряжения, превышающего ожидаемое значение $(\sigma_{0,2}^c)^{ож}$, и записывают диаграмму на самопишущем приборе в определенном масштабе. По диаграмме в учетом жесткости испытательной ма-

шины определяют нагрузку $F_{0,2}^0$, соответствующую условному пределу текучести при сжатии, который вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,2}^0 = F_{0,2}^0 / A_0. \quad (4.19)$$

Предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{в}}^0$ определяют на образцах типа III.

Предел прочности при сжатии — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению.

Образец нагружают непрерывно до разрушения. Наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца, принимают за нагрузку F_{max}^0 , соответствующую пределу прочности при сжатии, который определяют по формуле

$$\sigma_{\text{в}}^0 = F_{\text{max}}^0 / A_0. \quad (4.20)$$

При испытании на сжатие необходимо учитывать ряд особенностей, влияющих на механические характеристики испытуемого материала: увеличивается площадь поперечного сечения образца, в результате чего резко возрастают усилия сжатия; на контактных площадках образца появляются значительные силы трения, тормозящие деформацию образца вблизи его торца.

В зависимости от материала разрушение образцов может быть хрупким и вязким (рис. 4.15).

Для таких материалов, как чугун, боразон (40 % бора и 50 % азота), для порошковых материалов (микролита, термокорунда и др.), керметов, закаленных сталей, мрамора, гранита при испытании на сжатие характерен хрупкий излом.

К материалам, для которых характерно пластическое разрушение, следует отнести свинец, низкоуглеродистые стали, некоторые алюминиевые сплавы, магниевые и никелевые сплавы.

Уменьшение трения на торцевых поверхностях образцов приводит к изменению характера разрушения. Для получения качественных показателей при испытании на сжатие необходимо соблюдать рекомендации ГОСТ 25.503—80 по применению смазочного материала. Так, при испытании образцов типов I, II их торцы обезжиривают. Смазывание торцов смазочным материалом запрещается.

При испытании образцов типа III допускается применение смазочного материала, а при испытании образцов типа IV смазывание поверхностей образцов является обязательным.

Испытание на изгиб. Для определения прочности и вязкости твердых сталей (закаленных и отпущенных) и чугунов, а также порошковых материалов и твердосплавных режущих пластин,

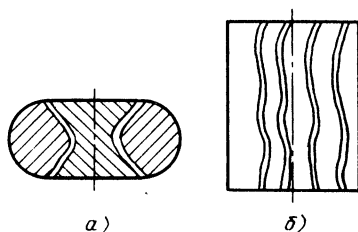


Рис. 4.15. Виды разрушения образцов при испытании на сжатие: а — хрупкое; б — пластичное (вязкое)

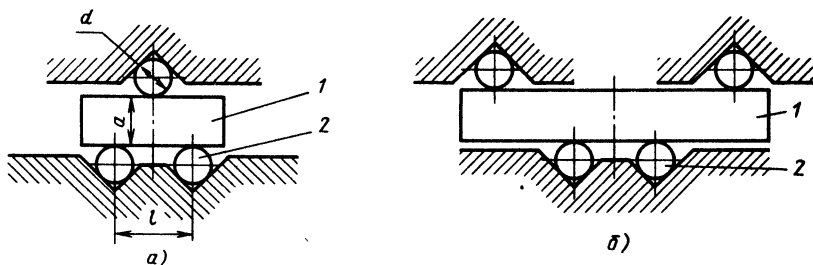


Рис. 4.16. Схема испытания на изгиб:

а — простой изгиб; *б* — чистый изгиб

работающих в условиях высоких и низких температур, испытания на растяжение и сжатие непригодны вследствие малой пластичности испытываемых материалов. К тому же испытания на растяжение не позволяют получить четкой зависимости твердости материалов от режимов термообработки и структуры в возможно более узкой области разброса (при небольшом числе испытываемых образцов). Этому требованию лучше всего удовлетворяют испытания на изгиб. Они отличаются малым разбросом результатов и дают возможность с помощью простых средств получить эпюру изгибающих моментов испытываемого образца.

Испытания на изгиб применяют также для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризующуюся углом изгиба, или для оценки предельной пластичности металла при изгибе, характеризующейся углом изгиба до образования первой трещины.

Испытания на изгиб проводят до заданного угла изгиба по двум схемам нагружения. Согласно первой схеме (простой изгиб) образец 1, лежащий на двух опорах 2, нагружают сосредоточенной силой в середине пролета между опорами, расстояние между которыми равно $l = d + 2,5 a$ (рис. 4.16, *а*). Согласно второй схеме (чистый изгиб) образец 1, свободно лежащий на двух опорах 2, нагружают двумя сосредоточенными силами, приложенными на одинаковом расстоянии от опор (рис. 4.16, *б*).

Испытания на изгиб по ГОСТ 14019—80 рекомендуется проводить также до появления первой трещины в растянутой зоне образца с определением угла изгиба; до параллельности сторон и до соприкосновения сторон испытываемых образцов.

При специальных испытаниях образцов на изгиб определяют: предел прочности, предел пропорциональности, предел упругости и предел текучести.

Размеры и форма образцов для испытания на изгиб рекомендованы ГОСТ 14019—80 (рис. 4.17, *а* и *б*). В результате испытаний на изгиб можно снять диаграммы изгиба образцов из сталей и сплавов, подвергнутых термической обработке, и определить пределы прочности, пропорциональности, упругости и текучести.

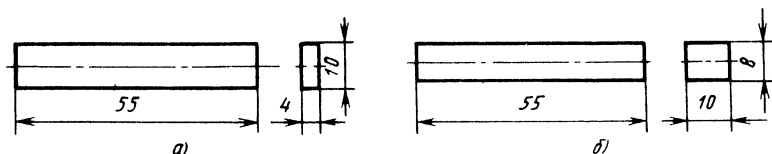


Рис. 4.17. Образцы для испытания на изгиб

Затем с помощью этих характеристик проводят классификацию вязкости испытанных сталей и сплавов.

Для подготовки испытательной машины к работе необходимо установить диапазон измерения, при котором ожидаемая испытательная нагрузка ни в коем случае не должна приходиться на начало шкалы силоизмерителя. После установки диапазона измерений нагрузки необходимо проверить положение начала отсчета шкалы силоизмерителя и при необходимости провести его корректировку. Образцы измеряют штангенциркулем с точностью до 0,1 мм и записывают в протокол испытания. Затем рассчитывают расстояние между опорами и устанавливают образец на приспособление (рис. 4.18). Приспособление снабжено сменными цилиндрическими опорами 1 диаметром 4 мм. Опоры изготовлены из твердого сплава или стали, закаленных до твердости HRC₉ 60—64. Перед проведением испытаний закаленных (хрупких) образцов рабочую зону приспособления закрывают защитным кожухом.

Образец 2 устанавливают на цилиндрических роликовых опорах 1 приспособления, оси которых перпендикулярны продольной оси образца. Посредине между опорами к образцу прикладывают сосредоточенную нагрузку с помощью пуансона 3.

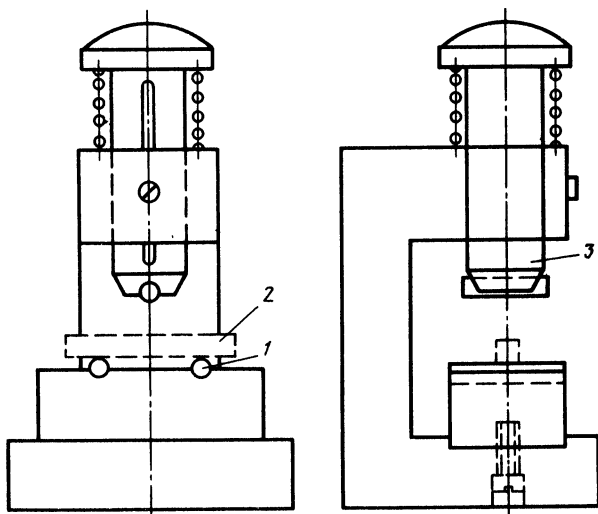


Рис. 4.18. Приспособление для испытания на простой изгиб

Для точного измерения угла изгиба к образцу прикладывают предварительную нагрузку, равную 150 Н. Затем устанавливают датчик перемещений для измерения прогиба образца. Далее плавно увеличивают нагрузку. Скорость нагружения не должна превышать 50 Н/с. На самопишущем приборе получают диаграмму испытания на изгиб (рис. 4.19), по которой определяют предел пропорциональности ($P_{пл}$), предел упругости ($P_{уп}$), предел текучести (P_T), временное сопротивление при изгибе, прогиб в середине образца (f_T) при определении P_T , предел прочности P_B .

При отсутствии устройства для непрерывной записи диаграммы изгиба применяют индикатор часового типа. Ступенчато прикладывают нагрузки и записывают соответствующие им значения полного прогиба по шкале индикатора. Полученные таким образом значения нагрузок и прогибов при ступенчатом нагружении представляют в системе координат нагрузка—прогиб. Через точки измерения проводят усредненную кривую испытаний (рис. 4.20).

Испытания образцов на чистый изгиб проводят на тех же испытательных машинах и при тех же условиях, что и при простом изгибе. Остаточный прогиб образцов после испытания свидетельствует о том, что испытуемый материал не является хрупким.

По результатам испытаний определяют механические характеристики материала.

Предел прочности при изгибе определяют по формуле

$$\sigma_{изг} = M_{изг}/W, \quad (4.21)$$

где $M_{изг}$ — изгибающий момент;
 W — момент сопротивления изгибу;

для образца круглого сечения

$$W = \frac{\pi d^3}{b}; \quad (4.22)$$

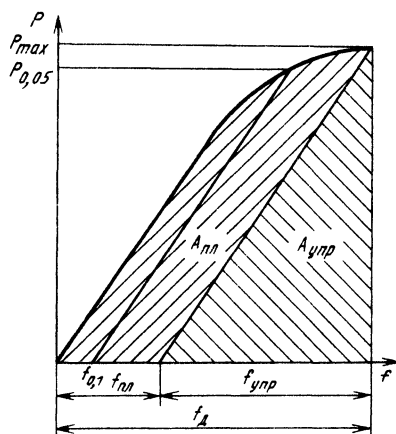
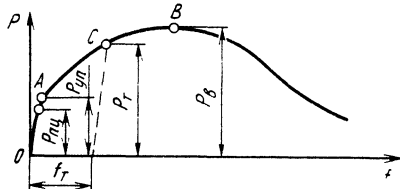


Рис. 4.19. Диаграмма испытания на изгиб, полученная на самопишущем приборе

Рис. 4.20. Диаграмма испытания на изгиб, построенная по точкам ($A_{пл}$ — работа пластического разрушения; $A_{упр}$ — работа упругого разрушения; $f_{л}$ — полный прогиб; $f_{упр}$ — упругий прогиб; $f_{пл}$ — пластичный прогиб)

для образца прямоугольного сечения

$$W = \frac{bh^3}{6}. \quad (4.23)$$

Тогда для цилиндрических образцов предел прочности при простом изгибе

$$\sigma_{изв} = \frac{8Pl}{\pi d^3}, \quad (4.24)$$

где P — нагрузка на образец; l — расстояние между опорами, на которых установлен образец; d — диаметр образца.

Для образцов прямоугольного сечения предел прочности: при простом изгибе

$$\sigma_{изв} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (4.25)$$

а при чистом изгибе

$$\sigma_{изв} = \frac{3}{2} \frac{Pa}{bh^2}, \quad (4.26)$$

где a — плечо действия нагрузки P ; b — ширина образца; h — высота образца.

Нагрузку P для расчета предела прочности при изгибе можно определить в момент разрушения хрупкого образца по показанию силоизмерителя испытательной машины или по диаграмме изгиба с учетом приложенной предварительной нагрузки.

Предел упругости при изгибе образца вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,05} = M_{0,05}/W, \quad (4.27)$$

где $M_{0,05}$ — изгибающий момент при остаточном прогибе образца 0,05 мм.

При использовании формулы (4.27) предел упругости для цилиндрических образцов вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,05} = \frac{8P_{0,05}}{\pi d^3}, \quad (4.28)$$

где $P_{0,05}$ — нагрузка на образец при остаточном изгибе образца 0,05 мм, определяемая по диаграмме изгиба (см. рис. 4.20). Для этого через точку на оси прогиба f , соответствующую остаточному прогибу 0,05 мм (с учетом масштаба построения диаграммы), проводят прямую, параллельную прямой Гука. Точка пересечения этой прямой с кривой изгиба дает значение $P_{0,05}$. Остальные характеристики материала при испытании на изгиб определяют аналогичным образом.

Испытание твердосплавных изделий на изгиб проводят с целью определения предела прочности. Испытания проводят по схеме простого изгиба (см. рис. 4.18). Существуют два вида испытаний твердосплавных изделий на изгиб: испытания для технологических целей и контроля продукции в процессе изготовле-

Таблица 4.1

Рекомендуемые твердосплавные образцы для испытаний на изгиб

Тип образца	Размеры образца, мм			Расстояние между опорами в приспособлении
	Высота	Ширина	Длина	
I	$5 \pm 0,25$	$5 \pm 0,25$	35 ± 1	$30 \pm 0,5$
II	$5,25 \pm 0,25$	$6,5 \pm 0,25$	20 ± 1	$14,5 \pm 0,5$
III	$4 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,1$	$11 \pm 0,5$	$8 \pm 0,1$

ния твердосплавных пластин, проводимые на специальных образцах; испытания с целью контроля качества пластин у потребителя.

Для испытания твердосплавных изделий используют образцы типов I, II и III (табл. 4.1). При испытаниях первого вида используют образцы типов I и II, а при испытаниях второго вида — образцы типов II и III, вырезанные из готовых изделий, или изделия (пластины) при условии, что последние имеют постоянное сечение по длине, равной расстоянию между двумя опорами приспособления ($l \geq 2h$). Образцы вырезают из готовых изделий алмазными дисками или электроискровым методом с припуском под последующее их шлифование. Образцы шлифуют алмазными кругами параллельно наибольшему размеру образца до параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ мкм. На гранях образцов снимают фаски величиной 0,2 мм под углом 45° . После шлифования образцы контролируют визуально на отсутствие выкрашивания и трещин, а также на отсутствие других дефектов.

Испытания твердосплавных образцов проводят на испытательных машинах. Опорные ролики приспособления изготовляют из твердого сплава. Диаметр роликов 6 мм, их поверхность протшлифована. Образцы измеряют микрометром с точностью $\pm 0,01$ мм.

Перед испытанием образца на изгиб необходимо определить ожидаемую разрушающую нагрузку P на образец и установить на испытательной машине соответствующий масштаб нагрузок. Образцы, измеренные по высоте и ширине, устанавливают на опоры приспособления широкой стороной. Для безопасности лаборанта приспособление закрывают отражателем. Затем производят нагружение образца вплоть до его разрушения и фиксируют разрушающую нагрузку P . По завершении испытания убирают разрушенные части образца и проверяют состояние опорных роликов приспособления. По результатам испытаний определяют предел прочности при изгибе, используя формулу

$$\sigma_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (4.29)$$

где P — разрушающая нагрузка; l — расстояние между опорами; b — ширина образца; h — высота образца.

Разрушающую нагрузку P определяют по диаграмме испытания или по указателю силоизмерителя в момент разрушения образца.

После испытаний проводят статистическую обработку экспериментальных данных и находят усредненное значение предела прочности для определенного числа испытанных твердосплавных образцов.

Испытание на изгиб при повышенных температурах используют для исследования термически обработанных инструментальных сталей. Цель испытаний — исследовать зависимость предела прочности от температуры нагрева стали и, в частности, установить температуру, при которой наступает необратимый прогиб образца, свидетельствующий о переходе стали из хрупкого состояния в вязкое. Испытания проводят по схеме простого изгиба. Образец свободно устанавливают на двух опорах приспособления. Нагрузку на образец прикладывают в середине между опорами приспособления. Образец, опоры, опорный столик и пуансон нагревают в электрической печи, смонтированной на испытательной машине (рис. 4.21).

Для испытания на изгиб при повышенных температурах рекомендуются образцы квадратного поперечного сечения с размерами $6 \times 6 \times 45$ мм.

Испытание на изгиб при повышенных температурах проводят на испытательных машинах, имеющих рабочее пространство, достаточное для размещения нагревательной печи для образцов. Испытательную нагрузку выбирают, исходя из ожидаемой разрушающей нагрузки:

$$P_{\text{ож}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\text{нзг}}^{\text{ож}} b h^2}{l}, \quad (4.30)$$

где $\sigma_{\text{нзг}}^{\text{ож}} = 4\,000$ МПа; $h = 6$ мм; $l = 30$ мм.

Подстановка в формулу (4.30) значений указанных параметров дает $P_{\text{ож}} = 19\,200$ Н, т. е. для испытания образца на изгиб в дан-

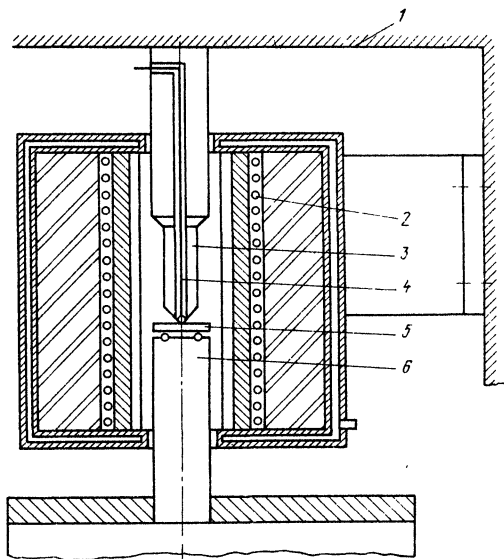


Рис. 4.21. Схема испытания образца на изгиб при повышенных температурах

ном случае необходима испытательная машина, силоизмерительная шкала измерительного средства которой имеет диапазон показаний 200—500 Н (2000—5000 кгс).

Нагревательная печь должна обеспечивать максимальную температуру нагрева 800 °С.

Положение пуансона 3 относительно нижней опоры определяется посадочными отверстиями в столе 6 и отверстием в траверсе машины 1. Положение печи относительно опорного столика 6 фиксируется скобами, с помощью которых печь 2 крепится к траверсе машины 1. Положение образца 5 на опорах определяется ограничителями, предусмотренными конструкцией столика.

Термопару 4 укладывают в печь по пазу, выполненному в пуансоне, так, чтобы она касалась верхней опоры. Перед испытанием, до установки печи на испытательную машину, проверяют положение пуансона относительно опор на опорном столике, а также состояние опор, которые не должны иметь поверхностных дефектов. Проверяют правильность укладки термопары, затем устанавливают и фиксируют печь на испытательной машине и проверяют ее положение относительно опорного столика и пуансона, затем печь включают на нагрев до 800 °С и одновременно проверяют системы охлаждения и подачи защитного газа.

После этого устанавливают последовательность испытания образца в заданном температурном интервале. Проверяют маркировку образцов и их размеры, эти данные заносят в протокол испытаний.

Устанавливают образец 5 на опоры испытательной машины и опускают печь до установленной отметки; при этом пуансон 3 должен находиться на расстоянии 1—2 мм от поверхности образца 5. Включают нагрев, систему охлаждения печи и при достижении температуры в печи 200 °С вводят защитный газ. По достижении заданной температуры образца дается выдержка в течение 6 мин (по одной минуте на 1 мм толщины образца), после чего пуансон 3 подводится до соприкосновения с образцом, что фиксируется колебанием стрелки силоизмерителя машины. Затем при скорости 1 мм/мин проводят нагружение образца. Когда нагрузка достигает максимального значения, испытание прекращают. Разрушение образца характеризуется падением нагрузки до нуля. Медленное повышение нагрузки свидетельствует о наличии пластической деформации в образце. После этого нагружение прекращают и поднимают траверсу 1 вместе с печью. Испытуемый образец снимают и, осмотрев опоры и термопару, устанавливают следующий образец. При одной и той же температуре испытывают 3—5 образцов.

Устанавливают интервал температур, в котором начинается необратимая (пластическая) деформация образца. Для этого соединяют части разрушенных образцов и измеряют угол изгиба. Если угол изгиба образца превышает 10°, считают, что образец перешел в вязкое состояние. Если пластическая деформация от-

существует, образец находится в хрупком состоянии. При углах изгиба от 2 до 10° разрушение считают смешанным. Вид разрушения записывают в протокол испытаний. Предел прочности при изгибе вычисляют по формуле (4.29).

По вычисленным значениям $\sigma_{изг}$ строят зависимость $\sigma_{изг} = f(T)$, являющуюся окончательным результатом испытаний.

Испытание на кручение. Кручение — деформация, при которой ось призматического или цилиндрического образца не искривляется, а каждое его поперечное сечение оказывается повернутым вокруг оси по отношению к начальному положению на некоторый угол.

Деформация кручения есть результат приложения к концам образца двух одинаковых по абсолютному значению моментов, действующих в плоскостях, нормальных к оси образца и направленных в противоположные стороны.

Испытание на кручение в отличие от других методов статических испытаний металлов и сплавов позволяет установить четкую связь прочности металла с характером разрушения (срез или отрыв). Испытанию на кручение подвергают в основном пластические материалы, а также изделия, прошедшие термическую обработку (закаленные).

Методика испытаний на кручение установлена ГОСТ 3565—80. Этот стандарт распространяется на черные и цветные металлы и сплавы, а также изделия из них. Испытания проводят при температуре $(20_{-10}^{+15})^{\circ}\text{C}$ для определения механических характеристик материалов и характера разрушения при кручении.

По результатам испытания образцов на кручение определяют модуль сдвига, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности (условный), предел прочности (истинный), максимальный остаточный сдвиг и характер разрушения (срез или отрыв).

Для испытания на кручение используют цилиндрические образцы с диаметром в рабочей части 10 мм и расчетной длиной 100 и 50 мм, с головками на концах для закрепления в захватах испытательной машины.

Диаметр образца измеряют с погрешностью не более 0,01 мм, а его длину — с погрешностью не более 0,1 мм.

Шероховатость поверхности рабочей части цилиндрических образцов должна соответствовать $Ra < 0,63$ мкм.

Определение модуля сдвига при кручении. Модуль сдвига — отношение касательного напряжения к упругой угловой деформации в точке. Образец устанавливают и закрепляют в захватах испытательной машины. Нагружают образец крутящим моментом, соответствующим начальному касательному напряжению τ_0 , составляющему 10 % ожидаемого предела пропорциональности материала. После этого на рабочей части образца устанавливают угломер и отмечают начальное показание угломера, принимаемое за нулевое.

Далее образец нагружают крутящим моментом равными ступенями (не менее трех) таким образом, чтобы напряжения в образце не превышали предела пропорциональности. На каждой ступени нагружения регистрируют углы закручивания образца на его расчетной длине.

Модуль сдвига при кручении G , МПа, вычисляют по формуле

$$G = \frac{\Delta T l}{\Delta \varphi I_p}, \quad (4.31)$$

где ΔT — ступени нагружения, Н·мм; l — расчетная длина образца, мм; $\Delta \varphi$ — среднее арифметическое значение углов закручивания на расчетной длине образца, приходящихся на одну ступень нагружения, рад; I_p — полярный момент инерции, мм⁴.

Определение предела пропорциональности при кручении. Предел пропорциональности при кручении $\tau_{\text{пл}}$ — касательное напряжение в периферийных точках поперечного сечения образца, вычисленное по формуле для упругого кручения, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и углом закручивания таково, что на линейном участке тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации и осью нагрузок, увеличивается на 50 % своего значения.

Испытание проводят следующим образом. Образец нагружают ступенями как при определении модуля сдвига. Затем догружают образец сначала большими ступенями, потом малыми, отмечая после каждой ступени нагружения угловую деформацию. Нагружение большими ступенями проводят до напряжения, равного 80 % ожидаемого предела пропорциональности. Испытания прекращают, когда угловая деформация при нагружении малыми ступенями превысит не менее чем в 2 раза среднее значение угловой деформации, полученное на предыдущих ступенях нагружения на линейном участке. На участке диаграммы, для которого справедлив закон Гука, определяют средний угол закручивания и полученное значение завышают в соответствии с принятым допуском.

Предел пропорциональности при кручении $\tau_{\text{пл}}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{пл}}}{W_p}, \quad (4.32)$$

где W_p — полярный момент сопротивления, мм³ (для образца круглого сечения $W_p = \pi D^3/16$).

Нагрузку (крутящий момент) $T_{\text{пл}}$ можно определить и по диаграмме деформации, записанной в координатах крутящий момент (T) — угол закручивания образца (φ) при условии, что ее масштаб обеспечивает не более 0,05 % относительного сдвига на 1 мм оси абсцисс и не более 5 МПа (0,51 кгс/мм²) касательного напряжения на 1 мм оси ординат (рис. 4.22).

Определение предела текучести при кручении. Предел текучести при кручении $\tau_{0,8}$ — касательное напряжение, при котором остаточная деформация сдвига равна 0,3 %.

Считают, что до предела пропорциональности деформация является упругой, за пределом пропорциональности — остаточной (пластической).

Нагружение образца проводят так же, как при определении предела пропорциональности. Результаты испытания обрабатывают следующим образом. По полученным значениям нагрузок (крутящих моментов) T_τ и угловым деформациям вычисляют наибольшие касательные напряжения по формуле

$$\tau_{0,8} = T_\tau / W_p \quad (4.33)$$

и относительный угол сдвига по формуле

$$\varphi_{\text{пц}} = \frac{\varphi_{\text{пц}} D}{2l} 100, \quad (4.34)$$

где $\varphi_{\text{пц}}$ — угол закручивания образца на его расчетной длине, соответствующий пределу пропорциональности при кручении, рад; D — диаметр рабочей части образца, мм; l — расчетная длина образца, мм.

К вычисленному для предела пропорциональности относительному углу сдвига $\varphi_{\text{пц}}$ прибавляют 0,3 % (допуск на остаточный сдвиг для предела текучести) и по величине $\varphi_{\text{пц}} + 0,3$ % находят соответствующий пределу текучести угол закручивания на расчетной длине образца.

Предел текучести можно определить по диаграмме деформаций, если масштаб диаграммы обеспечивает не более 0,05 % относительного сдвига на 1 мм оси абсцисс и не более 5 МПа (0,51 кгс/мм²) касательного напряжения на 1 мм оси ординат.

Определение условного предела прочности при кручении. Условный предел прочности при кручении $\tau_{\text{пк}}$ — касательное напряжение, равное отношению наибольшего момента при кручении, предшествующего разрушению, к полярному моменту сопротивления сечения образца. Образец, установленный и закрепленный в захватах испытательной машины, нагружают до разрушения, фиксируя разрушающую нагрузку $T_{\text{к}}$. Одновременно регистрируют максимальный угол закручивания $\varphi_{\text{мак}}$ на расчетной длине образца, который необходим при подсчете $\tau_{\text{пк}}$ [см. формулу (4.37)].

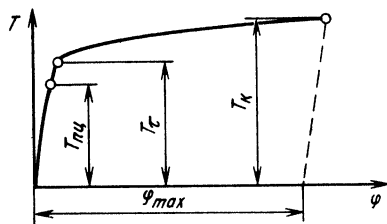


Рис. 4.22. Диаграмма испытания на кручение

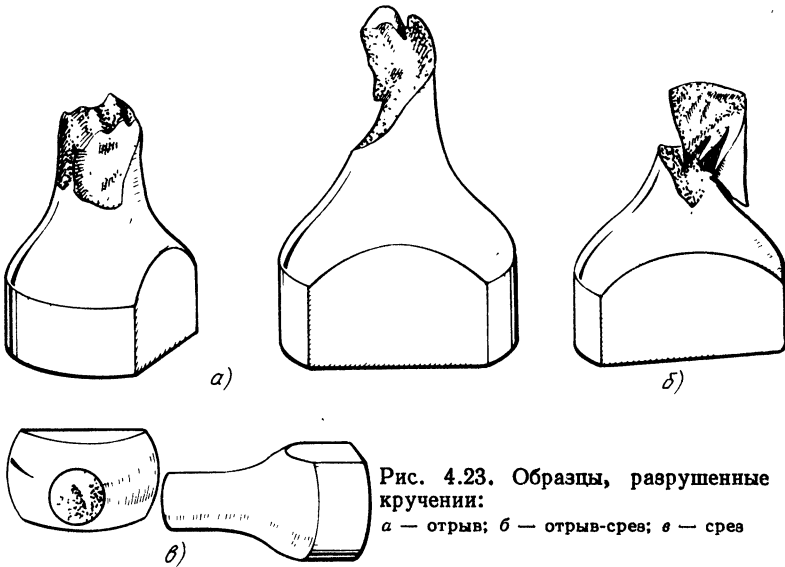


Рис. 4.23. Образцы, разрушенные при кручении:

а — отрыв; б — отрыв-среза; в — среза

С учетом формулы (4.34) для условий максимального остаточного угла сдвига условный предел прочности при кручении $\tau_{\text{пч}}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\tau_{\text{пч}} = T_{\text{к}}/W_{\text{р}}. \quad (4.35)$$

Определение истинного предела прочности при кручении. Истинный предел прочности при кручении $\tau_{\text{к}}$ — наибольшее истинное касательное напряжение при разрушении образца, вычисленное с учетом перераспределения напряжений при пластической деформации.

Устанавливают и закрепляют образец в захватах испытательной машины и нагружают до появления пластической деформации. Ступенчато догружают образец до разрушения, фиксируя нагрузки (крутящие моменты) T_i и соответствующие им углы закручивания φ_i на расчетной длине образца в процессе монотонного деформирования образца с заданной скоростью.

Истинный предел прочности при кручении $\tau_{\text{к}}$, МПа, вычисляют по формуле

$$\tau_{\text{к}} = \frac{4}{\pi D^3} \left[3T_{\text{к}} + \vartheta_{\text{к}} \left(\frac{dT}{d\vartheta} \right)_{\text{к}} \right], \quad (4.36)$$

где $T_{\text{к}}$ — крутящий момент при разрушении образца, Н·м; $\vartheta_{\text{к}}$ — относительный угол закручивания при разрушении образца, рад/мм, определяют по формуле $\vartheta_{\text{к}} = \varphi_i/l$; $(dT/d\vartheta)_{\text{к}}$ — величина, определяемая графически при вычислении $\vartheta_{\text{к}}$.

По вычисленным значениям φ_i и T_i строят конечный участок кривой в координатах $T — \varphi$. Для точки кривой, соответствующей моменту разрушения образца, графически определяют величину

$dT/d\theta$, равную тангенсу угла между касательной к кривой в этой точке и осью абсцисс.

Максимальный остаточный угол сдвига при кручении φ_{\max} — максимальная угловая деформация в точке на поверхности образца для испытаний в момент разрушения. Значение φ_{\max} вычисляют по формуле

$$\varphi_{\max} = \frac{\varphi_{\max} D}{2l}. \quad (4.37)$$

При испытании на кручение определяют характер разрушения образца. Разрушение от касательных напряжений — срез, происходит по поперечному сечению образца. Разрушение от напряжений растяжения — отрыв, происходит по винтовой поверхности под углом примерно 45° к оси образца (рис. 4.23).

4.3. Испытания на ударный изгиб

Испытания металлов и сплавов, из которых изготовлены механизмы и оборудование, проводимые под действием равномерно возрастающих статических нагрузок, не дают объективных данных для оценки надежности устройств в целом. Важное значение имеет определение механических характеристик в условиях, близких к реальным, когда под действием определенных факторов металлы и сплавы переходят в хрупкое состояние (действие концентраторов напряжения, увеличение скорости деформации, понижение температуры и др.). Малое сопротивление металлов и сплавов быстродействующим динамическим (ударным) нагрузкам опасно для работы оборудования и механизмов. В связи с этим во многих технических условиях на изготовление различных изделий предусмотрены динамические испытания материалов — испытания на ударный изгиб (определение ударной вязкости).

Метод испытания на ударный изгиб при пониженной (до -100°C), комнатной (до 20°C) и повышенной (до $+100^\circ\text{C}$) температурах регламентирован ГОСТ 9454—78.

Метод основан на разрушении образца одним ударом маятникового копра. Образец имеет надрез, расположенный в зоне максимальных нормальных напряжений σ_1 и σ_2 (рис. 4.24). Под ударной вязкостью понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора (надреза). Ударная нагрузка и надрез в образце являются условиями, которые вызывают изменение свойств материалов по сравнению с их свойствами при статических испытаниях гладких образцов. Пластическая деформация концентрируется в малом объеме, в результате чего деформационные характеристики уменьшаются, а характеристики сопротивления деформации σ_1 , σ_2 и σ_3 увеличиваются, изменяется характер излома (сталь охрупчивается). Следовательно, ударную вязкость определяют для выявления хрупкости сталей и сплавов.

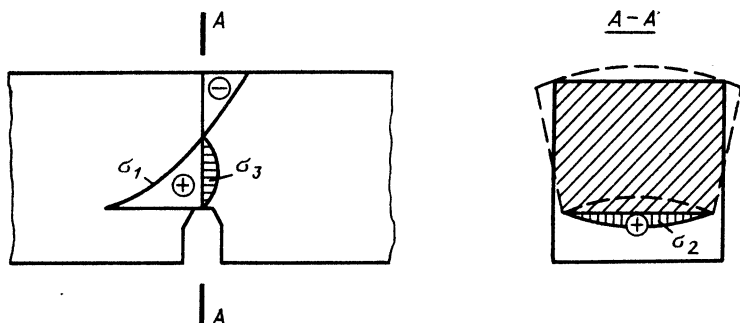


Рис. 4.24. Схема напряжений, возникающих при испытании на ударную вязкость

Результаты испытаний на ударный изгиб не дают конструктору необходимых сведений для расчетов на прочность. Однако значение ударной вязкости важно для технологов. Структурные изменения в металле или сплаве (рост зерна, выпадение дисперсных фаз), наличие тех или иных дефектов структуры или обработки, изменения химического состава при ударных испытаниях в значительно большей степени влияют на ударную вязкость материала, чем при статических испытаниях.

По результатам испытания на ударный изгиб можно установить такие свойства материалов, как хладноломкость, синеломкость, тепловая хрупкость, хрупкость перекристаллизации и др., которые при статических испытаниях не всегда можно обнаружить. Известно, что деформируемые цветные сплавы меди, алюминия и др. нецелесообразно подвергать испытаниям на ударный изгиб, так как они при любых температурах не обнаруживают перехода в хрупкое состояние и разрушаются. Нет необходимости в проведении ударных испытаний литых сплавов (чугун, литые алюминиевые и магниевые сплавы), которые разрушаются хрупко при статических испытаниях на растяжение.

Значение ударной вязкости существенно зависит от формы и размеров образцов. Следует применять образцы, рекомендованные ГОСТ 9454—78, и только в случаях, когда размеры изделий не позволяют вырезать стандартный образец, допускается испытывать образцы с уменьшенным сечением (рис. 4.25). Результаты испытаний образцов с уменьшенным сечением можно сравнивать только с результатами испытаний образцов таких же размеров. Для окончательной обработки образцов применяют шлифование.

Проверка образцов перед испытанием состоит в контроле качества их поверхности и точности геометрических размеров. Необходимо обратить внимание на правильность надреза образца (выполнение радиуса), отсутствие рисок, перпендикулярных оси образца. Перпендикулярность оси надреза продольной оси образца должна быть $90 \pm 2^\circ$. Поперечное сечение образца должно быть прямоугольным с отклонением, не превышающим $\pm 0,5^\circ$.

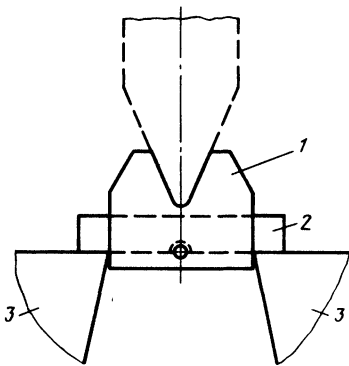


Рис. 4.26. Схема установки образца на опорах копра с помощью шаблона:

1 — шаблон; 2 — образец; 3 — опоры

це, свободно лежащем на опорах маятникового копра, ударом маятника. Образцы из термообработанных сталей выполняют без надреза. Копер 4 снабжен нагревательной печью и полуавтоматическим загрузочным устройством (рис. 4.27), которое перемещает образец 3 из печи на опоры копра. Нагревательная печь трубчатого или камерного типа имеет экран 5 из жаропрочного сплава с внутренним диаметром 22—25 мм.

Внутри экрана установлен направляющий желоб 8 для укладки образца 3. В средней части экрана к образцу подведены трубки 6 для подачи защитного газа и термопары 7. Печь установлена на расстоянии 100—150 мм от копра, чтобы при продвижении образца 3 по направляющему желобу 8 он попадал на опоры копра. Пространство между опорами перекрывается подвижной заслонкой с направляющими 1. На опоре копра установлен ограничительный упор 2, который определяет положение образца 3 на опорах. Предохранитель пуска маятника заблокирован с выключателем электромагнита, который перед ударом по образцу отводит подвижную заслонку с направляющими 1.

Испытание состоит в следующем. Включают нагрев печи, и температура в ней повышается до заданной. В рабочее пространство печи подают защитный газ под давлением. Поместив внутри экрана образец 3, толкателем 9 вручную продвигают его в среднюю часть желоба 8 в соответствии с отметкой на толкателе. Затем подводят к образцу термопару 7. При заданной температуре выдерживают образец в печи. Во время выдержки (из расчета 1 мин на 1 мм толщины образца) образец в печи поднимают маятник копра и ставят его на предохранитель, а подвижную заслонку с направляющими 1 переводят в рабочее положение. После выдержки образец перемещают толкателем на опоры копра и про-

Здесь K — работа удара, Дж (кгс·м); S_0 — начальная площадь поперечного сечения образца в месте надреза, см², вычисляемая по формуле

$$S_0 = H_1 B, \quad (4.39)$$

где H_1 — начальная высота рабочей части образца, см; B — начальная ширина образца, см.

В результате испытаний на ударный изгиб металлов и сплавов при повышенных температурах до 1000 °С определяют ударную вязкость материала при заданной температуре или строят зависимость ударной вязкости от температуры нагрева образца. Испытание при повышенной температуре проводят на образце

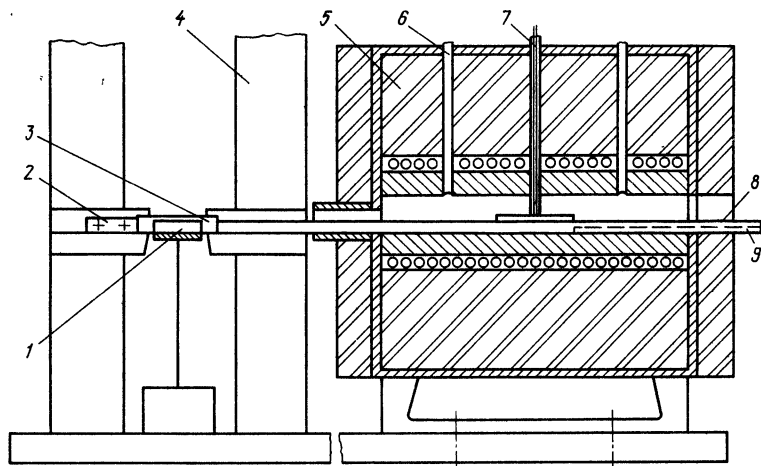


Рис. 4.27. Схема установки для испытания на ударную вязкость при повышенной температуре

изводят удар (перед ударом заслонка должна быть удалена из рабочего пространства копра). После разрушения образца записывают в протокол испытаний работу удара, складывают части образца в тару для охлаждения, затем из печи извлекают термопару.

Ударную вязкость после испытаний вычисляют по формуле (4.38). При одной и той же температуре испытывают не менее пяти образцов, затем проводят статистическую обработку параметров разрушения и находят среднее значение ударной вязкости. При необходимости определить зависимость ударной вязкости материала от температуры после испытаний на ударную вязкость в необходимом диапазоне температур строят график указанной зависимости.

При испытании образцов на ударную вязкость при пониженных температурах испытательные машины снабжают термостатами, обеспечивающими равномерное охлаждение, отсутствие агрессивного воздействия окружающей среды на образец и возможность контроля температуры. В качестве охладителей могут быть использованы жидкий азот или сухой лед в смеси, например, с этиловым спиртом.

Разновидностью ударных испытаний металлов и сплавов является испытание на ударное растяжение (разрыв). Для испытаний используют цилиндрические образцы с рабочей длиной 6—15 мм с резьбовыми головками.

Испытание на ударный разрыв проводят на маятниковых копрах с установленным на них специальным приспособлением (рис. 4.28).

Ударную планку 1 приспособления навинчивают на одну резьбовую головку образца 2, другую головку этого образца

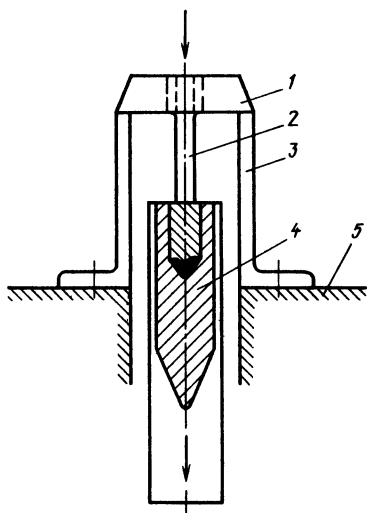


Рис. 4.28. Схема испытания на ударный разрыв

ввертывают в тело маятника 4. Падающий маятник копра представляет собой одно целое с образцом 2 и упорной планкой 1. На станине 5 закреплены болтами два упора 3 приспособления. При падении маятника из рабочего положения он свободно проходит между упорами, но планка 1, размеры которой больше расстояния между упорами, ударяет по ним и останавливается вместе с ввинченной в нее головкой образца. Тогда образец, уносимый маятником, растягивается и разрывается.

По результатам испытания определяют полную работу разрушения K_p и удельную работу по формуле

$$a_{уд} = K_p/V, \quad (4.40)$$

где V — объем рабочей части образца.

Испытания на ударный разрыв являются жесткими, их применяют для оценки поведения металлов и сплавов в сложных условиях эксплуатации.

Вид обработки металлов и сплавов влияет на ударную вязкость и критическую температуру, т. е. температуру, при которой снижается ударная вязкость. Ковка и прокатка повышают ударную вязкость и критическую температуру металлов и сплавов по сравнению с литьем. При значительном деформировании образца в одном направлении ударная вязкость в поперечном направлении продолжает снижаться без соответствующего увеличения ударной вязкости в продольном направлении. Ударная вязкость металла тем выше, чем тоньше и равномернее его структура. В результате отжига значительно повышается ударная вязкость стального литья.

Отпуская хрупкость, свойственная сталям, содержащим хром и марганец, вызвана длительным отпуском при температуре 450—500 °С или медленным охлаждением при этих температурах.

Холодное деформирование, сопровождающееся упрочнением (наклепом) металла, приводит к уменьшению ударной вязкости на уровне ее высоких значений и сдвигает переходную область в сторону более высоких температур. Ударная вязкость возрастает при хранении и достигает максимума только по истечении длительного времени, т. е. в результате естественного старения стали. Отпуск при температурах до 300 °С усиливает процесс старения стали.

С увеличением предела прочности и твердости сталей и сплавов их ударная вязкость снижается, причем область перехода от вязкого разрушения к хрупкому расширяется: более тонкой структуре соответствуют обычно более высокие значения ударной вязкости. Существует связь между ударной вязкостью и относительным сужением при разрыве: малому сужению всегда соответствует низкая ударная вязкость.

4.4. Испытания на усталость

Многие изделия из металлов и сплавов подвергаются сложному нагружению. В результате действия знакопеременных напряжений детали разрушаются еще до достижения предела упругости.

Процесс постепенного снижения прочности материала вследствие появления и развития в нем трещин под действием циклических длительно действующих нагрузок называют усталостью, а разрушение в результате этого процесса — усталостным. Свойство материала противостоять усталости называют сопротивлением усталости.

Усталостные трещины появляются на поверхности изделия и затем распространяются в глубь изделия. Распространение усталостных трещин происходит медленно. При испытаниях на усталость стремятся установить количественную оценку сопротивления усталости материала. Усталостное разрушение обычно начинается при напряжениях ниже не только предела прочности, но и предела текучести. Усталостное разрушение происходит хрупко, без заметных следов пластической деформации. Установлено, что усталостное разрушение наблюдается при растяжении, сжатии, изгибе и кручении, а также при более сложных видах нагружения.

Методы испытаний металлов на усталость регламентированы ГОСТ 25.502—79: при растяжении — сжатии, изгибе и кручении; при симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций; изменяющихся по простому периодическому закону с постоянными параметрами; при наличии и отсутствии концентрации напряжений; при нормальной температуре и влажности; при много- и малоцикловом нагружении в упругой и упругопластической областях.

Цикл напряжения — совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения. Напряжения σ , τ цикла могут быть изображены графически, а также определены по формулам:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a f(t); \quad (4.41)$$

$$\tau = \tau_m + \tau_a f(t), \quad (4.42)$$

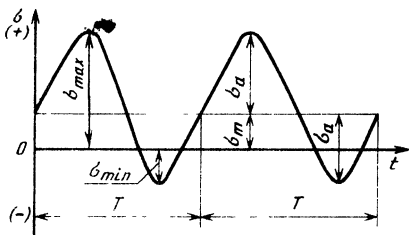


Рис. 4.29. Цикл напряжений при испытании на усталость

где σ_m , τ_m — средние напряжения цикла; σ_a , τ_a — амплитуды цикла; $f(t)$ — непрерывная периодическая функция, характеризующая форму цикла.

Максимальные напряжения цикла — наибольшие алгебраические значения напряжений цикла (рис. 4.29):

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a; \quad (4.43)$$

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a. \quad (4.44)$$

Минимальные напряжения цикла — наименьшие алгебраические значения напряжений цикла, равные разности среднего напряжения цикла и амплитуды:

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a; \quad (4.45)$$

$$\tau_{\min} = \tau_m - \tau_a. \quad (4.46)$$

Средние напряжения определяют по формулам:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (4.47)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}. \quad (4.48)$$

Амплитуды напряжений цикла — наибольшие (положительные) значения переменной составляющей цикла напряжений, определяемые по формулам:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (4.49)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}. \quad (4.50)$$

При испытании образцов на усталость с постоянным средним напряжением цикла предел выносливости определяют как наибольшее значение амплитуды напряжений цикла, при которой не происходит усталостного разрушения после произвольно большого числа циклов нагружения. База испытаний — задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость (число циклов или время).

Под усталостной долговечностью понимают характеристику сопротивления усталости материала, которую определяют числом циклов нагружения, выдержанных образцом до разрушения при задаваемом напряжении. Типы образцов стандартизованы (ГОСТ 25.502—79).

Для построения кривой распределения долговечности и оценки среднего значения и среднего квадратического отклонения логарифма

рифма долговечности на заданном уровне напряжений испытывают не менее 10 одинаковых образцов до полного разрушения или появления макротрещин.

Для установления предела выносливости материала испытываемый образец предварительно подвергают действию знакопеременных напряжений, превышающих предел выносливости для данного материала. Затем у последующих образцов напряжения постепенно уменьшают до значения, при котором образец разрушается при заданном числе циклов. По результатам испытаний не менее 10 образцов строят диаграмму зависимости напряжения от числа циклов (кривая усталости). ГОСТ 25.502—79 рекомендовано построение кривых усталости в полулогарифмических или в двойных логарифмических координатах.

Ускоренные методы испытаний металлов на усталость заключаются в том, что переменное напряжение ступенчато повышают в течение короткого времени и достигают такого напряжения, выше которого деформация образца, его температура начинают повышаться более или менее скачкообразно по отношению к предшествующему повышению. Результаты ускоренных испытаний являются ориентировочными.

При нормальных и ускоренных методах испытания металлов на усталость напряжения в образце определяют в зависимости от схемы нагружения:

при изгибе

$$\sigma_{\max} = M_{\text{из}}/W_{\text{з}}, \quad (4.51)$$

где $M_{\text{из}}$ — изгибающий момент в расчетном сечении образца, Н·м; $W_{\text{з}}$ — осевой момент сопротивления расчетного сечения образца, м³;

при растяжении и сжатии

$$\sigma_{\max} = P/F, \quad (4.52)$$

где P — осевая сила (нагрузка), приложенная к образцу, Н; F — площадь расчетного поперечного сечения образца, м²;

при кручении

$$\tau_{\max} = M_{\text{к}}/W_{\text{р}}, \quad (4.53)$$

где $M_{\text{к}}$ — крутящий момент в расчетном сечении образца, Н·м; $W_{\text{р}}$ — полярный момент сопротивления расчетного сечения образца, м³.

4.5. Испытания на длительную прочность и ползучесть

Испытание на длительную прочность. Длительная прочность — свойство материала противостоять разрушению под действием длительно приложенной нагрузки при температуре до 1200 °С. Характеристиками длительной прочности являются напряжение, время до разрушения и пластичность, которая определяется относительным удлинением и относительным сужением образца.

В результате испытаний определяют предел длительной прочности, т. е. напряжение, вызывающее разрушение металла за определенное время испытания при постоянной температуре. При испытаниях можно также установить контрольную характеристику — время до разрушения при заданном напряжении, которое равно или превышает норму времени, указанную в стандартах или технических условиях на металлопродукцию.

Метод испытания на длительную прочность металлов и сплавов установлен ГОСТ 10145—81. В результате испытаний на длительную прочность определяют: предел длительной прочности материалов при продолжительности испытаний 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000, 10 000 ч; время до разрушения при заданном напряжении; относительное удлинение δ цилиндрических, гладких и плоских образцов после их разрушения; относительное сужение ψ после разрыва цилиндрических гладких образцов и образцов с надрезом.

В качестве образцов для испытаний на длительную прочность применяют: цилиндрический образец диаметром 5 мм с начальной расчетной длиной 25 мм; цилиндрический образец диаметром 10 мм с начальной расчетной длиной 50 мм; цилиндрический образец диаметром 10 мм с начальной расчетной длиной 100 мм; цилиндрический образец диаметром 7 мм с начальной расчетной длиной 70 мм; плоский образец с начальной расчетной длиной

$$l_0 = 5,65 \sqrt{F_0} \text{ мм,}$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм².

Для проведения испытаний образец устанавливают в захватах испытательной машины, помещают его в печь, нагревают до заданной температуры (время нагрева образца должно быть не более 8 ч) и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч.

Для измерения температуры образца на концах его рабочей части устанавливают не менее двух термопар, причем так, чтобы горячие спаи плотно соприкасались с поверхностью образца. Горячий спай термопары должен быть защищен от воздействия раскаленных стенок печи.

После нагрева образца и выдержки при заданной температуре к образцу плавко прикладывают нагрузку. Время до разрушения при заданном напряжении является основным показателем данного вида испытания. После разрушения образца определяют относительное удлинение δ и относительное сужение ψ образца. Испытания на длительную прочность проводят при различных схемах нагружения в зависимости от назначения и условий эксплуатации конструкции, для изготовления которой предназначен данный металл или сплав.

Испытания на ползучесть черных и цветных металлов и сплавов при температуре до 1200 °С регламентированы ГОСТ 3248—81.

Ползучесть — свойства материалов медленно и непрерывно пластически деформироваться при постоянной температуре под действием постоянной и длительной растягивающей нагрузки.

В результате испытания определяют предел ползучести материала, т. е. напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени не превышает заданного значения.

В результате испытаний получают графики в виде кривых ползучести в координатах относительное удлинение (пластическая деформация ползучести) — время, по которым затем определяют напряжение (нагрузку, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца), соответствующее условному пределу ползучести материала.

Под условным пределом ползучести понимают напряжение, которое вызывает за установленное время испытания при данной температуре заданное удлинение образца (суммарное или остаточное) или заданную скорость ползучести на прямолинейном участке кривой ползучести.

Кроме того, при испытании определяют суммарное δ_c или остаточное (пластическое) δ_o относительное удлинение по формулам:

$$\delta_c = \frac{\Delta l}{l_0} 100 \% ; \delta_o = \delta_c - \delta_y,$$

где l_0 — начальная расчетная длина, измеренная при комнатной температуре перед испытанием образца с погрешностью до 0,05 мм; Δl — абсолютное удлинение, регистрируемое при очередном измерении деформации образца в процессе испытаний, мм; δ_y — упругое удлинение образца.

Для испытаний на ползучесть применяют цилиндрические образцы диаметром 10 мм и расчетной длиной 100, 150 и 200 мм, а также плоские образцы шириной 15 мм и расчетной длиной 100 мм.

При испытаниях образец устанавливают в захватах испытательной машины, помещают его в печь, нагревают до заданной температуры (время нагрева образца должно быть не более 8 ч) и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч. Для измерения температуры образца на нем устанавливают не менее двух термопар.

После нагрева образца и выдержки при заданной температуре к образцу плавно прикладывают нагрузку, равную примерно 10 % заданной общей нагрузки; при этом предварительная нагрузка не должна вызывать в образце напряжение более 10 МПа.

Если температура образца и показания измерителя удлинения в течение 5 мин остаются неизменными, образец плавно догружают до заданной нагрузки. Одновременно регистрируют удлинение образца.

По окончании испытания образец разгружают (до значения предварительной нагрузки) и определяют абсолютное остаточное удлинение.

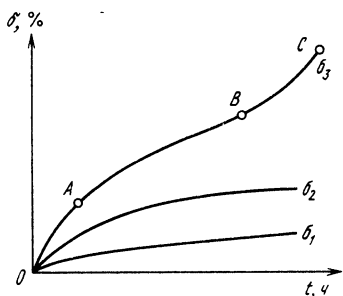


Рис. 4.30. Диаграмма ползучести

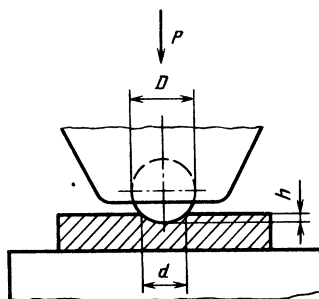


Рис. 4.31. Схема измерения твердости по Бринеллю

При определении условного предела ползучести испытывают серию образцов при данной температуре и трех-четырех уровнях напряжений. Число образцов в серии должно обеспечивать необходимую точность определения условного предела ползучести. На основании полученных кривых ползучести определяют средние значения δ_0 и δ_0 и скорости ползучести на прямолинейном участке каждого уровня напряжений и строят диаграммы зависимости между напряжением и удлинением или между напряжением и средней равномерной скоростью ползучести на прямолинейном участке в логарифмической системе координат.

Кривые, описывающие процесс ползучести, приведены на рис. 4.30.

При испытании на ползучесть процесс деформирования может постепенно прекратиться (при σ_1), а может продолжаться до разрушения (при σ_2) в зависимости от напряжения и температуры, а также от сопротивления данного материала воздействию этих двух факторов.

Кривые ползучести имеют три основных участка: начальный участок *OA* упругопластической деформации, при которой скорость деформации непрерывно уменьшается, на этом участке повышается сопротивление ползучести; участок *AB*, на котором скорость ползучести остается практически постоянной и минимальной; участок *BC*, на котором скорость ползучести значительно увеличивается, в конце участка образец разрушается.

Испытание на ползучесть дает представление о поведении металла или сплава в условиях длительного нагружения при высоких температурах.

4.6. Измерение твердости

Измерение твердости — весьма распространенный вид испытания материалов. Его преимущества: не вызывает серьезного повреждения испытываемого материала; не требует изготовления специальных образцов; для испытания на твердость достаточно обра-

ботать небольшой участок поверхности напильником, шлифовальным кругом или шлифовальной бумагой.

Методы измерения твердости предусматривают внедрение индентора (стального шарика, алмазного конуса, алмазной пирамиды, алмазного наконечника) и определение размеров его отпечатка.

Методы измерения твердости материалов можно разделить на статические и динамические.

Нагрузку к индентору при статических измерениях прикладывают плавно и постепенно, причем время выдержки под нагрузкой регламентируется соответствующими стандартами на методы измерения твердости. К динамическим относят методы упругой отдачи алмазного наконечника и ударного вдавливания закаленного шарика.

Статические методы. *Метод измерения твердости по Бринеллю* регламентирован ГОСТ 9012—59. При определении твердости по Бринеллю стальной шарик диаметром D вдавливается в испытуемый образец под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени (рис. 4.31).

Число твердости по Бринеллю (НВ) определяют путем деления нагрузки P , Н, на площадь поверхности сферического отпечатка (мм^2) и вычисляют по формуле

$$\text{НВ} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.54)$$

где D — диаметр шарика, мм; d — диаметр отпечатка, мм.

Сферические инденторы дают геометрические неподобные отпечатки разных размеров. Подобные отпечатки получаются только тогда, когда при разных диаметрах шариков относительные глубины отпечатков равны. Практически это условие трудно выполнить. Приняв $d = (0,2 \dots 0,6) D$ и для определенных уровней твердостей установив соответствующие нагрузки, можно получить подобные отпечатки, а следовательно, одинаковую твердость одного и того же материала, если нагрузки P относятся как квадраты диаметров D шариков.

Для более точного измерения твердости следует применять шарики наибольшего диаметра, т. е. 10 мм. При измерении твердости чугуна и крупнозернистых материалов использование большого шарика дает более точное среднее значение твердости структур, состоящих из разных структурных составляющих.

Диаметр шарика и нагрузку выбирают в соответствии с характером, формой и размером образца. Тонкие образцы, особенно образцы с сильно искривленной поверхностью, а также тонкостенные полые образцы необходимо испытывать при малых нагрузках.

При измерении твердости шариком диаметром $D = 10,0$ мм под нагрузкой $P = 30\,000$ Н с выдержкой $t = 10$ с число твердости по Бринеллю обозначают символом НВ, например, НВ 300.

При других условиях измерения обозначение числа твердости дополняют индексом, указывающим условия измерения в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки. Например, НВ 5/520/25—250 означает, что число твердости по Бринеллю равно 250 и получено при измерении шариком диаметром $D = 5,0$ мм под нагрузкой $P = 5200$ Н (520 кгс), приложенной в течение $t = 25$ с.

Диаметр отпечатка должен быть измерен с помощью измерительного микроскопа в сотых долях миллиметра. Диаметр отпечатка необходимо определять как среднее арифметическое из двух измерений взаимно перпендикулярных диаметров.

При выборе диаметра шарика D , нагрузки P , продолжительности выдержки под нагрузкой и минимальной толщины испытуемого образца следует использовать данные таблицы, приведенной в ГОСТ 9012—59.

Числа твердости по Бринеллю (НВ) для каждого отпечатка шарика приведены в приложении ГОСТ 9012—59. В этом стандарте изложены также требования к испытуемым образцам, а также условия приложения нагрузки.

Диаметры полученных отпечатков d при измерении твердости по Бринеллю должны находиться в пределах $0,2D < d < 0,6 D$. Если это условие не соблюдается, испытание считается недействительным. Определение твердости измерением глубины отпечатка дает значение твердости, несколько отличающееся от полученного при измерении диаметра, так как при этом не учитываются образующийся наплыв металла, а также вспучивание краев отпечатка. В связи с этим глубину измеряют только при серийных испытаниях одного и того же материала, при которых граничные отметки на циферблате глубиномера устанавливают на основании сравнительных испытаний, поскольку они соответствуют нижнему и верхнему пределам твердости по Бринеллю.

Используя зависимость между твердостью по Бринеллю НВ и глубиной h отпечатка, можно определить h и площадь F отпечатка:

$$h = \frac{P}{\pi D \cdot \text{НВ}}; \quad (4.55)$$

$$F = \pi D h. \quad (4.56)$$

Необходимо помнить, что на обратной стороне испытуемого образца после измерения твердости не должно быть следов деформации.

Число твердости по Бринеллю зависит от предварительной горячей или холодной обработки металлов давлением и температуры испытания точно так же, как предел прочности. Существует соотношение между числом твердости по Бринеллю и пределом прочности испытуемого образца:
для сталей

$$\sigma_b \approx 0,35 \text{ НВ}; \quad (4.57)$$

для меди

$$\sigma_{\text{в}} \approx 0,48 \text{ НВ}; \quad (4.58)$$

для алюминиевых сплавов

$$\sigma_{\text{в}} \approx 0,25 \text{ НВ}. \quad (4.59)$$

Установлена также связь между числом твердости по Бринеллю и пределом текучести неупрочняющегося материала

$$\sigma_{\text{т}} \approx 0,383 \text{ НВ}. \quad (4.60)$$

Предел прочности и предел текучести, вычисленные по твердости, следует округлять до целого числа и сопровождать примечанием «рассчитано по твердости».

Значительные размеры отпечатков дают возможность измерить твердость с большой точностью, следовательно, метод Бринелля можно использовать при изучении вопросов, связанных с исследованием пластической деформации и процессов деформирования, при которых размеры пластической области соизмеримы с размером отпечатка при измерении твердости.

Метод измерения твердости по Роквеллу (ГОСТ 9013—59) применяют для определения твердости черных и цветных металлов и сплавов по шкалам А, В, С при температуре 20 ± 10 °С. Наконечник стандартного типа (алмазный конус или стальной шарик) вдавливают в испытуемый образец под давлением двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной P_0 и общей P , которая равна сумме предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок (рис. 4.32):

$$P = P_0 + P_1. \quad (4.61)$$

Нагрузка может изменяться в широком диапазоне. Наиболее часто используют нагрузки: 1500 Н (100 Н предварительная и 1400 Н основная) — шкала С; 1000 Н (100 Н предварительная и 900 Н основная) — шкала В; 600 Н (100 Н предварительная и 500 Н основная) — шкала А. Твердость определяют по шкалам, соответствующим установленным нагрузкам. Наиболее распространены шкалы А и С. Для измерения по этим шкалам используют алмазные конусы с углом при вершине 120° и радиусом закругления при вершине 0,2 мм. При измерении твердости по шкале В в качестве индентора используют стальной шарик диаметром 1,588 мм. Метод измерения твердости по Роквеллу дает возможность быстро проводить испытания, поскольку фиксация числа твердости производится непосредственно на шкале прибора для измерения твердости.

Твердость по Роквеллу определяют в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Остаточную деформацию определяют после снятия основной нагрузки. Число

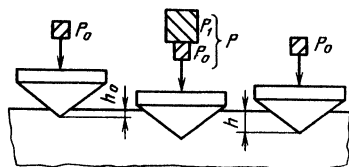


Рис. 4.32. Схема измерения твердости по Роквеллу

**Перевод чисел твердости HRC₉ шкалы С Роквелла
в числа твердости HRC шкалы С Роквелла,
воспроизводимой государственным специальным эталон**

HRC ₉	HRC	HRC ₉	HRC	HRC ₉
20,0	17,8	36,5	34,8	52,5
20,5	18,3	37,0	35,3	53,0
21,0	18,8	37,5	35,8	53,5
21,5	19,3	38,0	36,3	54,0
22,0	19,9	38,5	36,8	54,5
22,5	20,4	39,0	37,4	55,0
23,0	20,9	39,5	37,9	55,5
23,5	21,4	40,0	38,4	56,6
24,0	21,9	40,5	38,9	56,5
24,5	22,4	41,0	39,4	57,0
25,0	23,0	41,5	39,9	57,5
25,5	23,5	42,0	40,5	58,0
26,0	24,0	42,5	41,0	58,5
26,5	24,5	43,0	41,5	59,0
27,0	25,0	43,5	42,0	59,5
27,5	25,5	44,0	42,5	60,0
28,0	26,0	44,5	43,0	60,5
28,5	26,6	45,0	43,5	60,5
29,0	27,1	45,5	44,1	61,0
29,5	27,6	46,5	45,1	61,5
30,0	28,1	47,0	45,6	62,0
30,5	28,6	47,5	46,1	62,5
31,0	29,1	48,0	46,6	63,0
31,5	29,6	48,5	47,1	63,5
32,0	30,2	49,0	47,7	64,0
32,5	30,7	49,5	48,2	64,5
33,0	31,2	50,0	48,7	65,0
33,5	31,7	50,5	49,2	65,5
34,0	32,7	51,0	49,7	66,5
35,0	33,2	51,5	50,2	67,0
35,5	33,8	52,0	50,7	67,5
36,0	34,3			

твердости отсчитывают по шкале индикатора часов стрелка которого автоматически показывает результат разности глубин в миллиметрах, на которые вдавливают индентор под действием двух последовательных нагрузок, из некоторой постоянной, выраженной в миллиметрах.

Твердость по Роквеллу обозначают HRC с добавочной буквы, обозначающей шкалу, по которой производят измерения.

По шкале С измеряют твердость закаленных сталей и отпущенных сплавов в диапазоне твердости H

По шкале В измеряют твердость сталей с низким и средним содержанием углерода, латуней, бронз и других материалов в диапазоне твердости HRB 25—100.

По шкале А измеряют твердость различных материалов в диапазоне HRA 70—85.

Число твердости по Роквеллу при измерении по шкалам А и С определяют путем вдавливания алмазного конуса и вычисляют по формуле

$$\text{HRA} = \text{HRC}_0 = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (4.62)$$

где h_0 — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки P_0 ; h — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки P , измеренная после снятия основной нагрузки P_1 с оставлением предварительной нагрузки P_0 .

Число твердости при измерении по шкале В определяют путем вдавливания стального шарика и вычисляют по формуле

$$\text{HRB} = 130 - \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (4.63)$$

где h и h_0 — то же, что и в формуле (4.67).

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или расстояние от центра какого-либо отпечатка до края образца должно быть не менее 3 мм.

Индикатор прибора содержит две шкалы: черную (наружную) при использовании алмазного наконечника и красную (внутреннюю) при использовании стального шарика.

Измерение твердости по Роквеллу получило широкое применение, поскольку позволяет определять твердость быстро и просто. Получаемые отпечатки относительно малы, поэтому этот метод применяют в массовом производстве для контроля готовых стальных деталей.

На основании ГОСТ 8.064—79 проведена корректировка шкалы С и уточнены переводные числа твердости HRC в числа твердости HRC₀ шкалы С (табл. 4.2.)

Метод измерения твердости по Виккерсу регламентирован ГОСТ 2999—75. Твердость черных и цветных металлов и сплавов измеряют при нагрузках от 9,8 Н (1 кгс) до 980 Н (100 кгс).

Измерение твердости основано на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка d_1 и d_2 , оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки (рис. 4.33.)

Твердость по Виккерсу HV вычисляют по формуле

$$\text{HV} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (4.64)$$

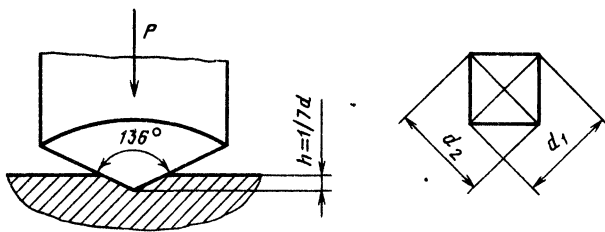


Рис. 4.33. Схема определения твердости по Виккерсу

где P — нагрузка, Н; α — угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ; d — среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Расстояние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка. Минимальная толщина образца или слоя должна быть для стальных изделий больше диагонали отпечатка в 1,2 раза, для изделий из цветных металлов — в 1,5 раза.

Символ HV сопровождается индексами, указывающими нагрузку и время выдержки, если это время отличается от рекомендуемого стандартом (10—15 с). Например: 30HV означает число твердости, полученное при нагрузке 300 Н и времени выдержки 10—15 с; 220 HV 10/40 — твердость по Виккерсу, определенная при нагрузке 100 Н, приложенной в течение 40 с. При измерении твердости алмазной пирамидой применяющие следующие нагрузки: 10; 20; 25; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000 Н.

Твердость по Виккерсу, вычисленная по формуле (4.64), в зависимости от длины диагонали отпечатка при стандартных значениях нагрузки P приведена в приложении ГОСТ 2999—75. При нестандартных испытаниях твердость по Виккерсу вначале устанавливают по результатам измерения диагонали отпечатка алмазной пирамиды и с учетом нагрузки на индентор, а затем проводят расчет HV по формуле (4.64).

Метод Виккерса считают наиболее совершенным, он позволяет измерять твердость как мягких, так и самых твердых материалов.

Методы измерения микротвердости регламентированы ГОСТ 9450—76 и предназначены для измерения микротвердости изделий и образцов из металлов, сплавов, минералов, стекол, пластмасс, полупроводников, керамики, тонких листов, фольги, пленок, гальванических, диффузионных, химически осажденных и электроосажденных покрытий вдавливанием алмазных наконечников. Микротвердость — это твердость очень малых (микроскопических) объемов материалов.

Стандарт устанавливает два метода испытаний: по восстановленному отпечатку (основной метод) и по невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

Измерение микротвердости методом восстановленного отпечатка состоит в нанесении на испытуемую поверхность изделия отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. Максимальная нагрузка составляет 4,905 Н.

Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки в ньютонах (килограмм-силах) на условную площадь боковой поверхности отпечатка в квадратных миллиметрах.

При измерении микротвердости применяют алмазные наконечники четырех форм: четырехгранную пирамиду с квадратным основанием, трехгранную пирамиду с основанием в виде равностороннего треугольника, четырехгранную пирамиду с ромбическим основанием, бицилиндрический наконечник.

Для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием число микротвердости H_{\square} вычисляют по формуле

$$H_{\square} \cong \frac{1,854P}{d^2}. \quad (4.65)$$

Для трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника число микротвердости H_{∇} вычисляют по формуле

$$H_{\nabla} \cong \frac{1,57P}{l_{\nabla}^2}. \quad (4.66)$$

Для четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием число твердости H_{\diamond} следует вычислять по формуле

$$H_{\diamond} \cong \frac{12,896P}{l_{\diamond}^2}. \quad (4.67)$$

Для бицилиндрического наконечника число микротвердости H_{\odot} определяют по формуле

$$H_{\odot} \cong \frac{4,168P}{l_{\odot}^3}. \quad (4.68)$$

В формулах (4.65)—(4.68) приняты следующие обозначения: P — нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н; d — среднее арифметическое длин диагоналей квадратного отпечатка, мм; l — размер отпечатка, мм.

Измерение микротвердости методом невосстановленного отпечатка заключается в нанесении на поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени, с одновременным измерением глубины отпечатка. Метод невосстановленного отпечатка применяют также для определения дополнительных характеристик материала.

При этом методе число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки

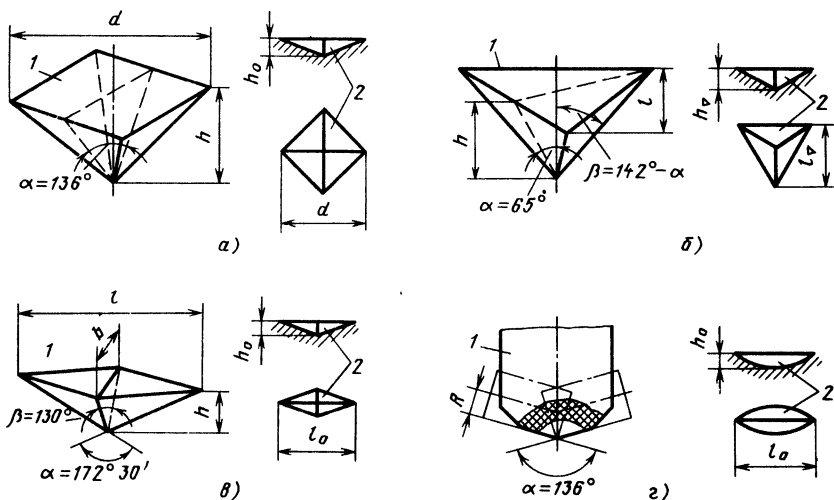


Рис. 4.34. Формы алмазных наконечников (1) и отпечатков (2) на образцах при измерении микротвердости:

a — четырехгранная пирамида с квадратным основанием; *б* — трехгранная пирамида с основанием в виде равностороннего треугольника; *в* — четырехгранная пирамида с ромбическим основанием; *г* — бицилиндрический наконечник

в ньютонах на условную площадь боковой поверхности отпечатка в квадратных миллиметрах, соответствующую его измеренной глубине.

В зависимости от формы наконечника (рис. 4.34) числа микротвердости определяют по формулам:

для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием

$$H_{\square h} \cong \frac{0,03784P}{h_{\square}^2}; \quad (4.69)$$

для трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника

$$H_{\nabla h} \cong \frac{0,03797P}{h_{\nabla}^2}; \quad (4.70)$$

для четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием

$$H_{\diamond h} \cong \frac{0,01385P}{h_{\diamond}^2}; \quad (4.71)$$

для бицилиндрического наконечника

$$H_{\odot h} \cong \frac{0,07292P}{h_{\odot}^{3/2}}, \quad (4.72)$$

где P — нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, H (кгс); h — глубина отпечатка, мм.

Число микротвердости вычисляют по формулам (4.65)—(4.72) или находят по таблицам прил. 1 (ГОСТ 9450—76). Размеры d и l отпечатка по его измеренной глубине h (см. рис. 4.34) определяют по таблице прил. 3 (ГОСТ 9450—76).

Нагружение следует проводить плавно, без толчков; скорость опускания алмазного наконечника не должна влиять на размеры отпечатка; продолжительность выдержки не менее 3 с.

Измерение твердости царапанием применяют в минералогии как качественный метод. При этом методе твердость определяют по шкале Мооса. Метод измерения твердости царапанием применяют при сравнении твердости образцов.

В качестве индентора при определении твердости царапанием используют алмазный конус с углом при вершине 90 или 120°. Этим конусом, находящимся под нагрузкой, проводят царапину на тщательно отшлифованной или отполированной поверхности образца. По ширине этой царапины при определенной нагрузке (а иногда по нагрузке при заданной ширине царапины) судят о твердости материала.

Ширину царапины измеряют с погрешностью до 0,001 мм.

Динамические методы. При динамическом методе определения твердости испытательный индентор воздействует на образец с определенной кинетической энергией, а энергия расходуется на деформацию образца (формирование отпечатка), подъем груза, а также на образование теплоты при трении, вибрации и т. д. (потери). Существует два способа динамического определения твердости: первый основан на расчете твердости по отпечатку; второй — на измерении высоты отдачи (отскакивания) индентора. Рассмотрим эти способы подробнее.

Определение твердости с помощью падающего груза. Шарик вдавливается в поверхность образца под действием свободно падающего груза. Для этого может быть использован маятниковый копер, в ударном молоте которого вместо ножа установлен стальной шарик. Твердость определяют как отношение энергии падения A к объему V .

При испытании образец должен быть установлен перпендикулярно к направлению падения молота. Трение должно быть по возможности исключено. Этот способ целесообразно применять для измерения твердости при повышенных температурах, так как индентор соприкасается с нагретым образцом в течение очень малого времени и не влияет на температуру образца.

Определение твердости методом удара. Шарик вдавливается в испытуемый материал под действием силы пружины или ударом молотка (молотки Польшди, Бринелля). В первом случае энергия удара постоянна, во втором — переменна. В результате удара отпечатки остаются на эталонном бруске определенной твердости и на образце. Твердость испытуемого образца определяют по соотношению диаметров обоих отпечатков. По степени точности этот метод уступает статическим.

Определение твердости методом упругой отдачи (метод Шора). Измерение этим методом заключается в определении высоты отскока бойка, свободно падающего с постоянной высоты на поверхность образца.

Небольшой боек снабжен закругленным алмазным наконечником. При ударе бойка часть кинетической энергии расходуется на пластическое деформирование поверхности образца, часть переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Под действием этой энергии боек отскакивает на определенную высоту, которая является показателем твердости образца. Высота отскока тем меньше, чем меньше кинетической энергии затрачено на пластическую деформацию. Твердость, измеренная по высоте отскока, зависит от формы, массы и высоты падения бойка, а также от массы образца. Если масса образца мала, часть кинетической энергии бойка идет на образование колебаний образца, в результате чего высота отскока бойка уменьшается. Вследствие этого при измерении твердости мелкие детали следует плотно прижимать к столу прибора. Этим методом измеряют твердость прокатных валков, массивных поковок и других крупных изделий.

Контрольные вопросы

1. Назовите методы механических испытаний металлов и сплавов.
2. Чем отличаются статические испытания металлов и сплавов от динамических?
3. Назовите цель испытаний металлов и сплавов на ударный изгиб и характеристики, определяемые при этом виде испытаний.
4. Какие виды разрушений образцов из металлов и сплавов наблюдаются при механических испытаниях?
5. С какой целью проводят испытания на усталость?
6. Назовите методы определения твердости металлов и сплавов.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Б.1. Классификация оборудования и приборов для проведения механических испытаний

Испытательное оборудование и приборы для механических испытаний классифицируют в зависимости от области их применения, принципа работы и назначения. Различают семь основных групп испытательного оборудования и приборов: 1) машины для статических испытаний; 2) машины для испытаний при ударных нагрузках; 3) машины для испытаний при повторно-переменных нагрузках; 4) машины для проведения специальных видов испытаний; 5) приборы для определения твердости; 6) приборы для измерения усилий; 7) контрольно-измерительные средства.

Первая группа — машины для испытания на растяжение, сжатие, поперечный и продольный изгиб, машины для одновременного кручения и растяжения или сжатия и кручения.

Вторая группа — копры вертикального типа с падающим бойком, маятниковые, пневматические, ротационные крутильные.

Третья группа — машины для испытания на усталость изгибом и вращением образца, изгибом образца в одной плоскости, растяжением-сжатием образца, кручением образца, одновременным растяжением и кручением.

Четвертая группа — машины для испытания на упрочнение изделий способом поверхностного пластического деформирования, микромашины для испытания порошковых пластин и пластин из эльбора и др.

Пятая группа — приборы для измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, переносной прибор для измерения твердости металла методом упругого отскока бойка (по Шору), прибор для измерения микротвердости.

Шестая группа — эталонные установки, переносные образцовые динамометры, типовые гидравлические динамометры, рабочие пружинные динамометры растяжения, силоизмерительные машины и другие приборы.

Седьмая группа — механические и электрические тензометры.

Б.2. Устройство и принцип действия машин для статических испытаний

Машины для статических испытаний характеризуются статическим нагружением, т. е. действием плавно возрастающей нагрузки на образец от нуля до определенного наибольшего значе-

ния, остающейся затем постоянной или незначительно изменяющейся. Для механических испытаний металлов и сплавов выпускаются машины для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез. Такие машины состоят из механизма деформирования испытуемого образца до его разрушения и из механизма измерения усилия, с которым образец сопротивляется деформированию, а также прибора для записи диаграммы испытания образца. В этих машинах имеется также узел для крепления образца и центрирования действующего на него усилия.

В зависимости от принципа действия механизма деформирования образца машины делят на два вида: машины с электромеханическим и гидравлическим (электروهидравлическим) приводами. Для измерения усилия сопротивления образца деформированию служит специальный механизм, называемый силоизмерителем. Силоизмерители подразделяют на рычажные, основанные на принципе закручивания упругого элемента, и на измерители гидростатического давления.

В машинах с рычажным силоизмерительным механизмом имеются горизонтальный рычаг, соотношение плеч 2 и 3 которого постоянно, и переменный съемный груз 4 для определения нагрузки, действующей на образец 1 (рис. 5.1). В машинах с горизонтальным рычагом подвижный постоянный груз 1 на нем перемещается по длинному плечу 2 рычага, при этом измеряемая нагрузка действует на короткое плечо 4 рычага уже многократно уменьшенная системой промежуточных рычагов 3 (рис. 5.2).

В машинах с рычажно-маятниковым силоизмерителем сила сопротивления образца 3 прикладываемой к нему нагрузке передается системой рычагов 2 к свободно подвешенному тяжелому маятнику 1 (рис. 5.3). Маятниковые силоизмерительные механизмы с гидравлической передачей усилия устанавливаются на испытательных машинах с гидравлическим приводом (насосом 1) (рис. 5.4). Рабочий

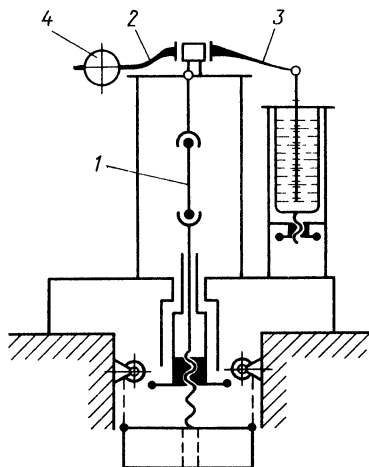


Рис. 5.1. Схема разрывной машины с рычажным силоизмерительным механизмом и переменным грузом

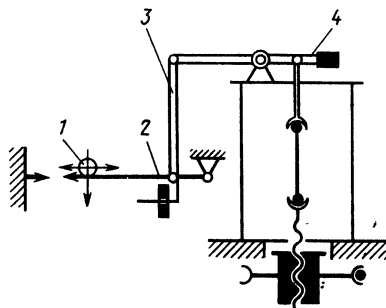


Рис. 5.2. Схема разрывной машины с рычажным силоизмерительным механизмом и подвижным постоянным грузом

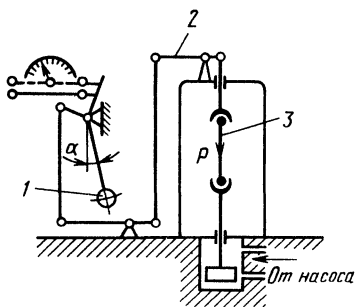


Рис. 5.3. Схема разрывной машины с рычажно-маятниковым силоизмерителем

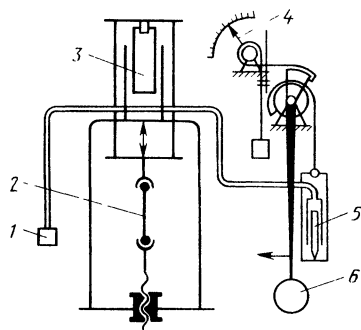


Рис. 5.4. Схема разрывной машины с маятниковым силоизмерительным устройством и гидравлической передачей

цилиндр 3 соединяется трубопроводом с небольшим цилиндром 5. Нагрузка, приложенная к образцу 2, равна произведению площади рабочего поршня цилиндра на давление жидкости в рабочем цилиндре 3. Цилиндр 5 силоизмерителя имеет небольшое поперечное сечение, давление в нем также равняется давлению жидкости и это давление передается тягам, шарнирно связанным с маятником 6. Маятник 6, отклоняясь при испытании на некоторый угол, приводит во вращение стрелку 4 на шкале силоизмерителя.

К рычажным испытательным машинам с электромеханическим приводом относятся разрывная машина мод. ИМ-4Р. Электродвигатель 16 (рис. 5.5) через червячную и зубчатую пары передает вращение гайке 14, посаженной на шпindel 15. Гайка 14 через шарикоподшипник 13 перемещает шпindel 15 вверх и вниз

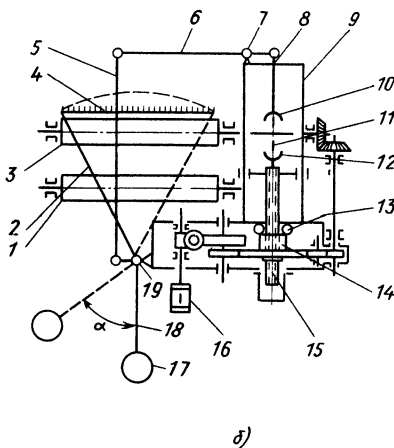
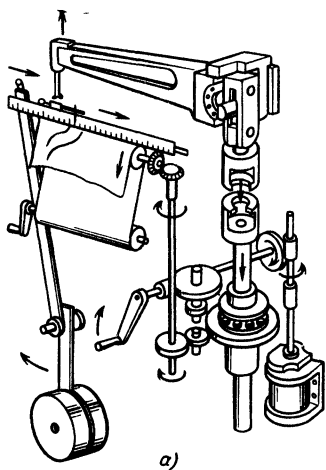


Рис. 5.5. Общий вид (а) и кинематическая схема (б) разрывной машины ИМ-4Р

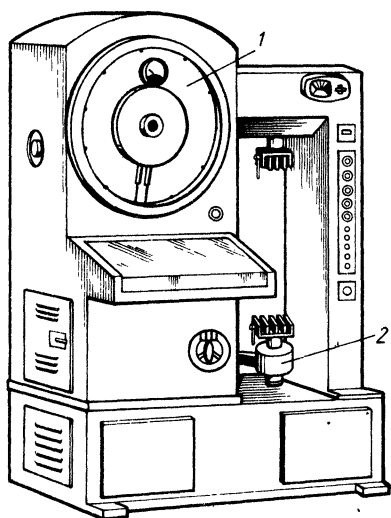


Рис. 5.6. Разрывная машина РМУ-1

вместе с захватом 12. Испытуемый образец 11, шарнирно закрепленный головками в захватах 10 и 12, соединяет шпиндельный нагружающий механизм с силоизмерительным механизмом испытательной машины. Захват 10 с помощью подвеса 8 шарнирно соединен с коротким плечом рычага 6, имеющего главную ось вращения 7, установленную на опорах в верхней части станины машины 9. При нагружении образца 11 через подвес 8, установленный на коротком плече рычага 6, нагрузка на подвес 5 на его длинном плече уменьшается в 40 раз. В результате этого с помощью подвеса 5 происходит поворот коленчатого рычага 18, вращающегося на оси 19, закрепленной на опорах станины машины 9.

Длинное плечо коленчатого рычага 18 предназначено для подвеса тяжелого маятника 17 со сменным грузом. Угол поворота маятника пропорционален силе вращения, переданной подвесом 5, и обеспечивает необходимое перемещение поводка 2, который вращается вместе с маятником на оси 19. Перемещение регистрируется на шкале 4 или в виде диаграммы растяжения на пишущем приборе, который записывает на бумаге с помощью пера каретки, скользящей под действием поводка вдоль шкалы 4. Испытательная машина ИМ-4Р позволяет проводить испытания с предельными нагрузками 39,2 и 19,6 кН.

Диаграмма растяжения образца записывается на миллиметровой бумаге, подаваемой с нижнего барабана 1 на верхний барабан 3. Барабан 3 приводится во вращение посредством зубчатых передач от гайки 14, которая производит перемещение нижнего захвата 12, т. е. угловое перемещение барабана 3 с натянутой на нем бумагой строго пропорционально абсолютному удлинению образца. Машина ИМ-4Р позволяет испытывать на растяжение образцы диаметром от 3 до 6 мм и может быть использована для испытаний на сжатие, срез, изгиб.

Для испытания на растяжение образцов из металлов и сплавов с небольшими нагрузками применяют разрывную машину мод. РМУ-1 с предельной нагрузкой 10 кН. Эта машина выполнена с электромеханическим приводом (рис. 5.6), она снабжена прибором 1 для автоматической записи диаграммы растяжения образца с масштабом по оси деформации до 50 : 1. Машина считается абсолютно жесткой, деформация образца осуществляется

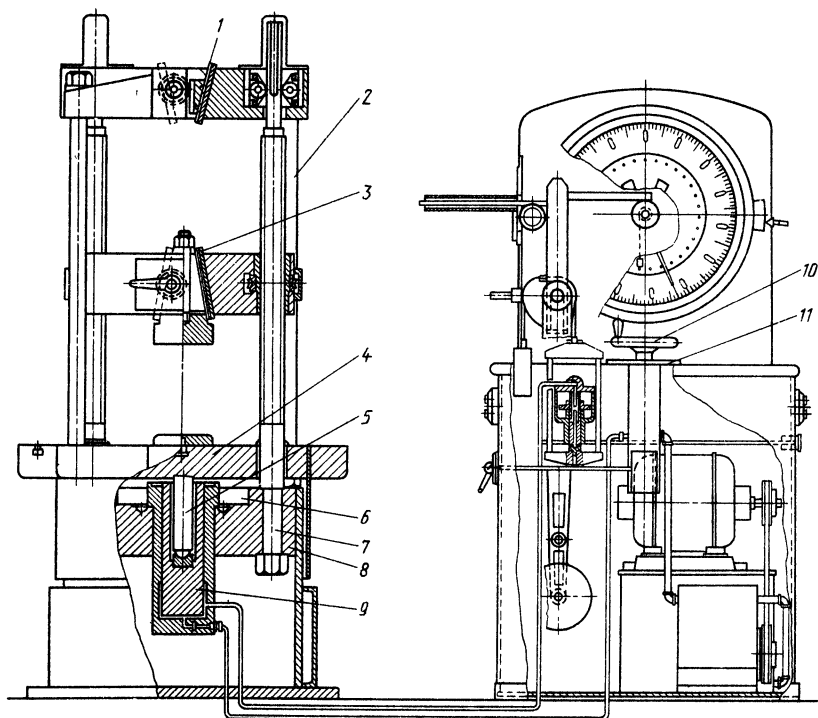


Рис. 5.7. Испытательная машина мод. Р-2 с гидравлическим приводом (фирма Риле, США)

только от перемещения нижнего захвата испытательной машины при неподвижном верхнем захвате. При испытании образец закрепляют в зажимах захвата 2 машины. Под действием нагрузки образец удлиняется, а в это время подвижный нижний захват перемещается. Деформация и нагрузка на каждом этапе испытания образца фиксируются на приборе автоматической записи диаграммы.

Широко используются испытательные универсальные машины мод. Р-2 фирмы «Риле» (США). Эта машина мощностью 294 кН предназначена для растяжения, сжатия и изгиба стальных образцов диаметром до 20 мм (рис. 5.7). Машина состоит из маятникового индикатора и насосного агрегата с устройством для нагружения образца. Устройство для нагружения снабжено двумя головками: верхней 1 и нижней 3 с клиновыми зажимами для испытания на растяжение. Рабочий стол (стол для сжатия образцов) 4 и верхняя тяговая головка 1 соединены четырьмя тягами 2, образующими клеть. Нижняя часть этой клетки (стол для сжатия образцов) 4 прикреплена к верхней части стойки 6 со сферическим нижним ковцом, установленной в шарообразном углублении

в центре главного плунжера 5. Верхний конец клетки (верхняя тяговая головка 1) направляется роликовыми подшипниками на двух неподвижных винтах 7. Нижняя тяговая головка поддерживается двумя винтами 7, представляющими одно целое с фундаментной плитой 8. Главный цилиндр 9 с изоляцией от пыли и грязи установлен внутри плиты 8.

Под действием гидравлического давления поршень поднимает стол и вместе с ним верхнюю тяговую головку 1. Так как нижняя головка неподвижна, образец, закрепленный в верхней 1 и нижней 3 головках, подвергается действию растягивающей нагрузки, а образец, установленный между столом 4 и нижней головкой, — действию сжимающей нагрузки.

Конечные выключатели исключают перегрузку при любом диапазоне нагрузок и превышение заданного хода плунжера.

Маховик для регулирования скорости 10 и градуированный диск 11 установлены на большом столе впереди индикаторного агрегата. Маховик 10 приводит в действие специальный трехходовый вентиль, который служит для соединения главного цилиндра с системой, подающей масло под высоким давлением для создания нагрузки, или с реверсом для снятия нагрузки с образца и обратного хода. Этот вентиль необходим для управления потоком масла в обоих направлениях. Число скоростей для испытаний неограниченное, так как регулировка бесступенчатая. Скорости нагружения указаны на диске 11, градуированном в миллиметрах в минуту. Один поворот маховика 10 охватывает весь диапазон управления гидравлической системой (регулировка скорости, скорость приложения нагрузки, нуль, разгрузка и обратный ход).

Испытание на растяжение на машине Р-2 проводят следующим образом. Сначала устанавливают необходимые зажимы для крепления образца. Назначают нагрузку и устанавливают стрелку на шкале индикаторного агрегата на эту нагрузку. Затем на маятнике машины устанавливают груз, соответствующий этой нагрузке. Стол поперечной подачи опускается для обеспечения достаточного хода при окончании испытания образца. Нижнюю тяговую головку регулируют для закрепления образца. Образец вставляют в зажим головок машины, при этом нулевая точка установлена на индикаторном диске. Затем диск поворачивают на необходимую скорость испытания. Производится растяжение образца. Диаграмма растяжения записывается на миллиметровой бумаге, установленной на специальном барабане, который закреплен на левой верхней стороне панели индикаторного агрегата.

Для испытания образцов на сжатие и изгиб на этой машине применяют специальные приспособления.

Машина имеет пять шкал нагрузки (1 кгс \approx 10 Н):

шкала	30 000 кгс	—	цена деления	шкалы	50	кгс	
»	15 000	»	—	»	»	25	»
»	6 000	»	—	»	»	10	»

»	3 000 кгс —	»	»	»	5 кгс
»	1 500 » —	»	»	»	2,5 »

Скорость нагружения образца машины может быть изменена в пределах 0—10 мм/мин. Погрешность показаний нагрузки составляет $\pm 1\%$.

Отечественной промышленностью выпускаются следующие испытательные машины для статических испытаний металлов и сплавов.

1. Разрывная машина мод. Р-0,5 для испытания проволоки и металлической ленты с постоянной скоростью деформирования. В машине предусмотрена запись процесса испытания на диаграммном аппарате в координатах нагрузка — деформация. Абсолютное удлинение образца определяется по шкале деформации. Шкала оснащена электроприводом с плавным регулированием скорости. Предельная нагрузка при испытании образца 5 кН, силоизмеритель маятникового типа. Число диапазонов измерения нагрузки — 3 (0,2—1 кН; 0,5—2,5 кН; 1—5 кН). Допускаемая погрешность записи нагрузки от измеряемой величины в каждом диапазоне измерений не более $\pm 2\%$.

2. Испытательная машина мод. Р-5 предназначена для испытаний на растяжение, сжатие и изгиб образцов из металлов при нормальной температуре, с постоянной скоростью деформирования. В машине предусмотрена запись процесса испытания на диаграммном аппарате в координатах нагрузка—деформация, абсолютное удлинение образца фиксируется счетчиком деформаций. Машина оснащена электроприводом с плавным регулированием скорости. Силовизмеритель маятниковый. Предельная нагрузка при испытании 50 кН. Число диапазонов измерения нагрузки — 3. Диапазоны измерения нагрузки: от 2 до 10 кН; от 5 до 25 кН; от 10 до 50 кН. Допускаемая погрешность записи нагрузки от измеряемой величины в каждом диапазоне измерений $\pm 2\%$.

3. Разрывная машина мод. 2055 Р-0,5 предназначена для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и малоцикловую усталость при знакопостоянном цикле образцов из пластмасс, черных и цветных металлов, резины и текстильных материалов при нормальной температуре. Значения нагрузки и деформации при испытании фиксируются на цифровом табло. В машине предусмотрена запись диаграммы испытания в координатах нагрузка—перемещение активного захвата. Привод машины электромеханический, тип силоизмерителя — электрический. Предельная нагрузка 5000 Н. Диапазон измерения и записи нагрузки равен 6 (от 20 до 100 Н; от 50 до 250 Н; от 100 до 500 Н; от 200 до 1000 Н; от 500 до 2500 Н; от 1 до 5 кН). Допускаемая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе (нагружении) не более $\pm 1\%$ от измеряемой нагрузки, начиная с 0,2 предельного значения каждого диапазона измерения.

4. Разрывная машина мод. 2054 Р-5 предназначена для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и малоцикловую усталость при знакопостоянном цикле образцов из пластмасс, черных и цветных металлов при нормальной температуре. Значения нагрузки и деформации при испытании фиксируются на цифровом табло. В машине обеспечена запись диаграммы испытания в координатах нагрузка — перемещение активного захвата. Машина имеет быстродействующие захваты, унифицированную силоизмерительную систему с тензорезисторными датчиками и приводами с плоским ремнем, что позволяет значительно снизить уровень вибраций и уменьшить габариты машины. Привод машины электромеханический, силоизмеритель электрический. Наибольшая предельная нагрузка при испытании составляет 50 000 Н.

Диапазоны измерения и записи нагрузки при испытании следующие: от 0 до 1 кН; от 0,5 до 2,5 кН; от 1 до 5 кН; от 2 до 10 кН; от 5 до 25 кН; от 10 до 50 кН. Допускаемая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе (нагрузении) не более $\pm 1\%$ от измеряемой нагрузки, начиная с 0,2 предельного значения каждого диапазона измерения.

Для испытания на кручение образцов из металлов и сплавов выпускают машины с предельным крутящим моментом 500 Н·м. В процессе испытания измеряют угол, на который закручивается образец под действием определенного момента. Для измерения крутящего момента испытательные машины снабжены маятниковыми силоизмерительными устройствами со сменными шкалами, при этом ось испытуемого образца располагается горизонтально или вертикально. Для измерения угла закручивания образца устанавливают механические счетчики числа оборотов и угломеры, снабженные самопишущим прибором. Упругие деформации измеряют с помощью торсиометров (тензометры для угловых измерений).

Для испытания на кручение применяется испытательная машина мод. КМ-50 (рис. 5.8, а и б). В корпусе основания 1 установлен механизм привода машины. Электродвигатель через клиноремennую передачу 2 приводит во вращение червячную пару 8, которая в свою очередь через зубчатые передачи 3, 7 и 5 приводит во вращение ходовой винт 6 с зафиксированным на нем активным захватом 4. Число оборотов захвата (1 или 0,3 об/мин) зависит от того, как установлен переключатель. Угол закручивания образца в пределах 360° отсчитывают с точностью до 1° по шкале, размещенной на ходовом винте машины 6. Число целых оборотов отмечается счетчиком с пределом измерения 10 оборотов. Специальное корректирующее устройство машины вводит автоматически поправку в показания шкалы углов закручивания на поворот верхнего захвата. При достижении наибольшего крутящего момента, приложенного к образцу, угол этого поворота равен 6°. Крутящий момент, передаваемый образцу верхним захватом, приводит к от-

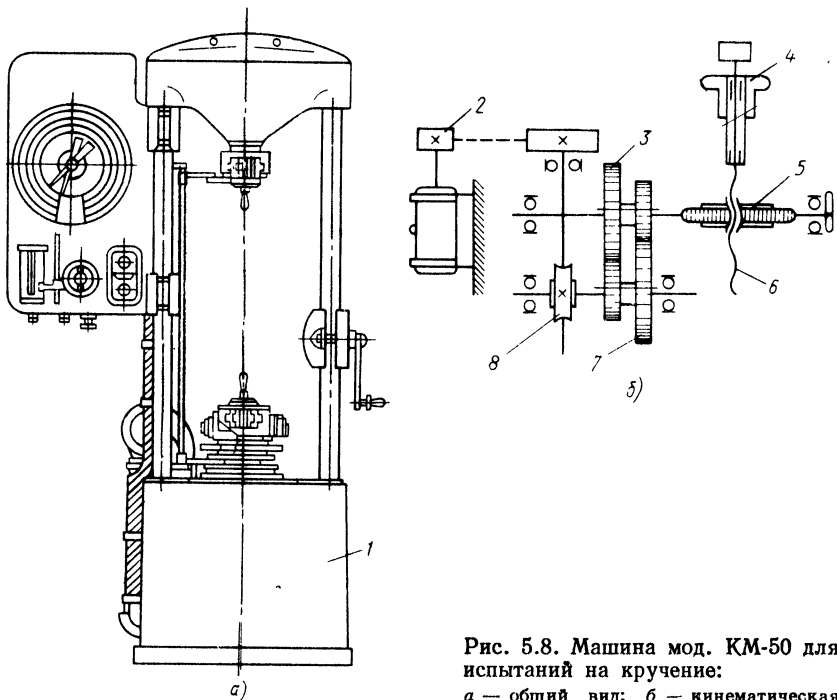


Рис. 5.8. Машина мод. КМ-50 для испытаний на кручение:
 а — общий вид; б — кинематическая схема

клонению маятника силоизмерительного устройства, перемещающего рейку машины. Рейка передает вращение зубчатому колесу, надетому на ось рабочей стрелки круговой шкалы, градуированной в Н·м (ньютоннах на метр).

Силоизмерительное устройство имеет три сменные шкалы со значениями предельных крутящих моментов 100, 200, 500 Н·м. Настройку на каждую шкалу проводят подвешиванием к маятнику сменных грузов. Самопишущий диаграммный прибор записывает кривую в координатах угол закручивания — крутящий момент. Диаграмма расшифровывается с помощью шаблона, имеющегося на машине. Расшифровку диаграммы производят так: шаблон прикладывают к диаграмме так, чтобы длинная риска совпадала с вертикальной осью, затем в зависимости от масштаба диаграммы делают отметку по одной из двух коротких рисок шаблона; тогда прямая, проходящая через полученную отметку и начало системы координат, дает новую вертикальную ось (новая ось ординат). Отрезок прямой от этой оси до получаемой в процессе испытания кривой соответствует истинному значению угла закручивания образца.

Более совершенная машина для испытания на кручение — машина мод. 2014 МК-50. Она предназначена для испытания на

кручение по ГОСТ 3565—80. Машина снабжена электрическим приводом захвата и электрическим моментоизмерителем, имеет широкий диапазон скоростей активного захвата, высокую точность отсчета деформации. Угол закручивания определяют с помощью фотоголовок и счетчиков. Для проверки и настройки машины по крутящему моменту она снабжена манометрами МПО-100 и МПО-500. Тип моментоизмерителя машины электрический, предельный крутящий момент 500 Н·м. Число диапазонов измерения крутящего момента образцов равно 3 (от 100 до 500 Н·м, от 50 до 250 Н·м; от 20 до 100 Н·м).

Допускаемая погрешность измерения момента при прямом ходе (нагружении) составляет не более $\pm 1\%$. Цена деления отсчетного устройства моментоизмерителя 1; 0,5; 0,2 Н·м.

В.3. Устройство и принцип действия машин для ударных испытаний

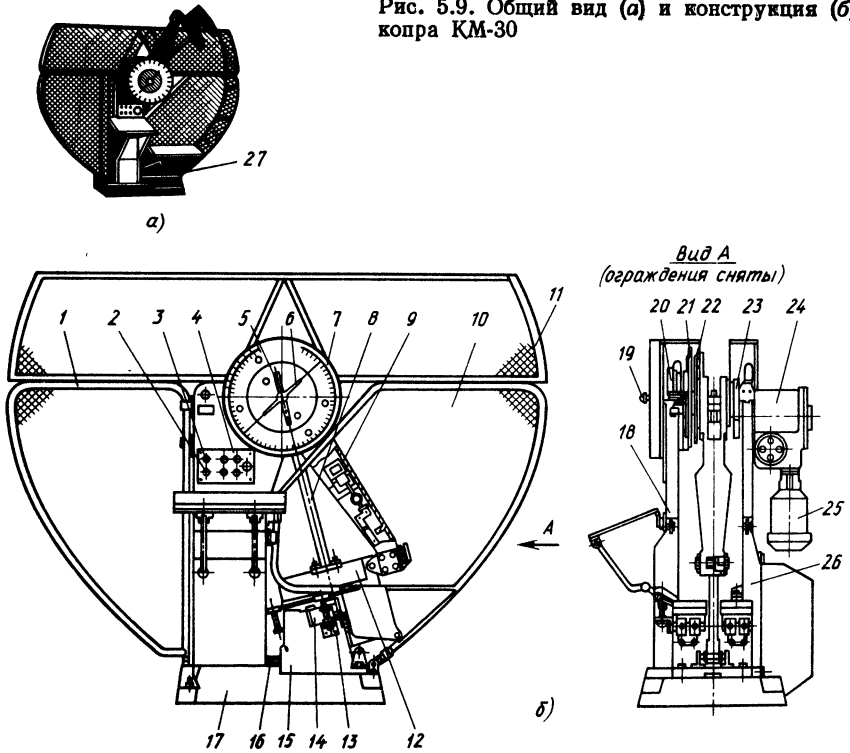
К машинам для ударных испытаний металлов и сплавов относятся копры вертикальные с падающим бойком, копры маятниковые, копры пневматические и копры ротационные крутильные.

Наиболее широкое применение в промышленности получили маятниковые копры, используемые при испытаниях на ударную вязкость. Производятся маятниковые копры следующих моделей: 2010 КМ-30; КМ-30; 2130 КМ-0,3; 2083 КМ-0,4; 2121 КМ-0,05. Буква К обозначает копер, М — маятниковый, цифры после букв — условное обозначение запаса энергии копра, цифры перед буквами — заводской литер.

Конструкции маятниковых копров и принципы их работы одинаковы. Копры отличаются лишь запасом энергии и габаритами элементов.

Наиболее мощным является маятниковый копер КМ-30. Копер этой марки состоит (рис. 5.9, а, б) из корпуса 27, стоек 18 и 26, опор 14 для установки испытуемых образцов, маятника 8, механизма 9 подъема и фиксации маятника, шкалы 7 для измерения затраченной на разрушение образца работы; тормоза 16, ограждений 1, 10, 11, 15. Корпус копра состоит из чугунной плиты 17, на которой закреплены основания опор и стойки. В верхней части стоек на шарикоподшипниках установлен маятник 8 с молотом 12, постоянный запас энергии которого равен 300 Дж. Характерной особенностью копра КМ-30 является механический подъем маятника при нажатии кнопки «Вверх». Движение маятнику передается от электродвигателя 25 через редуктор 24 с электромагнитной муфтой, шестерню 23 и стрелку 5, которая соединена с маятником с помощью двух штырей и жестко связана с храповым колесом 22. Колесо стопорится двумя собачками (одна из них аварийная), зацепление собачки с храповым колесом надежно фикси-

Рис. 5.9. Общий вид (а) и конструкция (б) копра КМ-30



рует угол подъема маятника 8. При подъеме стрелки с маятником на заданный угол собачки удерживаются в поднятом положении электромагнитом 20, установленным на диске 21, а упоры на храповике воздействуют на микропереключатели 2, обесточивая сначала электромагнит 20, а затем и электродвигатель 26. Стрелка с маятником под действием собственной массы несколько опускается вниз.

Спуск маятника проводится нажатием кнопки 3 на панели 4. При этом маятник отсоединяется от стрелки 5, падает и разрушает образец 13, свободно лежащий на опорах 14. Работа, затраченная на разрушение образца, отсчитывается по шкале 7, которая отградуирована на все запасы энергии и имеет две стрелки: рабочую 5 и контрольную 6. Рабочая стрелка жестко связана с маятником и движется вместе с ним. Рабочая стрелка позволяет проверить угол подъема маятника. Контрольная стрелка приводится в движение от стрелки 5 и показывает работу, затраченную на разрушение образца 13. Перед испытанием каждого последующего образца контрольную стрелку 6 устанавливают в исходное положение вращением головки 19. Для сокращения свободных коле-

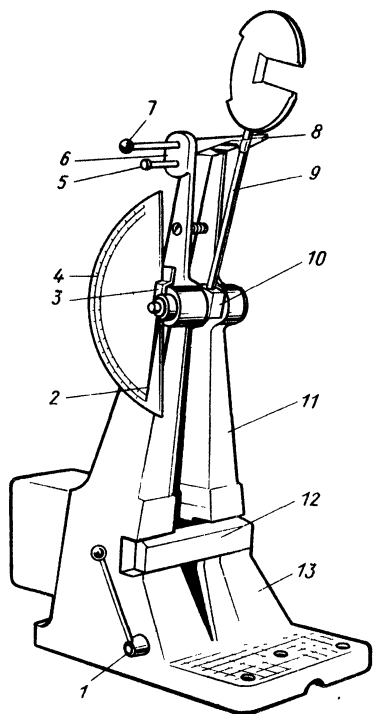


Рис. 5.10. Маятниковый копер ПСВ-1,5

станины, маятника с осью, опор, шкалы и приспособления для центрирования образца. Станина состоит из основания 13 и двух стоек 11. Сверху на стойках 11 укреплено расцепляющее (отсоединяющее) приспособление 6 для маятника 9. Приспособление состоит из рукоятки 7 и защелки 8, удерживающей маятник во взведенном состоянии. При освобождении маятника 9 лаборант одной рукой нажимает на рукоятку 7, а другой — вытягивает стопорный стержень 5. На левой передней стойке 11 станины закреплена шкала 4, по которой определяют работу удара от 0 до 15 Дж и угол подъема маятника от 0 до 160°. Ось 10 маятника установлена в шарикоподшипниках с повышенной точностью размеров и хода. На выступающем слева из подшипника конце оси 10 укреплен захват 3, фиксирующий стрелку 2 в момент удара ножа маятника 9 по установленному образцу 12. Опоры посредством цилиндрических болтов присоединены к основанию 13. Для центрирования образцов служит приспособление, которое состоит из рукоятки 1 и плеча со стрелкой (на рисунке не показано). Образец установлен правильно, когда стрелка плеча показывает точно на центр надреза на образце.

баний маятника после разрушения образца копер снабжен ленточным тормозом 16, работающим автоматически от нажатия кнопки. Для улавливания осколков при разрушении образца 13 предусмотрены ограждения 1, 10, 11 зоны перемещения маятника, заблокированные с механизмами копра. Общий вид копра показан на рис. 5.9, а.

Копры 2130 КМ-0,3 и 2083 КМ-0,4 снабжены цифровым блоком измерений, связанным с цифропечатающей машиной, которая фиксирует результаты испытаний.

СВ промышленности применяют маятниковые копры упрощенных конструкций. К ним относится маятниковый копер ПСВ-1,5 производства ГДР (рис. 5.10), который применяется для испытаний пластмассовых образцов, а также металлических образцов, изготовленных из изделий, подвергнутых длительной эксплуатации; запас энергии копра 15 Дж. Маятниковый копер состоит из

Для проведения испытаний на этом копре маятник 9 поднять до высшего его положения и зафиксировать защелкой 8. Установить образец 12 на опоры так, чтобы надрез на образце находился на стороне, противоположной ношу падающего маятника 9. Рукоятку 1 приспособления поднять до упора и середину надреза установить точно на стрелку 2, присоединенную к плечу приспособления, затем рукоятку 1 опустить. Стрелку 2 установить на нулевую отметку шкалы 4 копра. Стопорный стержень 5 вытянуть и рукой держать его в таком положении, другой рукой прижать рукоятку 7 приспособления так, чтобы защелка открылась и маятник 9 свободно упал.

После разрушения образца и фиксации маятника 9 защелкой 8 произвести отсчет работы удара маятника по шкале 4. Затем обработать результаты испытания и вычислить ударную вязкость образца.

5.4. Устройство и принцип действия машин для повторно-переменных нагрузок (испытания на усталость)

Машины для испытания на усталость подразделяют на шесть основных групп:

- 1) машины для испытания вращающегося образца при действии постоянного крутящего момента или неподвижного образца при действии вращающейся нагрузки;
- 2) машины для испытания на растяжение и сжатие при действии переменных осевых сил;
- 3) машины для испытания образцов при нагружении переменным крутящим моментом;
- 4) машины для испытания образца в сложном напряженном состоянии (при одновременном действии переменных осевых сил и крутящих моментов и др.);
- 5) машины для испытания плоских образцов в условиях переменного изгиба;
- 6) машины для испытания образца при повторных ударных нагрузках.

В перечисленных машинах нагружение образца производится различными способами: нагружение непосредственно грузами; с помощью рычажного устройства с грузами или пружинами; кинетическое нагружение кривошипно-шатунным механизмом; нагружение инерционными силами, возникающими при вращении неуравновешенных масс; нагружение силами, возникающими при упругих колебаниях, близких к резонансным; гидравлическое нагружение; нагружение электромагнитным методом и др. Широко используются машины, в которых нагружение осуществляется изгибающей нагрузкой при вращении образца и при осевом растяжении, так как эти машины просты и удобны в эксплуатации.

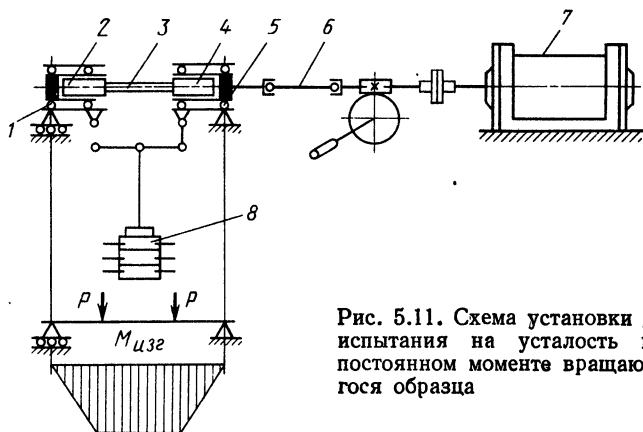


Рис. 5.11. Схема установки для испытания на усталость при постоянном моменте вращающегося образца

Для испытания на усталость в машинах первой группы (рис. 5.11) образец 3 закрепляют в захватах шпинделей 2 и 4, опирающихся роликами 1 и 5 на корпус машины. Шпиндели машины 2 и 4 приводятся во вращение электродвигателем 7 посредством гибкого валика 6. Нагрузка обеспечивается или непосредственно сменными грузами 8 или с помощью рычажной системы с переменным грузом. Задаваемая нагрузка корректируется изменением массы сменных грузов и положением перемещаемого на рычаге груза. Частота вращения образца 10 000—12 000 мин⁻¹. Число циклов регистрируется счетчиком. Перед испытанием машина тарируется с помощью специального устройства. По тарировке строят график, с которым сравнивают результаты испытаний на выносливость.

Число оборотов образца можно устанавливать по реостату и контролировать по счетчику и секундомеру. При разрушении образца машина автоматически отключается. По результатам испытаний строят зависимость напряжение — число нагружений до разрушения образца.

Испытание образцов на выносливость при переменном крутящем моменте осуществляют на машине конструкции Н. И. Попова. Кинематическая схема ее приведена на рис. 5.12. Она состоит из электродвигателя 1, вращающегося кривошипа 2, который через шатун 3 поворачивает кривошипный вал 4. За один оборот кривошипа 2 вал 4 повернется на определенный угол (с возвратом). Угол поворота зависит от эксцентриситета кривошипа, который может меняться.

Образец 5 с помощью клиньев соединен одним концом с валом 4, а другим — с упругим элементом 6 динамометра. Поворот образца на определенный угол вызывает закручивание упругого элемента. Предварительной градуировкой устанавливается зависимость между углом поворота упругого элемента и крутящим моментом. Градуировка машины производится подвеской грузов

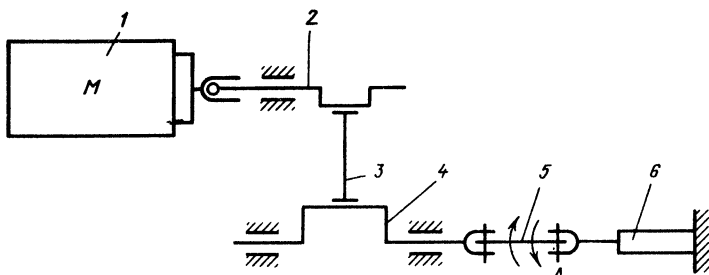


Рис. 5.12. Кинематическая схема установки для испытания образцов на усталость при переменном крутящем моменте

на рычаг известной длины, закрепленный на конце *A* упругого элемента *6*, с фиксацией угла закручивания упругого элемента *6* индикатором. Напряжение в образце рассчитывают по формуле

$$\tau_y = \frac{16M_k}{\pi d^3}, \quad (5.1)$$

где M_k — крутящий момент, Н·м; d — диаметр образца, мм.

За базу испытания часто принимают число циклов нагружения образца $5 \cdot 10^8$ для легированных сталей.

По результатам испытаний строят зависимости касательное напряжение τ — число циклов N .

Серийно выпускается промышленностью машина мод. УКИ-6000-2 для испытания на усталость. Она предназначена для испытания вращающихся образцов из металлов и их сплавов на усталость в соответствии с ГОСТ 25.502—79. Рабочий диапазон нагрузок машины 5—1000 Н; для диапазонов 5—20 и 200—1000 Н нагрузку увеличивают соответственно на 0,5 и 2,5 Н. Число ступеней изменения частоты испытательной нагрузки равно 2. Частота изменения циклов испытательной нагрузки по ступеням равна 3000 и 6000 мин⁻¹. Допускаемая погрешность приложения нагрузки от измеряемой величины при проверке в режиме статического нагружения не более $\pm 2\%$, а допускаемая погрешность измерения числа циклов нагружения образца ± 100 циклов.

Универсальная машина для испытания на усталость мод. УРС-50/50 предназначена для испытаний на усталость образцов растяжением-сжатием, изгибом при нормальной температуре и отсутствии агрессивной среды. Предельная нагрузка 500 кН, погрешность статической нагрузки 1%, погрешность динамической нагрузки 3%, максимальное перемещение активного захвата 100 мм, наибольшая амплитуда перемещения активного захвата 50 мм, максимальная частота циклического нагружения при полной нагрузке 8 Гц. Машина показана на рис. 5.13. Она состоит из испытательной установки *1* и пульта *2* управления и фиксации параметров.

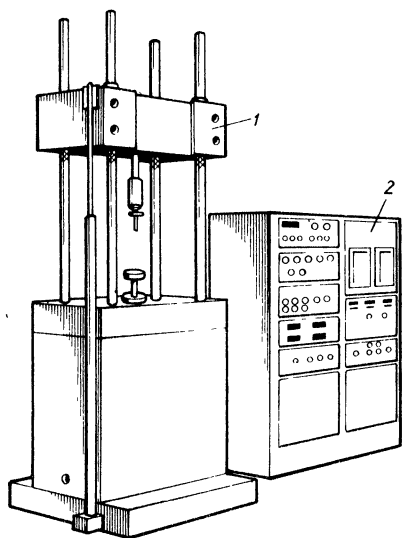


Рис. 5.13. Универсальная машина мод. УРС-50/50 для испытания на усталость

Для испытания на усталость образцов и элементов конструкций из металлов при симметричном и асимметричном циклах растяжения-сжатия с программированием нагрузки применяют высокочастотную машину для испытания на усталость мод. УРС-10/30000 с электромагнитным возбудителем. Машина, состоящая из испытательной установки и аппарата управления и регистрации, работает в резонансном автоколебательном режиме, что позволяет при малой затрате энергии создавать необходимые нагрузки на испытуемый образец. Изменение частоты нагружения достигается сменой инерционных масс. Силоизмеритель машины электромагнитный, поляризованный дифференциального типа.

Наибольшая испытательная нагрузка машины 100 кН, наибольшая амплитуда циклической нагрузки ± 50 кН, диапазон рабочих частот 50—500 Гц, диапазон погрешностей показаний, начиная с 10 кН, составляет для статической нагрузки $\leq \pm 2\%$ от измеряемой величины, а для циклической нагрузки $\leq \pm 3\%$ от измеряемой величины. Программирование циклической нагрузки у машины ступенчатое и имеет 13 ступеней, а емкость счетчиков циклов 10^9 . Диапазон температур испытания составляет от 350 до 1200 °С.

5.5. Устройство и принцип действия машин для проведения специальных испытаний

В различных отраслях промышленности используют разнообразные методы поверхностного упрочнения нагруженных изделий и режущего инструмента. Одним из таких методов является метод поверхностного пластического деформирования (ППД). Методом ППД за рубежом делают попытки упрочнить твердосплавные резцы, прорезные и торцовые фрезы и другие режущие инструменты. В результате ППД уменьшается число поломок инструментов в начальный период резания металла. В СССР проводили работы по упрочнению методом ППД мелкогабаритных метчиков из стали Р6М5. Это позволяет повысить чистоту (снизить шероховатость) поверхности стружечных канавок метчиков, увеличить

прочность их поверхностного слоя, воздать остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое метчиков, что в конечном счете повышает прочность метчиков на 15—20 %.

Вместе с тем установлено, что эффект упрочнения существенно зависит от условий и режимов ППД. Неблагоприятные условия процесса ППД могут привести к появлению микротрещин и снижению прочности режущего инструмента. Чтобы правильно выбрать и оценить способы и режимы ППД, необходимо проанализировать основные параметры процесса упрочнения, выяснить влияние как положительных, так и отрицательных факторов на эффект упрочнения.

Для этой цели разрабатывают специальные испытательные машины или устройства к стандартным машинам конкретно для каждого изделия или группы изделий. Для испытания образцов из быстрорежущих сталей, из которых в основном изготавливают режущий инструмент, изготовлена установка к испытательной машине (рис. 5.14). На столе машины устанавливают и закрепляют опорную плиту 4 с направляющими, по которым перемещается ползун. В ползуне 5 имеется паз для установки и закрепления образца 6. Ползун 5 соединяется с рычагом 7, с помощью которого ползуну 5 сообщается возвратно-поступательное движение. Сменные оправки с пуансоном 3 или роликом крепятся в traversе 2 испытательной машины, которая является нагружающим узлом установки. Упрочняющая поверхность образца 6 имеет форму канавки с цилиндрической поверхностью радиусом 3,5 мм. Пуансон 3 и ролики 1 имеют радиус профиля 3 мм, поэтому контактной поверхностью является дно канавки образца. Пуансон 3 имеет высоту 20—25 мм, толщину

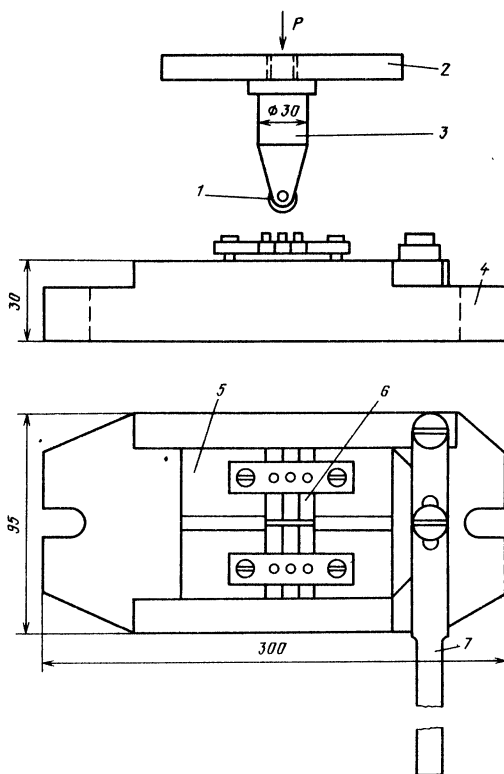


Рис. 5.14. Схема установки для испытания образцов методом поверхностного пластического деформирования

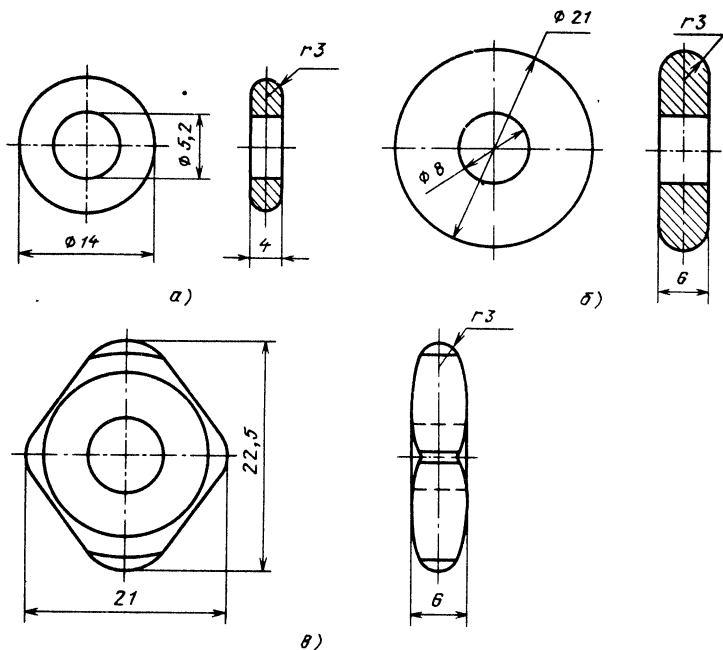


Рис. 5.15. Упрочняющие инструменты

6 мм. Ролики 1 разработаны двух размеров: первый — диаметром 14 мм и толщиной 4 мм, второй — диаметром 20 мм и толщиной 6 мм. Упрочняющие инструменты — накатные ролики (рис. 5.15, а и б) и пуансон (рис. 5.15, в) выполнены из твердого сплава марки ВК8.

Образцы для испытаний изготавливают из полосовой стали марки Р6М5. Заготовки после фрезерования подвергали термической обработке по следующему режиму: закалка в 1220 °С, отпуск при 560 °С, выдержка 2 раза по 1 ч. После термической обработки образцы шлифовали до окончательных размеров (рис. 5.16, а и б).

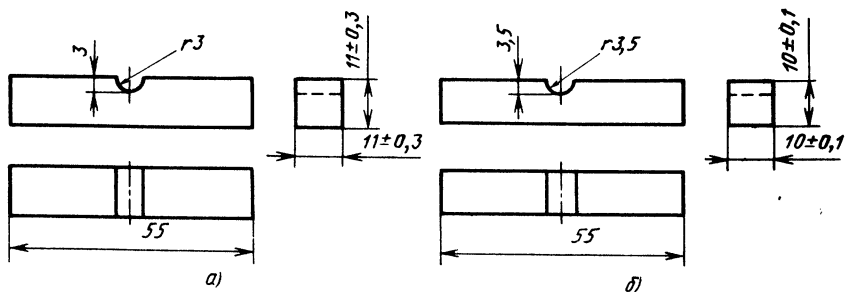


Рис. 5.16. Образцы для испытаний методом поверхностного пластического деформирования до обработки (а) и после обработки (б)

Параметры отпечатков и напряжения при испытании образцов методом ППД

№ образца	Исходная твердость образца HV	Параметры отпечатков, мм	Нагрузка P , Н			Площадь отпечатка F , мм ²	Контактные напряжения, МПа
			500	1500	2600		
1	313	a *	0,23	0,475		0,058	8600
		b *	0,08				
2	313	a		0,16		0,24	6300
		b					
3	313	a			0,565	0,356	7350
		b					

* a, b — большая и малая полуоси эллиптического отпечатка на образце.

Образцы испытывают вдавливанием пуансона под нагрузкой 500, 1500 и 2600 Н или ролика диаметром 21 мм. После испытаний измеряли отпечатки на образцах, которые получались в форме эллипсов, размеры которых приведены в табл. 5.1. Среднее контактное напряжение определяли по формуле

$$\sigma_{сж} = P/F. \quad (5.2)$$

Площадь контактного участка при нагрузке 500 Н равнялась 0,053 мм², следовательно, среднее контактное напряжение равно 8600 МПа. При нагружении усилием 1500 Н площадь отпечатка на образце равна 0,24 мм², а контактное напряжение — 6300 МПа. При нагрузке 2600 Н площадь отпечатка равнялась 0,365 мм², а контактное напряжение — 7300 МПа. При накатке образца плоской поверхностью пуансона (роликом) на образце образовывались полоски шириной 0,35, 0,71 и 1,36 мм при нагрузках на пуансон соответственно 1000, 2000 и 3000 Н.

При испытании расчетная нагрузка, прикладываемая к ролику, при его движении возрастает в 1,5—2 раза, так как ролику приходится преодолевать сопротивление образующегося впереди ролика валика оттесненного металла. После 2—3 проходов ролика по образцу нагрузка возвращалась к исходной величине и даже несколько снижалась. Затем эти образцы подвергали испытанию на изгиб. Установлено, что нагрузка при испытаниях на изгиб возрастала в 1,2—1,5 раза по сравнению с нагрузкой на образцы, которые не подвергались обработке ППД, предел прочности образцов также увеличился в 1,25—1,4 раза.

В результате испытаний образцов методом ППД устанавливаются оптимальные режимы деформирования образцов для каждого конкретного изделия, затем на основании результатов этих испытаний назначают режимы поверхностной пластической де-

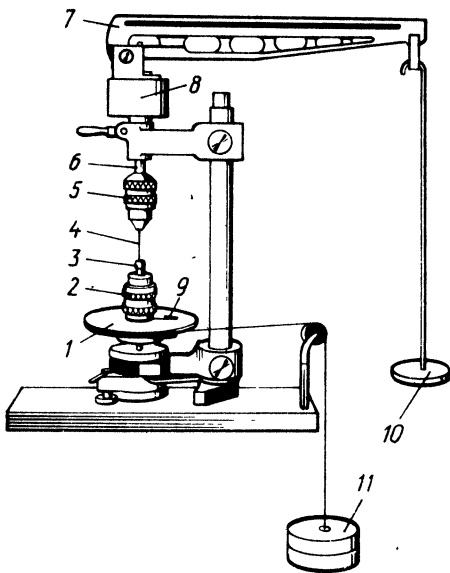


Рис. 5.17. Машина для испытания сверл на кручение и осевое сжатие

формации натуральных изделий с учетом получения необходимых механических характеристик этих изделий.

Режущий инструмент, и в первую очередь сверла, в процессе работы нагружаются одновременно крутящим моментом и осевым усилием, т. е. находятся в сложном напряженном состоянии. С этой целью проводят испытания сверл на сложное напряженное состояние.

Для испытания сверл диаметром 1—2 мм разработана специальная машина, позволяющая испытывать сверла на кручение и осевое сжатие (рис. 5.17). Каждый вид нагрузки может быть приложен от-

дельно или одновременно. Хвостовик сверла 4 закрепляют в верхнем патроне 5. Конец хвостовика сверла 4 упирается в специальную опору 6, вставленную в патрон 5. Рабочая часть сверла 4 закрепляется захватом с винтами 3, причем сам захват 3 зажимается в нижнем патроне 2. На нижнем патроне 2 смонтирован диск 1 со шкалой в градусах. Крутящий момент создается на сверле 4 при повороте диска 1 посредством груза 11, а угол поворота сверла 4 фиксируется неподвижно закрепленной на диске 1 стрелкой 9. Крутящий момент рассчитывают, исходя из величины груза 11 и радиуса диска 1.

Подвеска 10 на рычаге 7 предназначена для создания осевого усилия, передаваемого через шпиндель 8 на испытуемое сверло 4.

Во избежание разброса осколков при разрушении термообработанного сверла (62—64 HRC_a) рабочую зону машины закрывают кожухом из мелкой металлической сетки (на рисунке не показан).

По результатам испытаний сверл на указанной машине определяют наибольший крутящий момент и осевую нагрузку, которые выдерживает сверло при работе, и устанавливают затем прочностные характеристики сверл того или иного диаметра. По этим данным назначают режимы работы сверл.

Малые значения предела прочности на изгиб и сжатие пластин из порошкового материала, пластин из эльбора, применяемых в качестве режущих элементов резцов и фрез, и малые размеры образцов, а также вероятность наличия трещин в образцах после

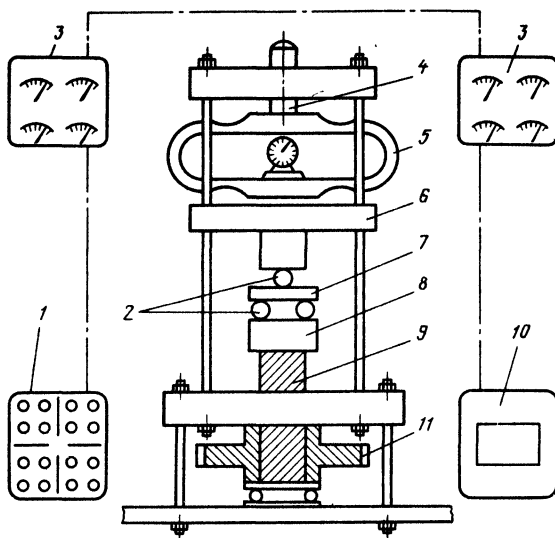


Рис. 5.18. Схема микромашины для испытания режущих пластин из твердосплавных материалов на изгиб и сжатие

термоциклических нагрузок предопределяют небольшие разрушающие усилия, которые слишком малы для стандартных испытательных машин.

Для повышения точности результатов испытаний используют специальные машины для испытаний пластин с максимальным усилием (нагрузкой) 1300—1800 Н и точностью измерения усилия не более 0,3—0,5 % от измеряемой величины. Схема такой микромашины приведена на рис. 5.18. Микромашина снабжена механическим приводом ходового винта 9, несущего предметный столик 8, который перемещается с постоянной скоростью 0,1 мм/мин. Силоизмерительный узел смонтирован в верхней плите 6 машины и состоит из тензометрического узла — цилиндра 4 диаметром 3 мм и наклеенных на нем датчиков. Верхняя часть цилиндра 4 опирается на верхнюю сферическую опору, а нижняя — на опору образцового динамометра 5 мод. ДС-02 с максимальным усилием 2000 Н. Такое устройство позволяет фиксировать усилия визуально по стрелке индикатора динамометра 5 или записывать диаграмму усилий на ленту шлейфового осциллографа 10, например, мод. Н700. Машина оснащена приспособлениями для испытания образцов размером $4 \times 4 \times 2$ мм на изгиб и сжатие.

Для испытаний пластин из эльбора на изгиб на машину устанавливали приспособление 2 с расстоянием между опорами 3 мм, затем на это приспособление помещали образец 7. Скорость приложения нагрузки на образец 7 равна 0,1 мм/мин, нагруже-

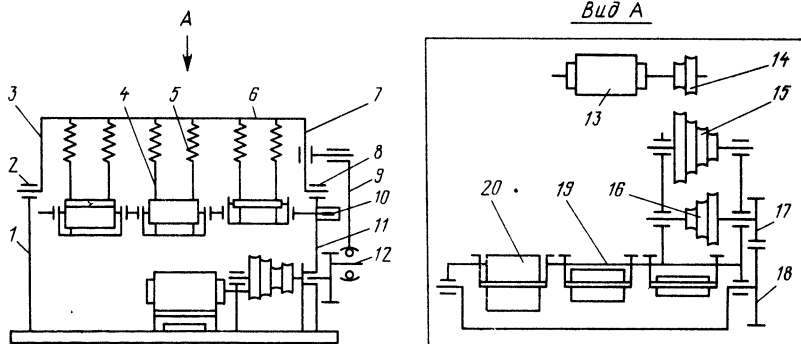


Рис. 5.19. Схема машины для испытаний на усталость токопроводящих жил гибких кабельных проводов

ние образца 7 осуществляется перемещением ходового винта 9 вверх. Привод винта осуществляется с помощью подъемного механизма 11. Усилие приложения нагрузки фиксируется по стрелке динамометра 5, а ход нагружения и величина нагрузки записывается на светочувствительную бумагу (ленту) осциллографа 10. Для настройки измерительного осциллографа 10 машина снабжена миллиамперметрами 3 и установкой 1 для балансировки.

В результате таких испытаний определяют предел прочности пластинок при изгибе и сжатии, что позволяет разработать рекомендации по режимам работы режущего инструмента с элементами из сверхтвердых материалов.

Для испытаний на усталость металлических токопроводящих жил гибких кабельных проводов используют специальные машины. Машина (рис. 5.19) предназначена для испытания на усталость при циклическом изгибе медной проволоки диаметром 0,20—0,70 мм. От электродвигателя 13 через ременную передачу со ступенчатыми шкивами 14, 15, 16 и зубчатую пару 17 и 18 движение передается на кривошипный палец 12 и шатун 9. Рамка, образованная коромыслами 7 и 3 и поводком 6, качается в подшипниках 2 и 8, зафиксированных в стойках 1 и 11. На поводке 6 посредством упругих элементов 5 фиксируются образцы 4. Импульсный счетчик 10 мод. СФ-68 закреплен на стойке 11. Частота колебаний образцов 4 изменяется ступенчато в пределах 6—300 колебаний в минуту. Уголок 19 служит для закрепления стоек, на которых установлены тиски. Тиски служат для установки сменных валиков 20 и жесткого закрепления нижних частей образцов 4. Ось образцов 4 при испытании должна проходить через центр качения коромысла 7 и делить его угол размаха пополам. Достигается это путем перемещения сменных валиков 20 в горизонтальной плоскости в зажимных губках тисков и в вертикальной плоскости — вместе с тисками в пазах уголка 19. На машине

можно изменять величину нагрузок, натяжение образцов, угол закручивания образца.

Образцы на этой машине можно испытывать на изгиб по симметричному циклу и на изгиб при отнулевом цикле напряжений.

5.6. Приборы для измерения твердости

Приборы для измерения твердости металлов и сплавов разделяются на твердомеры Бринелля (ТБ), Виккерса (ТВ), Роквелла (ТР) и Супер-Роквелла (ТСР) (ГОСТ 8.398—80), а также на комбинированные и универсальные стационарные твердомеры (ГОСТ 23677—79) и переносные (ГОСТ 9030—75).

В стационарных твердомерах нагрузка прикладывается с помощью рычажной системы, что позволяет получать точные величины заданных нагрузок. Измерительный механизм всех приборов для измерения твердости устанавливаются в верхней части корпуса прибора для того, чтобы масса испытываемого образца и возможная нецентричность его установки на опорном столике не влияли на показания.

Приборы ТБ предназначены для измерения твердости металлов и сплавов в пределах 8—450 НВ. Приборы ТБ оснащены наконечниками со стальными шариками диаметром 2,5; 5 и 10 мм. Нагрузка при измерении твердости образцов может быть следующей: 153, 613, 1839, 2452, 7357, 9810, 29 430 Н.

Приборы ТР предназначены для измерения твердости металлов и сплавов в пределах 25—100 HRB; 70—75 HRA и 20—67 HRC.

Приборы ТР снабжены наконечником со стальным шариком диаметром 1,588 мм, а также алмазным конусом, нагрузка при измерении твердости равна 980 Н, при алмазном конусе нагрузка может быть 588 и 1470 Н.

Приборы ТВ предназначены для измерения твердости металлов и сплавов в пределах 8—100 HV. Наконечник прибора оснащен алмазной пирамидой. Нагрузка при измерении может быть 49, 98, 196, 294, 490, 981 Н.

Приборы ТБ для определения твердости металлов и сплавов стационарного типа выпускаются с рычажным нагружением.

Прибор для измерения твердости по Бринеллю показан на рис. 5.20. В массивной чугунной станине 19 закреплена втулка, в которую вмонтирован подъемный винт 17. На нем установлены сменные опорные столики 16 для закрепления испытываемых образцов. Винт 17 служит для подъема и опускания столиков 16 с помощью маховика 18. Пружина 13 установлена в головке прибора, которая предотвращает смещение образца с установленного положения во время приложения к нему предварительной нагрузки 980 Н. Пружина 13 прижимает втулку 14 к конусному седлу, а шпindel 11 — к средней призме рычага 10.

В верхней части станины прибора установлена рычажная система с передаточным отношением 1 : 50, которая под действием

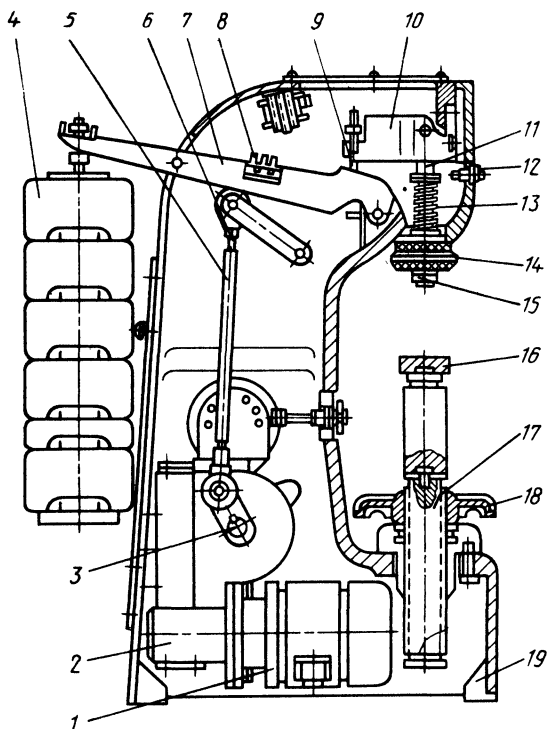


Рис. 5.20. Прибор ТШ-2 для измерения твердости по Бринеллю

грузов 4 вдавливает в поверхность испытуемого образца индентор-шарик, закрепленный в наконечнике 15 головки прибора. Рычаги 10 и 7 соединены между собой серьгой 9. К рычагу 7 подвешиваются сменные грузы 4 для воспроизведения следующих нагрузок: 1840, 2450, 4900, 7350, 9800, 29 400 Н. Для приложения и снятия нагрузок служит кривошипный механизм, состоящий из кривошипа 3, шатуна 5 и вилки 6. Кривошип 3 приводится во вращение электродвигателем 1 через червячный редуктор 2 с передаточным отношением 1 : 1600. С помощью электрического реле с микровыключателем изменяется направление вращения кривошипа 3 после заданной выдержки и автоматически отключается электродвигатель 1. Время холостого поворота кривошипа 3 с момента отрыва шатуна 5 от рычага 7 до встречи с шатуном при его обратном ходе равно времени выдержки образца под нагрузкой. Время фиксируется сигнальной лампой 12, которая включается с помощью микровыключателя 8, установленного на рычаге 7. Время выдержки устанавливается по шкале перед началом измерения твердости.

Измерение твердости на приборе ТШ-2 осуществляют следующим образом. Испытуемый образец или изделие устанавливают

на сменный опорный столик 16. Вращая маховик 18, поднимают его к наконечнику 15 с шариком для обеспечения контакта образца с шариком. Потом нажатием кнопки включается электродвигатель 1 прибора. Электродвигатель 1 приводит в движение механизм шатуна 5 и нагрузка начинает плавно передаваться на испытуемый образец. Перед окончанием измерения твердости отключается электролампочка 12 и выключается электродвигатель 1. Столик 16 вместе с образцом опускают вращением маховика 18 в обратном направлении. Образец снимают и измеряют диаметр полученного на нем отпечатка с помощью лупы или микроскопа.

В промышленности выпускаются приборы 2109 ТБ для измерения твердости по Бринеллю и разбраковки испытуемых изделий на группы твердости с помощью стрелочного индикатора. Принцип действия этих приборов основан на вдавливании в образец стального закаленного шарика под действием заданных предварительной и общей нагрузок в течение определенного промежутка времени. Отпечатки на образце измеряют с помощью микроскопа МПБ-2. На этом приборе можно измерять твердость различных по конфигурации и габаритам изделий, одних и тех же деталей при большом их количестве, а также детали при нанесении на нее нескольких отпечатков.

В приборе предусмотрен автоматический останов стола с изделием при подводе его в верхнее положение и автоматическое приложение испытательных нагрузок. С помощью этого прибора можно проводить разбраковку изделий на группы твердости: «Больше», «Норма», «Меньше». Разбраковку производят с помощью индикатора по указателю. На приборе можно измерять твердость изделий и образцов в пределах 8—450 НВ.

Относительная погрешность прибора по твердости при измерении диаметра отпечатка на микроскопе с ценой деления 0,05 мм при значениях образцовых мер твердости 2-го разряда МТБ по ГОСТ 9031—75: (100 ± 25) НВ + 4 %; (200 ± 50) НВ + 3 %; (400 ± 50) НВ \pm 3 %.

Прибор 2098 ТБА для измерения твердости изделий по Бринеллю для контроля и разбраковки по твердости однотипных изделий в условиях серийного и массового производства снабжен цифровым табло и может быть подключен к цифроречастотному устройству, предусмотрена также фиксированная установка выдержки времени в зависимости от испытуемого материала. Процесс испытания на приборе автоматизирован.

Для определения твердости непосредственно в цеховых условиях применяют переносной прибор ТШП-4 для измерения твердости металлов и сплавов по Бринеллю в соответствии с ГОСТ 9012—59. Основным узлом прибора является измерительная головка, которая закрепляется на деталях. Нагрузка в приборе создается вручную и определяется по индикатору часового типа.

Диаметр отпечатка измеряют с помощью микроскопа и число твердости определяют с помощью переводных таблиц. Различные приспособления позволяют использовать прибор как в стационарном, так и в переносном вариантах.

Диапазон измерения твердости от 0 до 450 НВ.

Максимальная погрешность прибора 5 %.

Приборы для определения твердости по Роквеллу выпускаются нескольких моделей: 2140 ТР, 2018 ТР, ТКП-1, 2120 ТР, ТК-2, 2142 ТРМ.

Прибор ТК-2 оснащен электромеханическим приводом; на верхней крышке прибора на расстоянии 150 мм от оси шпинделя установлен измерительный индикатор.

Прибор ТК-2 имеет следующие основные механизмы, смонтированные в чугунной литой станине 1 закрытого типа (рис. 5.21): рычажное устройство для создания испытательной нагрузки и измерения глубины отпечатка с помощью индикатора; привод прибора с электрическим двигателем переменного однофазного тока; механизм подъема со сменными столиками для установления испытуемого образца; шток, посредством которого осуществляется наложение и снятие испытательной нагрузки. В приборе применен механизм нагружения рычажного типа с передаточным отношением 1 : 24, расположенный в верхней части станины.

Механизм нагружения состоит из подвески 12 с грузами 17, обеспечивающей с помощью рычага 15 создание необходимой нагрузки; малого измерительного рычага 10, являющегося ходовым увеличителем индикатора 13; шпинделя, на конце которого с помощью винта закрепляется наконечник 8 с шариком или алмазным конусом; пружины, необходимой для создания предварительной нагрузки (98 Н). Окончательную подгонку величины предварительной нагрузки производят с помощью груза 11, установленного на измерительном рычаге 10. Пружина позволяет провести одновременно установку шпинделя относительно конусного гнезда, который расположен в направляющей втулке. При проведении измерения твердости изделие, установленное на столе прибора, упирается в алмазный конус (или стальной шарик) и, сжимая пружину, выводит шпиндель из конусного гнезда. Верхняя часть шпинделя соединена с подвеской. Поэтому внедрение алмазного конуса (или шарика) в испытуемое изделие под действием заданной нагрузки осуществляется без трения, если не считать небольшого трения в призмах механизма нагружения. Ограничитель 9 позволяет прикладывать предварительную нагрузку на образец без наблюдения за показаниями индикатора. Точная установка индикатора 13 на нуль производится с помощью барабана 4, закрепленного в механизме подъема, и тросика 14, размещенного в пазу индикатора. Весь процесс измерения твердости проводится с помощью привода прибора, работающего от конденсаторного однофазного электродвигателя 2.

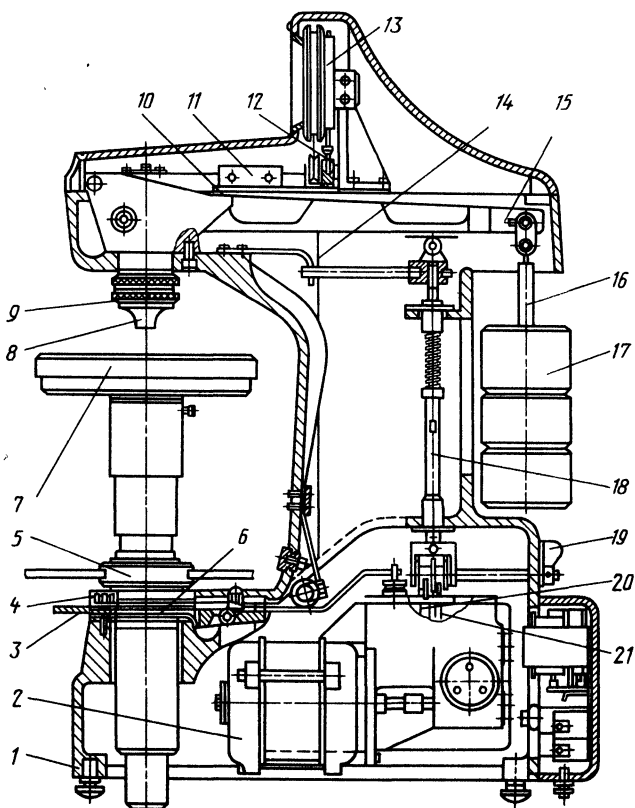


Рис. 5.21. Прибор ТК-2 для измерения твердости по Роквеллу

Механизм привода состоит из двухступенчатого червячного редуктора и рабочих кулачков 20 и 21, профили которых рассчитаны на проведение испытания с нормальной продолжительностью цикла испытания (4 с) при положении рукоятки указателя против буквы «Н», а также с ускоренным циклом испытания (2 с) при положении рукоятки указателя против буквы «У». Электродвигатель 2 твердомера (прибора) работает непрерывно и выключается только при длительных перерывах в работе твердомера.

Привод кулачков 20 и 21 осуществляется с помощью храпового механизма, который включается с помощью клавиши 3. По окончании испытания кулачковый блок автоматически отключается и фиксируется в исходном положении роликом, установленным в фиксаторе с натяжной пружиной. В случае резкого опускания подвески 16 с грузами 17 необходимо снять крышку с правой стороны прибора и подтягивать гайку с накаткой до тех пор, пока не прекратится опускание груза. Включение механизма

Определение нагрузки и шкалы твердости

Обозначение твердости по Роквеллу	Примерная твердость образца	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Нагрузка, Н	Допустимые пределы шкалы твердости
HRB	60—240	В	Стальной шарик	1000	25—100
HRC	240—900	С	Алмазный конус	1500	20—67
HRA	390—900	А	Алмазный конус	600	70—85

привода начинается с нажатия клавиши 3 вниз. С помощью удлинителя 6 поднимается защелка и освобождается собачка, которая при этом входит в зацепление с храповым колесом кулачкового блока. При повороте кулачкового блока на один оборот собачка упирается в защелку и выходит из зацепления с храповым колесом. Передача движения от механизма привода к грузовому рычагу 15 осуществляется с помощью штока 18, в нижней части которого в поворотной вилке установлена обойма с двумя роликами. Подключение штока 18 к одному из рабочих кулачков производится поворотом рукоятки 19, которая управляет подключением соответствующего ролика.

Механизм подъема столика состоит из винта, маховика 5, направляющей втулки и сменного столика 7 и служит для подъема и опускания испытуемой детали или образца.

Испытания на этом приборе проводят следующим образом. По табл. 5.2 в зависимости от твердости испытуемого образца выбирают твердость, нагрузку и вид наконечника.

Затем определяют продолжительность цикла испытания (нормальная или ускоренная), при этом необходимо учитывать, что при нормальной продолжительности цикла испытания 4 ± 1 с показания прибора гарантируют погрешность измерения не более одной единицы твердости. Рукоятка указателя должна находиться против буквы Н. При ускоренной продолжительности цикла испытания 2 ± 1 с показания прибора не гарантированы, при этом испытании рукоятка указателя должна находиться против буквы «У». Ускоренный цикл испытаний применяют в массовом производстве.

В зависимости от выбранной шкалы подбирают и устанавливают на подвеске 12 прибора соответствующие грузы 17 и закрепляют винтом соответствующий наконечник (оправку) 8. На столике 7 устанавливают испытуемое изделие (образец) и вращением маховика 5 поднимают его к наконечнику 8 до тех пор, пока образец не коснется ограничительного чехла или пока малая стрелка индикатора не остановится против красной точки, а большая — на нуле шкалы индикатора 13 прибора. При отклонении большой стрелки больше чем на пять делений относительно

штриха шкалы, необходимо опустить столик 7 с образцом и твердость измерять в новом месте образца (изделия). Затем вращением барабана 4, который связан с рантом индикатора 13 тросиком 14, установить ноль шкалы С (черный цвет) против большой стрелки индикатора 13. Далее плавным нажатием руки на клавишу 3 включить механизм нагружения. По окончании цикла нагружения образца привести отсчет по шкале индикатора 13. Потом вращением маховика 5 против часовой стрелки испытуемое изделие отвести от наконечника 8 и снять его с опорного столика 7. На каждом изделии рекомендуется проводить не менее трех измерений твердости; первые два измерения твердости после смены шарика или алмазного конуса в расчет не принимают. Расстояние центра отпечатка от края образца или центра другого отпечатка должно быть при испытании по шкалам А и С не менее 3 мм, а по шкале В — не менее 4 мм.

По шкале С на приборе допускается проводить измерения с твердостью не более 70 HRC, так как на алмазном конусе создается слишком большое давление и он может разрушиться. Нижним пределом твердости по шкале С является твердость 20 единиц.

На приборе не рекомендуется проводить испытания: неоднородных по структуре сплавов, например, чугуна, хрупких изделий, имеющих на поверхности раковины, следы грубой обработки и другие дефекты; изделий, которые могут деформироваться под действием нагрузки; изделий толщиной меньше, чем десятикратная глубина отпечатка; криволинейных поверхностей при радиусе кривизны менее 15 мм, так как алмазный конус в этом случае может соскользнуть.

Прибор 2018 TP для измерения твердости по Роквеллу на внутренних и наружных поверхностях деталей из металлов и сплавов снабжен наконечником с алмазным конусом или стальным шариком диаметром 1,588 мм. С помощью этого прибора можно измерять твердость внутренних поверхностей диаметром 30 мм на длине до 20 мм и диаметром 60 мм на длине до 140 мм. Привод прибора электромеханический. Погрешность прибора в единицах твердости, не более: $(25 \pm 5) \text{ HRC}_3 \pm 2,0$; $(45 \pm 5) \text{ HRC}_3 \pm 1,5$; $(65 \pm 5) \text{ HRC}_3 \pm 1,0$; $(83 \pm 3) \text{ HRA} \pm 1,2$; $(90 \pm 10) \text{ HRB} \pm 2,0$. Продолжительность цикла приложения и снятия основной нагрузки от 4 до 5 с.

Наиболее автоматизированным прибором для измерения твердости является прибор 2120 TP (рис. 5.22). Относится к группе полуавтоматических твердомеров. Особенностью конструкции является электромеханическое перемещение испытательного стола, предварительное обжатие испытуемого изделия, автоматизация приложения и снятия предварительной и основной нагрузок. Световая сигнализация и два задаваемых предела допуска по твердости позволяют разбраковывать изделия на три группы: «меньше», «норма», «больше».

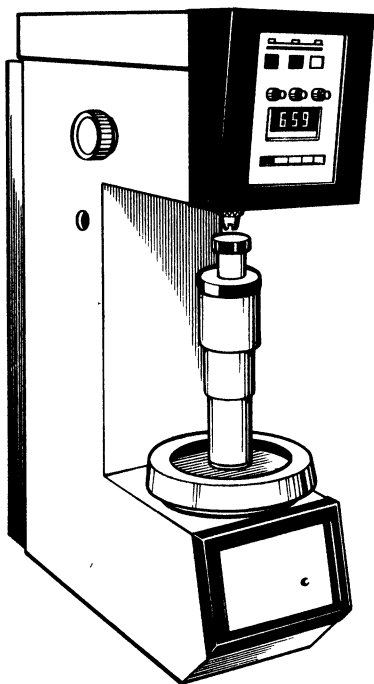
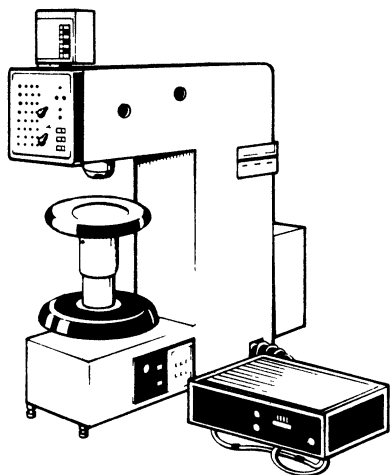


Рис. 5.22. Прибор 2120 ТР для измерения твердости по Роквеллу

Рис. 5.23. Прибор 2142 ТРМ для измерения твердости по Роквеллу



Прибор имеет выход на цифрочитающее устройство в двоично-десятичном коде и автоматическую сортировку по группам твердости. Погрешность в единицах твердости: по шкале А — (83 ± 3) HRA $\pm 1,2$; по шкале В — (90 ± 10) HRB $\pm 2,0$; по шкале С — (25 ± 5) HRC $\pm 2,0$; (45 ± 5) HRC $\pm 1,5$ и (65 ± 5) HRC $\pm 1,0$. Продолжительность выдержки испытуемых изделий под действием общих нагрузок от 0,3 до 60 с. Номинальная цена единицы наименьшего разряда цифрового табло отсчетного устройства 0,1 единицы твердости, число разрядов цифрового табло отсчетного устройства прибора равно 3.

Прибор 2142 ТРМ также предназначен для измерения твердости по Роквеллу металлов и сплавов, пластмасс и других материалов. Конструктивно прибор (рис. 5.23) состоит из системы нагружения, отсчетного устройства, грузовой подвески, электро-механического привода, подъемного винта и электронного блока. Принцип действия прибора основан на вдавливании наконечника с алмазным конусом или со стальным шариком в испытуемое изделие (образец) под действием последовательно прикладываемых предварительной и окончательной нагрузок и измерении глубины внедрения наконечника после снятия основной нагрузки. Прибор позволяет измерять твердость материалов по 24 шкалам Роквелла, при этом погрешность измерения твердости составляет ± 2 единицы твердости.

Отличительные особенности этого прибора: наличие электро-механического привода нагружения; автоматическое включение привода нагружения после приложения предварительной нагрузки; наличие двух режимов работы: первый — с тремя фиксированными выдержками времени (для пластмасс), второй — с произвольными выдержками времени (для остальных материалов); цифровая индикация числа твердости; возможность подключения цифроречевающего устройства и ЭВМ.

Прибор ТКС-14-250 для измерения твердости металлов и сплавов при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу) предназначен для измерения твердости в широком диапазоне: в пределах (70—94) HRN15 и (40—86) HRN30 при использовании алмазного наконечника при нагрузке 150 Н и 300 Н и в пределах (20—78) HRN45 при использовании алмазного наконечника при нагрузке 450 Н по шкале N, в пределах (12—93) HRT15 и (15—82) HRT30, а также (10—72) HRT45 при использовании стального шарика диаметром 1,588 мм при нагрузках 150, 300 и 450 Н по шкале T.

Испытательные нагрузки для этого прибора: а) предварительная 30 Н; б) общая 150, 300, 450 Н.

Погрешность прибора ТКС-14-250 при измерении твердости равна 3,0 единиц твердости. Прибор ТКС-14-250 применяют для измерения твердости очень малых образцов, тонких металлических листов, цементированных и азотированных на небольшую глубину слоев изделий, на поверхности которых нежелательно иметь большой отпечаток.

Прибор ТКС-14-250, принципиально не отличающийся от прибора ТК-2, имеет следующие основные узлы: систему нагружения, грузовые подвески, привод, подъемный винт и съемные столики для установки образцов.

К числу приборов для определения твердости металлов и сплавов по Виккерсу относятся приборы типа ТП-7Р-1, приборы типа 2337 ТУ, ТП-2, переносной прибор ТПП-2, а также приборы типа ХПО-250 (ГДР).

Прибор ТП-2 снабжен экраном 6, на который с помощью оптической системы проецируется изображение отпечатка (рис. 5.24). Нагрузка 20 Н прилагается к наконечнику путем перемещения рукоятки 11 вверх, а нагрузка 10 Н обеспечивается подвешиванием груза 10 к рычагу противовеса 8. Другие нагружения на наконечник создаются сменными грузами. После установки наконечника 4 и необходимой нагрузки включают тумблер 9 и устанавливают образец на опорный столик 3. Поднимают его с помощью рукоятки 2, поджимают к наконечнику 4 и отводят объектив рукой. Нагрузку обеспечивают нажатием на педаль 1, ее выдерживают и затем снимают. Время приложения нагрузки фиксируется сигнальной лампочкой. После снятия нагрузки объектив 5 прибора устанавливают над отпечатком и измеряют диагональ отпечатка. После этого изображение отпечатка на экране 6 поворачивают на 90° с помощью кнопки 7, что дает возможность измерить другую

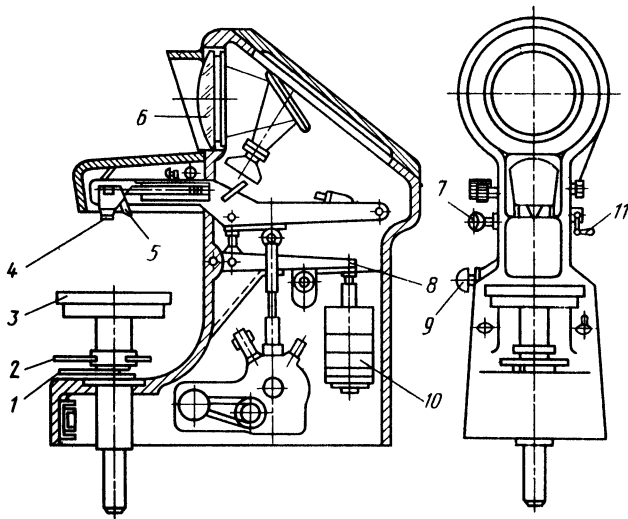


Рис. 5.24. Прибор ТП-2 для измерения твердости по Виккерсу

диагональ отпечатка. Время выдержки заданной нагрузки устанавливают 3—60 с, для чего открывают крышку прибора и поворачивают винт амортизатора.

Прибор ТП-7Р-1 — одна из современных моделей твердомеров для измерения твердости металлов и сплавов по Виккерсу. Принцип действия этого прибора — внедрение алмазной пирамиды в испытуемое изделие в течение определенного времени под действием заданной нагрузки. Отпечаток на образце измеряют с помощью оптической проекционной системы. Диапазон измерения твердости от 8 до 2000 НВ. Отклонение среднего значения числа твердости, полученного на этом приборе, от среднего значения твердости образцовой меры твердости не более $\pm 3\%$. Увеличение оптической системы прибора 120-кратное.

Прибор 2137 ТУ также предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по Виккерсу и Бринеллю. Он имеет корпус, в котором смонтированы рычажная система, предназначенная для передачи испытательных нагрузок на образец; ручной привод с демпферным устройством для плавного приложения испытательных нагрузок; механизм подъема испытательного стола; отсчетно-проекционную систему, с помощью которой отпечаток, полученный на образце при вдавливании в него наконечника, проецируется на экран, увеличенный в 120 раз, и размеры отпечатка измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях; электрооборудование.

Диапазон измерения твердости этим прибором находится в пределах: по Виккерсу 8—2000 НВ, по Бринеллю — 8—450 НВ. Погрешность при измерении твердости $\pm 5\%$.

К числу переносных приборов для измерения твердости по Виккерсу относится переносной прибор ТПП-2, предназначенный для измерения твердости металлов и сплавов в соответствии с ГОСТ 2999—75. Основным узлом прибора является испытательная головка, с помощью которой прикладывается испытательная нагрузка и измеряется отпечаток. Для приложения испытательных нагрузок используют сменные пружины, тарированные на определенные нагрузки. Число твердости определяют путем измерения диагонали отпечатка с использованием оптической измерительной системы. Для установки прибора на испытываемых деталях прибор снабжен магнитным захватом, а также струбиной с испытательным пространством до 160 мм.

Диапазон измерения твердости 8—1500 HV, испытательная нагрузка — 40,03 (5); 98,07 (10) Н (кгс). Увеличение оптической системы 125-кратное. Погрешность измерительного устройства отпечатка образца при измерении длин до 0,2 мм включительно не более $\pm 0,001$ мм, свыше 0,2 мм — не более $\pm 0,002$ мм.

Прибор типа ХПО-250 (ГДР) предназначен для определения твердости по Бринеллю и Виккерсу. Прибор имеет станину 16, накрытую съемной крышкой 15. Тыльная сторона станины закрыта щитом 19 (рис. 5.25). На нижнюю выступающую часть станины насажен штурвал 3, установленный в шарикоподшипниках 2. Через центр штурвала проходит установочный винт 4, который может быть опущен и приподнят. На верхней торцевой стороне установочный винт 4 имеет выточку для установки шипа предметного столика 5. Перпендикулярно над столиком смонтирован в верхней части станины 16 поворотный держатель, несущий нажимной штемпель 7 и вертикальный иллюминатор проекционного устройства. Нажимной штемпель 7 предназначен для подсоединения к нему наконечника 6, который закрепляется еще натяжной втулкой 8, с помощью которой испытуемое изделие прижимается к предметному столику 5, защищая одновременно наконечник и объектив от повреждений. Поворотный держатель закреплен в натяжной втулке 8, установленной в шести шарикоподшипниках направляющей буксы.

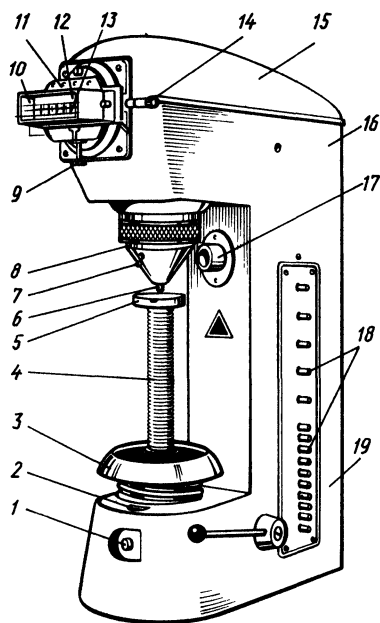


Рис. 5.25. Прибор ХПО-250 для измерения твердости по Бринеллю и Виккерсу

Для измерения отпечатков на образцах в приборе предусмотрено измерительное устройство, состоящее из корпуса 11, в котором установлен экран 12, снабженный прозрачным стеклом 13 с нанесенными на нем штрихами. Экран 12 снабжен также нониусом. Для горизонтального перемещения обоих стекол в нормальном положении служит винт с головкой 9. Сбоку на правой стороне предусмотрен микрометр 14 со шкалой перемещения прозрачного стекла над экраном. Стекло 13 имеет специальную оправку, прикрепленную к измерительному устройству с помощью винтов с накатанными головками. Для затемнения экрана служит защитная рама 10. По краям измерительного устройства установлены передвижные метки, смещенные друг от друга на 90°. При использовании этих меток отпечатки могут быть измерены со смещением точно на 90°. Для освещения отпечатка имеется осветительное устройство 17 под вертикальным иллиминатором, проекционная лампа в оправе осветительного устройства имеет мощность 30 Вт. Перед проекционной лампой установлена линза, собирающая свет, проходящий в вертикальный иллиминатор. Все устройство настроено таким образом, что освещенный отпечаток четко изображается на экране. Для электропитания проекционной лампы предусмотрен трансформатор, расположенный под крышкой 15. Он смонтирован на плите, изготовленной из гетинакса. На этой плите также установлена клеммная планка управления электрической частью прибора.

Для электрического включения прибора предусмотрен выключатель 1. Прибор подводится к сети соединительным проводом, снабженным штепсельной вилкой.

При включении тока выключателем 1 загорается проекционная лампа проекционного и измерительного устройств. Вращением штурвала 3 вправо поднимается установочный винт 4 с предметным столиком 5 и установленным на нем образцом. Поднятие предметного столика продолжается до соприкосновения с натяжной втулкой до тех пор, пока структура поверхности испытуемого образца становится видной на экране 12. Образец прижимается к натяжной втулке и с другой стороны — к предметному столику. Нажатием кнопки 18, соответствующей необходимой в данном случае нагрузке, изменяется положение стопорного кольца грузовой рамы, так что позднее на это кольцо насаживают грузы, которые не участвуют в нагружении наконечника 6. Нажатием кнопки тока управления нагрузка от наконечника 6 передается на образец, оставляя на нем отпечаток.

Созданный на образце отпечаток освещается вертикальным иллиминатором и объективом, причем его изображение через окуляр и окулярную призму передается на экран 12 измерительного устройства, так что отпечаток может быть измерен. Вращением штурвала 3 влево опускается установочный винт 4 предметного столика, что позволяет свободно снять испытанный образец.

Для измерения отпечатков в измерительное устройство вставляют соответствующий объектив. Увеличение в 70 раз применяют при получении малых отпечатков шариками Бринелля и сравнительно больших отпечатков пирамидой Виккерса. Увеличение в 140 раз применяют преимущественно при малых отпечатках.

Числовое значение отпечатка определяют следующим образом. Измерительное устройство прибора вращают сначала так, чтобы диагональ отпечатка по Виккерсу находилась параллельно к сквозному штриху шкалы измерительного устройства. С помощью головки винта 9 (см. рис. 5.25) приближают соседний короткий или длинный штрих на левой стороне шкалы таким образом, чтобы наружный край отпечатка касался внутреннего края штриха измерительного устройства. Вращением микрометра 14 вправо или влево приближают следующий короткий или длинный штрих на правой стороне шкалы измерительного устройства также до отпечатка до тех пор, пока наружный край отпечатка соприкоснется с внутренним краем измерительного устройства. Одновременно соседний штрих, обозначенный сверху цифрой «0», при установке всегда должен находиться в пределах шкалы нониуса.

Числовое значение размера отпечатка определяют следующим образом. Подсчитывают все короткие и длинные штрихи, находящиеся внутри отпечатка. Число штрихов меньше 10 ставят после запятой, а если их более 10, то первую цифру числа ставят перед запятой, а вторую цифру — после запятой. Число штрихов нониуса, расположенных между обоими длинными штрихами, обозначенными «0», без этих двух длинных штрихов дает размер отпечатка (второй знак после запятой). Третий знак после запятой устанавливается отсчетом по шкале головки микрометра 14. Затем измерительное устройство поворачивают на 90° и определяют размер отпечатка следующим образом. Из первого и второго размеров отпечатка получают средний размер отпечатка и по таблицам определяют число твердости.

Прибор мод. ПМТ-3 для измерения микротвердости металлов и сплавов широко используют в лабораторных условиях. Прибор снабжен набором грузов, прессом для запрессовки образцов и набором микрошлифов с выявленной микроструктурой. Прибор ПМТ-3 работает на принципе вдавливания индентора в металл образца (рис. 5.26). Индентором прибора является алмазная пирамида с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136° . Прибор состоит из основания 14 с колонкой 3 и кронштейном 5, тубуса микроскопа 9, укрепленного на кронштейне 5 и перемещающегося вверх и вниз с помощью винтов грубой 6 и тонкой 4 подачи, окулярного микрометра 8, закрепленного в верхней части тубуса, винтов 10, осветителя 11, объектива 12, предметного столика 13, который с помощью винтов 10 перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вращается вокруг центральной оси примерно на 180° .

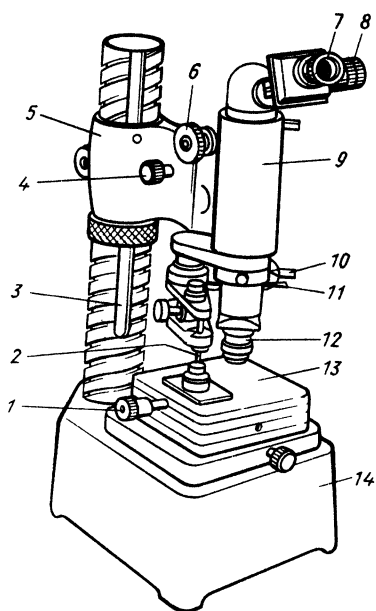


Рис. 5.26. Прибор ПМТ-3 для измерения микротвердости

ника грузы в зависимости от твердости испытуемого образца, а затем предметный столик 13 поворачивают на 180°, при этом испытуемый участок образца будет находиться под алмазным наконечником 2. Медленным поворотом рукоятки от упора до упора опустить алмазный наконечник 2, который под действием установленного груза вдавливается в образец и оставляет отпечаток приблизительно квадратной формы, диагональ которого зависит от твердости испытуемой структурной составляющей металла или сплава образца. Выдержка под нагрузкой должна быть 10—15 с. Затем алмазный наконечник 2 поднимают поворотом

Для определения микротвердости образец закрепляют на пластинке со штифтами пластилином. Строго параллельное положение поверхности образца по отношению к плоскости предметного столика 13 достигается вдавливанием образца в пластилин ручным прессом. Пластинку с закрепленным образцом размещают на предметном столике 13 так, чтобы образец расположился под объективом 12. С помощью винтов грубой 6 и тонкой 4 подачи перемещают тубус микроскопа так, чтобы была видна структурная составляющая, твердость которой измеряют. Затем предметный столик 13 с образцом перемещают так, чтобы испытуемый участок образца оказался в точке перекрестия окулярного микрометра 8. После этого устанавливают на верхний шток алмазного наконечника

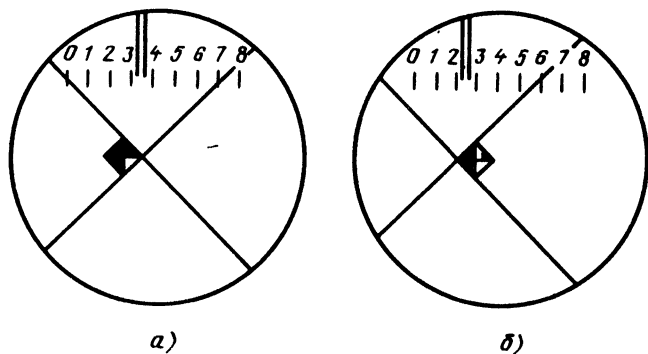


Рис. 5.27. Схемы измерения отпечатка

ручки до исходного положения. Передвигают предметный столик 13 с образцом в исходное положение, в результате чего образец устанавливается под объектив 12 микроскопа. Затем передвижением предметного столика 13 микровинтами 1 и передвижением перекрестия, видимого в окуляре 7, с помощью измерительного барабана окулярного микрометра 8 установить отпечаток на образце по отношению к перекрестию так, как показано на рис. 5.27 (положение а), и записать отсчет M_1 по измеряемому барабану окулярного микрометра 8. После этого вращением измерительного барабана микрометра 8 перемещают перекрестие в новое положение (рис. 5.27, положение б) и снова записывают показания M_2 . Определяют размер диагонали отпечатка по формуле

$$d_{отп} = (M_2 - M_1) c, \quad (5.3)$$

где c — цена маленького деления измерительного барабана окулярного микрометра (на приборе ПМТ-3 равна 0,3 мкм).

Значения микротвердости определяют по формулам или по таблицам.

5.7. Контрольно-измерительные средства, применяемые при испытаниях

Под контрольно-измерительными средствами понимают измерительные инструменты, которые используют для определения размеров изделий. К измеряемым параметрам в металлообработке относят следующие: линейные размеры — диаметр и длина; овальность; непараллельность; непрямолинейность; несимметричность; смещение и др.; шероховатость поверхности и др. В соответствии с параметрами изделий, которые необходимо контролировать, существуют различные средства и методы измерения.

При проведении измерений и выборе измерительных средств применяют стандартные определения.

Измерение — нахождение числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения с помощью средств измерения. Различают прямые и косвенные, абсолютные и относительные измерения.

Прямое измерение — нахождение искомого значения величины непосредственно из опытных данных.

Косвенное измерение — измерение, основанное на известной зависимости между искомой величиной и непосредственно измеряемыми величинами. Обычно косвенное измерение проводят тогда, когда искомую величину невозможно получить прямым измерением.

Абсолютное измерение базируется на прямых измерениях одной или нескольких основных величин. Относительное измерение есть определение отношения искомой величины к одноименной величине, играющей роль единицы.

Метод измерения — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. При контроле изделий применяют метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. По первому методу значение искомой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного средства прямого действия. При методе сравнения определяемый параметр сравнивают с мерой.

При выборе контрольно-измерительных средств принимаются во внимание основные характеристики измерительных средств: цена деления шкалы, диапазон показаний по шкале, пределы измерений, начальное и конечное значения шкалы, чувствительность и абсолютная погрешность измерительного прибора.

Цена деления — разность значений величин, которые соответствуют двум соседним отметкам шкалы.

Диапазон показаний — область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Пределы измерений — наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений. Диапазон измерений относится к рабочей части шкалы, на которой указаны начальное значение, соответствующее наименьшему значению измеряемой величины, и конечное значение, соответствующее наибольшему значению измеряемой величины.

Чувствительность измерительного прибора — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерительного средства — это погрешность, свойственная средству измерений, которое эксплуатируется в нормальных условиях. Измерительные средства, которые используются в металлообработке, разделяются на три основные группы: меры, калибры и универсальные инструменты и приборы.

Мера — это средство измерения, применяемое для воспроизведения физической величины заданного размера.

Калибр — измерительный инструмент для контроля размеров, формы и взаимного расположения элементов изделия.

Универсальные инструменты и приборы применяют для определения значения измеряемой величины.

К простейшим контрольно-измерительным средствам относятся калибры, линейки, штангенциркули и микрометрический инструмент.

При испытаниях для контроля образцов и изделий применяются следующие контрольно-измерительные инструменты:

профильные калибры (шаблоны), металлические измерительные линейки и штангенинструменты, микрометры, инструментальные микроскопы, угломеры, проверяющие линейки, образцы шероховатости поверхности (эталоны).

Калибры — измерительные инструменты для контроля размеров, формы и взаимного расположения частей изделий. Контроль

калибрами позволяет установить отклонения размеров изделий в установленных пределах.

Существуют калибры для проверки гладких цилиндрических изделий, гладких конусов, резьб, линейных размеров, зубчатых и шлицевых соединений, профилей и др.

По методу определения отклонений размеров деталей калибры делят на предельные и нормальные.

Под нормальными калибрами понимают калибры, применяемые для пригонки деталей. Оценка качества пригонки зависит от опытности контролера и, следовательно, является субъективной.

Под предельными калибрами понимают калибры, выполненные по одному из предельных размеров детали. Контроль детали предельным калибром сводится к определению, входит или не входит он в деталь. При оценке размера детали применяют два калибра, которые выполнены по верхней и нижней величинам допуска размеров детали. Предельные калибры делят на проходные, которые должны входить в качественное изделие, и непроходные, которые не должны входить в качественное изделие.

По технологическому применению калибры подразделяют на рабочие калибры, калибры для контролера, приемные калибры и контрольные калибры (контркалибры).

Рабочие калибры применяют для проверки деталей в процессе изготовления, калибры контролера — для контроля готовых деталей работниками ОТК, приемные — для проверки деталей представителями заказчика, контрольные — для контроля рабочих и приемных калибров.

По числу контролируемых параметров различают комплексные калибры для контроля одновременно нескольких параметров детали (например, резьбовые калибры) и простые калибры для контроля одного параметра детали.

По характеру контакта с деталью различают калибры с поверхностным контактом (пробка), с линейным контактом (скоба) и точечным контактом (нутромер).

По конструктивным признакам калибры делят на нерегулируемые (жесткие, например, двусторонние предельные калибры-пробки для проверки отверстий) и устанавливаемые на необходимый размер, а также профильные калибры-шаблоны.

К калибрам для контроля линейных размеров относятся также щупы-пластины для проверки зазоров между поверхностями (рис. 5.28). Толщина одной пластины от 0,02 мм до 1 мм, длина 50, 100 и 200 мм. Число щупов в наборе может быть 9, 10 и 17 шт.

Щупы применяют как отдельно, так и в различных сочетаниях для получения необходимого размера.

Линейки измерительные металлические являются штриховыми мерами длины. Применяются для линейных измерений методом непосредственного сравнения измеряемых размеров со шкалой мер. Линейки измерительные металлические изготавливают в соответствии с ГОСТ 427—75 с пределами измерений 150 и 300 мм — с двумя

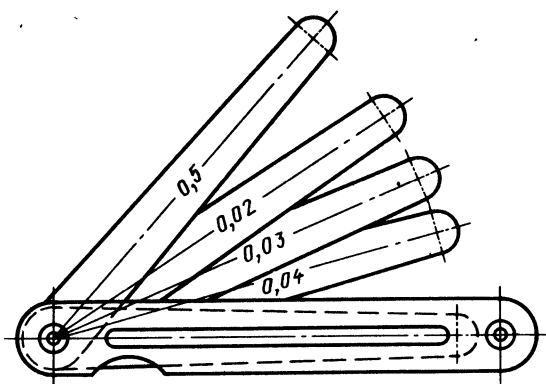


Рис. 5.28. Щуп

шкалами и 500 и 1000 мм с одной шкалой, с ценой деления 1,0 мм (рис. 5.29). Линейки с пределом измерений до 500 мм должны иметь ширину 18—22 мм, толщину 0,4—0,6 мм. Линейки с пределом измерений до 1000 мм должны быть шириной 36—40 мм и толщиной 0,8—1,0 мм.

Линейки изготовляют из стальной пружинной термообработанной ленты со светлополированной поверхностью. Линейки должны иметь антикоррозионное покрытие толщиной 3 мкм.

Отклонения от номинальных значений длин сантиметровых делений линейки не должны превышать 0,10 мм, а отклонения от номинальных значений длин миллиметровых делений шкалы линейки не должны превышать $\pm 0,005$ мм.

Штангенинструменты (штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмасы) имеют штангу с нанесенной на ней основной шкалой с интервалом деления 1 мм и нониус, т. е. вспомогательную шкалу для отсчета долей делений основной шкалы.

Наиболее распространенный вид штангенинструмента — штангенциркуль (рис. 5.30). Штангенциркули предназначены для измерения наружных и внутренних размеров до 2000 мм. Штангенциркули изготовляют следующих трех типов: ШЦ-I, ШЦ-II и

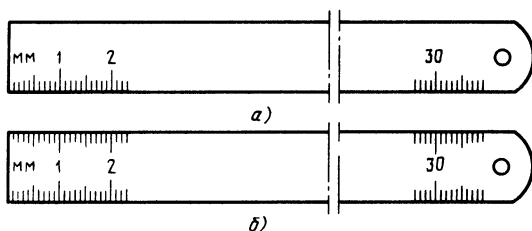


Рис. 5.29. Измерительная металлическая линейка с одной шкалой (а) и с двумя шкалами (б)

ШЦ-III (ГОСТ 166—80). Штангенциркули ШЦ-I — двусторонние с глубиномером. Значение отсчета по нониусу составляет 0,1 мм. Штангенциркули типа ШЦ-II — двусторонние с губками для измерения и для разметки. Значение отсчета по нониусу составляет 0,05 мм.

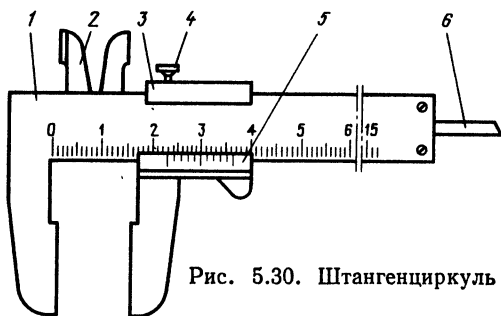


Рис. 5.30. Штангенциркуль

Штангенциркули ШЦ-III — односторонние. Значения отсчета по нониусу 0,05 и 0,1 мм. Штангенциркуль состоит из штанги 1, измерительных губок 2, рамки 3, зажима 4, нониуса 5, линейки глубиномера 6 и микрометрической подачи (для штангенциркулей типов ШЦ-II и ШЦ-III). При изготовлении образцов для проверки их параметров используют штангенциркули типов ШЦ-I и ШЦ-II.

Штангенглубиномеры применяют для измерения глубин до 400 мм. Они представляют собой штангенциркули с дополнительными элементами.

Для разметки и измерения размеров до 2500 мм используют штангенрейсмасы. При разметке штангенрейсмас устанавливают на нужный размер. При перемещении по плите вдоль размечаемой заготовки разметочная ножка оставляет на вертикальной поверхности заготовки горизонтальную линию. При измерении высоты образца вместо разметочной ножки устанавливают измерительную ножку, которая имеет две измерительные поверхности — нижнюю плоскую и верхнюю с ребром. При использовании верхней измерительной поверхности к значению отсчета по нониусу необходимо прибавить размер ножки.

Для измерения размера штангенинструментом нужно число целых миллиметров взять по основной шкале до нулевого штриха нониуса, а число десятых долей миллиметра взять по нониусу, определив, какой штрих нониуса совпадает со штрихом основной шкалы.

Штангенинструменты подлежат обязательной проверке и начинают ее с проверки правильности установки на нуль, так как нулевые штрихи нониуса и штанги должны совпадать.

Контроль погрешностей измерений штангенинструментом со значением отсчета по нониусу 0,1 мм осуществляют по концевым мерам длины не менее чем в трех точках, а с отсчетом 0,05 мм — не менее чем в шести точках, которые равномерно расположены в пределах шкал штанги и нониуса. При проверке губки штангенинструмента должны быть перпендикулярны широким нерабочим плоскостям мер. После проверки на годный штангенинструмент выдается паспорт или аттестат установленной формы.

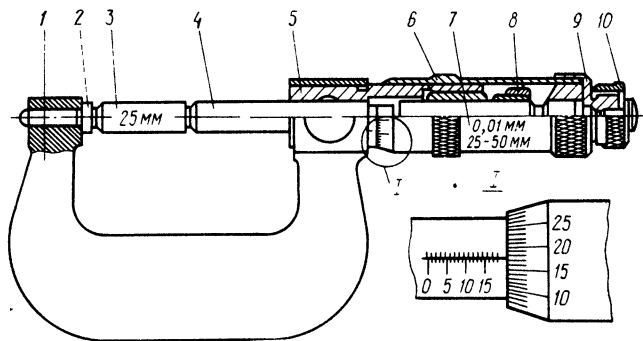


Рис. 5.31. Микрометр

Для более точных измерений, чем измерение штангенинструментом, применяют микрометры — измерительный универсальный инструмент с точным (микрометрическим) винтом для измерений линейных размеров контактным способом. Изготавливают микрометры следующих типов: МК — гладкие для измерения наружных размеров изделий; МЛ — микрометры листовые с циферблатом для измерения толщины листов и лент; МТ — трубные для измерения толщины стенок труб; МЗ — для измерения длины общей нормали зубчатых колес; МГ — микрометрические головки и МП — микрометры для проволоки.

Микрометр (рис. 5.31) имеет скобу 1, в которую запрессованы пятка 2 и стебель 5, микрометрический винт 4, который ввинчивается в микрогайку 7, регулировочную гайку 8, которой стягивают микрогайку 7 до тех пор, пока микровинт 4 не будет перемещаться в ней без зазора, барабан 6, закрепленный установочным колпачком 9, который упирается в зубчатую поверхность трещотки 10. В момент вращения трещотки передает микровинту крутящий момент определенной величины, необходимой для обеспечения измерительного усилия.

Микрометры выпускают с диапазонами измерений 0—25 мм, 25—50 мм и так далее до 600 мм.

При измерении изделие 3 помещают между пяткой 2 и микрометрическим винтом 4. Трещотку вращают до тех пор, пока она не начнет прокручиваться. Затем производят отсчет показаний.

В зависимости от используемых средств существуют три основных способа измерения углов:

1) сравнительный метод измерения углов с помощью жестких угловых мер, при этом измерении определяют отклонение измеряемого угла от меры;

2) абсолютный гониометрический метод измерения углов, при котором измеряемый угол определяют непосредственно по угловой шкале прибора;

3) косвенный тригонометрический метод, при котором угол определяют расчетным путем по результатам измерения линейных

размеров (катета, гипотенузы треугольников), которые связаны с измерением углом тригонометрической функцией (синус или тангенс).

В машиностроении и металлообработке для измерения углов изделий применяют угломеры мод. УН для измерения наружных и внутренних углов и мод. УМ — для измерения наружных углов.

Угломер типа 2 мод. 127 (УН) (рис. 5.32) имеет сектор 3 с градусной шкалой, на которой зафиксирована линейка 4. На секторе 3 передвигается сектор 6 с нониусом 2 и стопором 5. К сектору 6 с помощью съемной державки 1 крепится угольник 7, к которому державкой 9 присоединена съемная линейка 8. Для проверки углов в диапазоне от 50 до 140° угольник 7 снимается и вместо него в державку 1 устанавливается линейка 8. В таком виде угломером можно измерять углы от 0 до 50°. При измерении углов от 140 до 230°

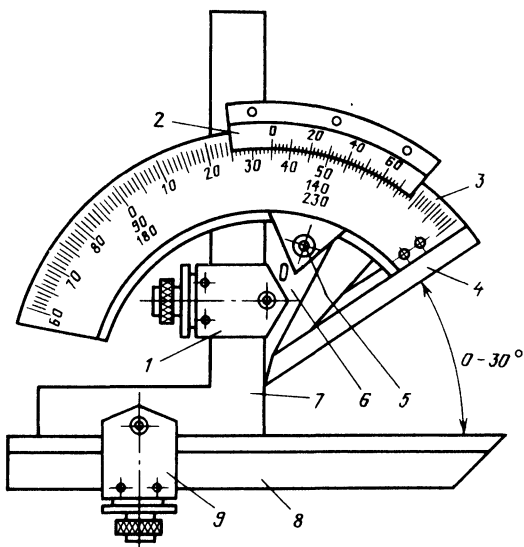


Рис. 5.32. Угломер

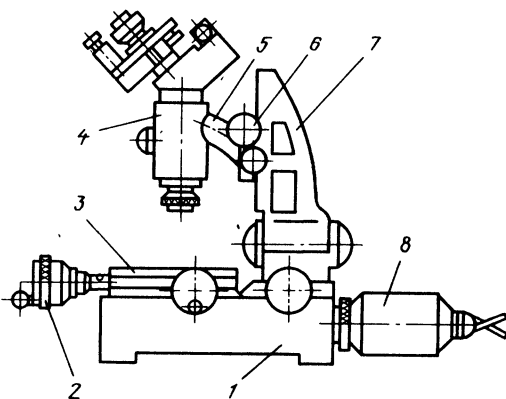


Рис. 5.33. Схема инструментального микроскопа

в державку 1 устанавливается угольник 7 со снятой державкой 9 и без линейки. Контроль углов от 230 до 320° осуществляется без линейки и угольника при отсутствии державки 1.

Угломеры мод. УМ предназначены для измерения наружных углов от 0 до 180°. Отсчет по угловому нониусу осуществляется таким же образом, как при отсчете по нониусу штангенциркуля.

Деталь для измерения устанавливается между линейкой 8 и угольником 7, жестко связанным с нониусом 2. Перемещаясь по

секторам 3, сектор с нониусом 2 в то же время вращается около точки *O*, которая является центром прибора (см. рис. 5.32).

Инструментальный микроскоп ИМ 150×50, Б (ГОСТ 8074—82) предназначен для измерения наружных и внутренних угловых и линейных размеров изделий в прямоугольных и полярных координатах. Микроскоп состоит из основания 1 (рис. 5.33), на котором смонтирован предметный стол 3 с микрометрическими винтами 2 продольного и поперечного перемещения колонки 7, по направлению которых с помощью маховиков 6 передвигается кронштейн 5 с микроскопом 4. В задней стенке основания зафиксировано осветительное устройство 8.

Контрольно-измерительные инструменты должны храниться в сухих отопляемых закрытых помещениях на стеллажах или в шкафах при температуре воздуха от 10 до 35 °С и относительной влажности воздуха до 80 %. В воздухе помещения не должно быть примесей агрессивных газов, способствующих возникновению коррозии. Стационарные приборы накрывают специальными чехлами и хранят непосредственно на рабочих местах. Металлические поверхности приборов, не защищенные антикоррозионными покрытиями, следует после работы протирать авиационным бензином и вытирать салфеткой. Затем на них наносят смазочный материал (технический вазелин).

Инструментальные микроскопы требуют особенно бережного обращения и ухода. Необходимо следить, чтобы направляющие этих микроскопов не покрывались пылью и не подвергались коррозии. Перед применением измерительных приборов их следует протереть мягкой чистой тряпкой, покрытой вазелином, так чтобы на поверхности осталась тонкая жировая пленка. Измерительные приборы следует периодически чистить, смазывать их поверхности, а в установленные сроки проводить юстировку. Наружные оптические поверхности приборов очищают обезжиренной в эфире кисточкой и затем протирают их чистой салфеткой.

Штангенциркули, микрометры, щупы должны храниться в футлярах. Все контрольно-измерительные инструменты следует проверять в сроки, установленные в графике периодической проверки. Контроль за проверкой контрольно-измерительных инструментов осуществляет отдел метрологии совместно с центральной измерительной лабораторией.

Контрольные вопросы

1. Какие машины применяют для статических испытаний металлов и сплавов?
2. Укажите основные узлы машин для испытаний при ударных нагрузках.
3. В чем заключаются конструктивные особенности машин для испытаний при повторно-переменных нагрузках.
4. Назовите приборы для определения твердости и расскажите, как они действуют.
5. Какие контрольно-измерительные инструменты применяют при испытаниях?

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

6.1. Классификация методов неразрушающего контроля

В условиях массового производства современных изделий важное значение имеют методы неразрушающего контроля качества продукции.

Основные преимущества этих методов: простота испытаний, быстрое получение результатов, возможность многократного повторения испытания изделий, а не образцов материала.

Неразрушающие методы контроля обеспечивают:

экономия металлов (сплавов), экономия рабочего времени, повышение качества выпускаемой продукции за счет предотвращения отклонения качества изделия от стандартных норм, снижение эксплуатационных расходов и производственных затрат, возможность получения данных для проектирования, правильное проведение обработки изделий и более эффективное использование технологического оборудования;

увеличение надежности, т. е. обнаружение зон концентрации механических напряжений, определение местонахождения усталостных трещин, предотвращение неправильного функционирования оборудования и оснастки, исключение поломки оборудования;

безопасность, т. е. предотвращение аварий и тяжелых травм; сортировку материала, определение химического состава, различий в термообработке, в физических и металлургических свойствах металлов и сплавов.

В основу классификации методов неразрушающего контроля положен физический процесс с момента взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом до получения первичной информации.

В соответствии с ГОСТ 18353—79 неразрушающий контроль классифицируют по видам и методам. Различают девять видов неразрушающего контроля металлов, сплавов и изделий из них: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами.

Методы каждого вида неразрушающего контроля классифицируют по следующим признакам: 1) характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом; 2) первичным информативным параметрам; 3) способам получения первичной информации.

По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом выделяют следующие методы неразрушающего контроля: магнитный, электрический, трибоэлектрический, термоэлектрический, прошедшего излучения, отраженного излучения, рассеянного излучения, резонансные, тепловой контактный, конвективный, собственного излучения, индуцированного излучения, активационного анализа, характеристического излучения, автоэмиссионный, импедансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный и молекулярный.

По первичному информативному параметру различают следующие методы неразрушающего контроля: коэрцитивной силы, намагниченности, остаточной индукции, магнитной проницаемости, напряженности, электропотенциальный, электроемкостный, амплитудный, фазовый, термометрический, теплотеметрический, жидкостный, газовый и др.

По способу получения первичной информации выделяют следующие методы неразрушающего контроля: магнитопорошковый, индукционный, эффект Холла, магниторезисторный, электропараметрический, контактной разности потенциалов, трансформаторный, голографический, термобумага, термокраска, термолюминофоров, калориметрический, визуально-оптический, радиографический, радиоскопический, пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический, порошковый, яркостный, цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, галогенный, акустический и др.

Основные операции любого метода неразрушающего контроля: помещение изделия в контролируемую среду; выявление изменений характеристик контролирующей среды под влиянием дефектов или отклонений в структуре или свойствах материала с помощью приборов; преобразование этих изменений с целью придания им формы, удобной для расшифровки; расшифровка полученной информации.

Методы неразрушающего контроля основаны на косвенных измерениях. Результатами испытаний могут быть изменение показаний регистрирующего прибора, отклонение кривой, вычерченной самописцем, темные или светлые области на рентгеновской пленке, появление всплесков на осциллограмме или изменение ее вида, изменение цвета химического вещества и др.

К наиболее распространенным методам неразрушающего контроля относятся тепловой, магнитный, электрический, акустический, вихретоковый, капиллярный (проникающими веществами), теческанинг, радиографический и радиоскопический. Эти методы применяют для обнаружения в изделиях поверхностных и внутренних дефектов, для контроля качества термической и химикотермической обработки, для выявления отклонений химического состава металлов и сплавов, а также для определения их физических параметров.

6.2. Дефекты металлов и сплавов, причины их возникновения

Дефекты в металлах и сплавах, а также в изделиях из них делятся на явные и скрытые, на критические, значительные и малозначительные (ГОСТ 15467—79).

Рассмотрим основные виды дефектов. *Отклонение от заданного химического состава металлов и сплавов.* Отклонение содержания легирующих элементов и примесей (Mn, C, Cr, Ni, P, S и др.) от установленных стандартом норм следует рассматривать как дефект только тогда, когда в связи с этим снижаются эксплуатационные свойства материала или изделия. Для получения качественных металлов и сплавов необходимы равномерное распределение примесей в металле (сплаве) и стабильность металлургического процесса изготовления отливок (заготовок).

Графитизация цементита происходит в углеродистых, высоколегированных и низколегированных сталях в условиях длительного нагревания при температурах 450—650 °С. Образованию графита при этих температурах способствует раскисление стали большим количеством алюминия. Для ликвидации этого дефекта применяют присадку (добавку) легирующих элементов, которые образуют устойчивые карбиды хрома, ниобия, титана, вольфрама и др.

Грубозернистость сплава может быть вызвана: перегревом при горячей обработке давлением или термической обработке, длительным нагреванием изделия, рекристаллизацией после критической деформации при критической температуре нагрева изделия.

Термические трещины. При закалке изделий появляются напряжения в результате изменения объема и неравномерности усадки металла. Эти напряжения превышают сопротивление отрыву. Резкие переходы сечений, как и дефекты поверхности (плены, закаты, обезуглероживание и др.), действуя как концентраторы напряжений, способствуют образованию термических трещин.

Напряжения, возникающие при закалке изделий, увеличиваются при повышении скорости охлаждения изделия. Для предотвращения термических трещин необходимо: выбирать такой способ охлаждения, который обеспечивает необходимую глубину закаленного слоя; не допускать превышения температуры закалки изделия, так как закалка с перегревом приводит к образованию крупных зерен.

Ступенчатая закалка деталей снижает склонность к образованию термических трещин в изделиях.

Коррозия металлов и сплавов. Большинство металлов и сплавов изменяют свои физические и химические свойства под действием химически активных сред и даже обычных атмосферных условий. Разрушение металлов и сплавов вследствие их взаимодействия с внешней средой называется коррозией. Различают коррозию химическую, электрохимическую, общую или сплошную, местную

(или неравномерную), высокотемпературную, контактную и коррозионно-эрозионную (абляция).

Химическая коррозия появляется в горячих или сухих газах, в бензине, маслах и других жидкостях, которые не являются электролитами. Электрохимическая коррозия протекает в средах, которые могут быть электролитами (растворы кислот, солей, щелочей).

Сплошная коррозия поражает равномерно всю поверхность изделий из черных и цветных металлов и их сплавов.

Неравномерная коррозия подразделяется на точечную, язвенную (пятна), подповерхностную и др. и имеет в основе межкристаллитную коррозию. Межкристаллитная коррозия развивается по границам зерен.

Высокотемпературная коррозия возникает в воздушной и агрессивных газовых средах. Способность металлов и сплавов противостоять высокотемпературной коррозии называется жаростойкостью (окалиностойкостью).

Контактная коррозия появляется в местах контакта электрохимически разнородных металлов и сплавов.

Абляция — коррозионно-эрозионное разрушение под воздействием высокотемпературного и высокоскоростного газового потока, которое сопровождается расплавлением, сублимацией и уносом частиц металла и сплава.

Для защиты от атмосферной коррозии применяют следующие методы и средства: консервацию маслами, смазочными материалами и ингибиторами при хранении и транспортировании металлов и изделий из них; нанесение металлических и неметаллических покрытий для защиты в эксплуатационных условиях; покрытие лаками, красками и другими полимерными материалами; электрохимическую защиту протекторными или катодными методами.

Красноломкость — охрупчивание металлов и сплавов при высоких температурах возникает в первую очередь при малой пластической деформации.

Красноломкость стали вызывается примесью серы. Однако для автоматных сталей с 0,2—0,3 % S красноломкость не характерна при качественной их выплавке и обработке. Красноломкость появляется чаще всего у сталей с малым содержанием марганца (до 0,2 % Mn) при температурах 850—1050 °С. Явления, подобные красноломкости, наблюдаются также в сталях с высоким содержанием меди и никеля. Красноломкость сталей, содержащих медь, можно снизить введением в них никеля.

Ликвация — неоднородность отдельных участков металла по химическому составу, структуре, неметаллическим и газовым включениям. Существует несколько ее разновидностей.

Точечная ликвация, или точечная неоднородность — мелкие округлые сильно травящиеся (матовые) точки.

Пятнистая ликвация — общая и краевая — отдельные темные пятна различных размеров и форм, расположенные равномерно

или ориентированные вдоль граней изделия. Определяется числом, размером пятен, площадью поражений или глубиной залегания.

Ликвационный квадрат или круг (по конфигурации слитка) выявляется в виде полоски, травящейся более интенсивно по сравнению с остальной частью изделия.

Подусадочная ликвация — темные, легко растравливающиеся участки металла в центре заготовки.

Оценка всех разновидностей ликвации производится на травленых образцах и на изломах по ГОСТ 10243—75.

Полное устранение ликвации в сталях невозможно, так как она обусловлена физическими процессами, протекающими при затвердевании кристаллов. Пятнистая ликвация может быть частично устранена путем раскисления стали кремнием и алюминием. Точечная ликвация может быть уменьшена отжигом при высоких температурах и обработкой металла ковкой и прокаткой. В инструментальных сталях большая пятнистая ликвация настолько ослабляет межкристаллитные связи в металле, что уже при самых незначительных нагрузках может произойти разрушение. Во время закалки изделий с большой ликвацией, в особенности из высоколегированных сталей, могут появиться термические трещины.

Мягкие пятна появляются в результате загрязнения поверхности, например окалиной, которая нарушает науглероживание при цементации в результате плохого теплоотвода, ослабляющего закаливающее действие охлаждающей среды.

Науглероживание стали — увеличение содержания углерода, которое может наступить при нагреве в условиях соприкосновения с носителями углерода (науглероживающая атмосфера, науглероживание в печах, отапливаемых угольной пылью); при плохой воспламеняемости горючего вещества или неполноте его сгорания; нагреве в таких средах, как коксовая мука, зола, в которых содержится еще не сгоревший углерод; термической обработке в соляных ваннах, содержащих углерод. В улучшаемых сталях при этом возникают твердые пятна (участки повышенной твердости); при дальнейшей обработке могут появиться трещины. Науглероживание коррозионно-стойких сталей приводит к уменьшению их коррозионной стойкости.

Обезуглероживание стали наблюдается при ее нагреве в окислительном газе, в соляной ванне или в средах с повышенным содержанием водорода. Процесс обезуглероживания может привести к появлению на поверхности изделия мягких корок. Обезуглероживание может быть предотвращено добавкой древесных или чугунных стружек в нагревательное устройство с целью получения нейтральной или восстановительной среды, а также нагреванием изделий в специальных защитных средах.

Отпускная хрупкость проявляется в сталях, подвергаемых улучшению, снижением ударной вязкости после закалки и отпуска обычно в интервале температур 475—575 °С, в некоторых случаях

при более высоких температурах. Медленное охлаждение изделия в указанном интервале температур оказывает подобное действие. Отпуская хрупкость проявляется при улучшении хромистых, марганцовистых, хромомарганцовистых и хромоникелевых сталей.

Для ликвидации отпускной хрупкости сталь необходимо быстро охладить при температурах выше критических, указанных в диаграммах термической обработки стали (сплава), а также дополнительно легировать молибденом или вольфрамом; при содержании молибдена в стали около 0,15 % ее отпускная хрупкость значительно снижается.

Поверхностные дефекты. Различают поверхностные дефекты, которые ухудшают внешний вид изделия, но не влияют на его эксплуатационные свойства, и дефекты, препятствующие дальнейшей обработке и использованию изделия. Один и тот же дефект, например поры, на прутке стали, предназначенной для слабонагруженной детали, не влияет на ее стойкость, а на тонком листе — существенно снижает способность к глубокой вытяжке. Поверхностные дефекты на изделиях могут появляться как результат:

1) дефектов поверхности слитка, например, раскатанных пригаров, затянутых кромок, морщин, гармошек, раковин от окалины и др.;

2) дефектов, возникающих при обработке, таких, как плены при ковке и прокатке, морщины при прокатке, усы в открытых частях калибров и подрезы, которые при дальнейшей обработке могут привести к закатам и трещинам.

Поверхностные дефекты могут быть уменьшены или ликвидированы при особо тщательном соблюдении режимов плавки стали, медленной прокатке с небольшими ребровыми обжатиями, правильной калибровке, при охлаждении прокатываемой заготовки водой под давлением или очистке проволочными щетками, обточке, четком контроле поверхности и сортировке.

Синеломкость — понижение пластичности и ударной вязкости стали при одновременном повышении прочности, наблюдаемое при 200—400 °С (возникает синий цвет побежалости).

Хрупкость, обусловленная старением. Старение — изменение строения и свойств металла, протекающее в процессе длительной выдержки при комнатной температуре (естественное старение) или при нагреве (искусственное старение).

Обычно старение приводит к увеличению прочности и твердости сплава при одновременном уменьшении пластичности и ударной вязкости. Старение используется для повышения прочности и жаропрочности различных сплавов.

В ряде случаев старение отрицательно влияет на свойства сплава, например деформационное старение.

При деформационном старении (наклепе) мягких сталей (углеродистых качественных конструкционных сталей 05кп, 08кп, 10кп и др.) ударная вязкость уменьшается с повышением температуры, причем при нормальной температуре это происходит в течение

длительного времени, а при повышенной — значительно быстрее (при 250 °С в течение нескольких минут).

Искусственное старение наблюдается на изделиях, работающих при ударных нагрузках. Так, например, заклепочные швы на сталях, склонных к старению, через некоторое время становятся хрупкими при работе под ударными нагрузками.

Для замедления или предотвращения старения устраняют деформационное старение в изделиях, испытывавших ударные нагрузки, путем отжига этих изделий. Кроме того, рекомендуется использовать сталь, слабо легированную алюминием, так как она отличается малой склонностью к старению.

Травильная хрупкость появляется при длительном травлении деталей в разбавленных кислотах. Сталь поглощает выделяющийся при этом водород и становится ломкой и хрупкой. Такое явление наблюдается при травлении тонких листов, труб и проволоки. Травильная хрупкость стали снижает динамическую прочность и ударную вязкость стали и способность ее к эмалированию. Для ликвидации травильной хрупкости необходимо применять ингибиторы, контролировать время травления деталей, а также химический состав травильных ванн. Травильная хрупкость может быть ослаблена или устранена нагреванием изделий при температуре 100—300 °С. При этом основная масса водорода удаляется из металла.

Трещины можно классифицировать следующим образом.

① Трещины от напряжений в слитках (поперечные и продольные) возникают в результате отслоения затвердевшей корки под давлением еще жидкой сердцевины слитка (продольные трещины) или при зависании слитка в изложнице (поперечные трещины). Такие трещины могут появляться при слишком быстром охлаждении и при слишком быстром нагревании слитка под ковку или прокатку.

② Трещины от напряжений при деформировании (большие усилия обжатия при прокатке) приводят к образованию трещин в сердцевине изделия.

③ Термические трещины появляются при быстром охлаждении и нагревании деталей, а также в результате недостаточного и поздно проведенного отпуска.

④ Травильные трещины появляются при травлении высоколегированных и закаленных сталей под действием внутренних напряжений, возникающих при травлении; для устранения этого дефекта нужно травить стали только в отожженном или отпущенном состоянии.

⑤ Трещины термической усталости (например, в инструментах для горячей штамповки и прокатки) как результат частых колебаний температуры.

⑥ Шлифовочные трещины возникают в результате местных тепловых напряжений из-за больших подач при шлифовании деталей.

7. Сварочные трещины появляются в результате напряжений, возникающих при охлаждении сварного шва.

8. Волосовины возникают при закалке под влиянием вытянутых скоплений включений, образовавшихся при обработке металла давлением.

9. Внутренние трещины появляются при очень быстром нагревании или при слишком быстром деформировании в горячем состоянии, при холодном волочении, при больших усилиях обжатия и при недостаточном промежуточном отжиге.

Усадочные раковины — дефекты в виде открытых или закрытых полостей, образуются в результате усадки при затвердевании металла, которое начинается у стенок изложницы и медленно распространяется к центру слитка; происходит значительное уменьшение объема. Для устранения усадочных раковин необходимо выбирать рациональную форму слитка, правильную температуру и скорость разливки металла.

Флокен — дефект в виде разрыва тела отливки под влиянием растворенного в стали водорода и внутренних напряжений, проходящего полностью или частично через объемы первичных зерен аустенита.

Флокен в изломе термически обработанной отливки имеет вид сглаженных поверхностей без металлического блеска (матового цвета) на общем сером фоне волокнистой составляющей.

Низкая вязкость и хрупкость сплава являются результатом неправильной термической обработки (перегрев, недостаточный отпуск после закалки); выбора сплава с очень высокой твердостью (неподходящий химический состав сплава); многоосного ударного нагружения при низких температурах; сильного наклепа сплава; крупнозернистого состава сплава; выделения карбидов на границах зерен; выделения интерметаллических соединений; поглощения углерода, азота или серы в процессе эксплуатации.

Черный излом. В инструментальной стали с повышенным содержанием углерода, медленно охлаждаемой с высокой температуры и подвергаемой ковке при очень низких температурах, в результате выделения углерода при отжиге образуется черный излом — излом со сплошной или частичной темно-серой или черной окраской. Этот излом может быть устранен с помощьюковки при повышенных температурах. Черный излом появляется также при длительных процессахковки и прокатки.

6.3. Тепловые методы обнаружения дефектов

Тепловые методы неразрушающего контроля дефектов основаны на регистрации тепловых полей, температуры и перепада характеристик контролируемого объекта.

Температурное поле поверхности контролируемого изделия является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые зависят от наличия наружных и внутренних

дефектов. Температурный перепад является одной из основных характеристик температурного поля в зоне дефектов контролируемого изделия.

Тепловые методы делятся на пассивные и активные. При пассивном контроле используется теплота самого контролируемого изделия, а при активном контроле на изделие воздействует энергия внешнего источника. Пассивный контроль предназначен для определения теплового режима изделия и для обнаружения отклонений от заданной формы и геометрических размеров изделия. Активный контроль позволяет обнаружить дефекты в изделии (трещины, инородные включения, пористость), а также изменения в структуре и физико-механических свойствах изделий.

Различают односторонний метод контроля (по отраженному излучению), двусторонний метод контроля (по прошедшему излучению) и комбинированный метод в зависимости от расположения источника, контролируемого объекта и термочувствительной аппаратуры.

Для получения объективных показателей при неразрушающем контроле используют индикаторы и измерительные преобразователи теплового излучения. Для преобразования потока теплового излучения от поверхности контролируемого изделия в видимое изображение применяют термоиндикаторы на основе термочувствительных веществ и аппаратуру для визуального определения тепловых полей.

Изделие нагревают и температуру или температурное поле на участках изделия устанавливают с помощью термочувствительных химических веществ, термопар, термометров и инфракрасных детекторов. Дефекты, находящиеся в изделии, искажают нормальное температурное поле на поверхности или внутри изделия.

Испытуемое изделие нагревается при непосредственном контакте с источником тепловой энергии, индукционным способом или с помощью источников инфракрасного излучения.

Распределение температур на изделии можно определить с помощью различных термочувствительных веществ (стеарин, воск, термолаки, термокраски, фосфоры, пленки, чувствительные к инфракрасному излучению, фотопроводящие материалы, тонкие нефтяные пленки, меняющие цвет в зависимости от температуры), а также преобразователей теплового излучения (термопары, термометры, полупроводниковые и электронно-вакуумные приборы и т. д.).

Метод термокрасок. Сущность этого метода заключается в следующем. На испытуемое изделие наносится фосфор. Максимальная толщина слоя фосфора на изделии должна составлять 0,025 мм. При применении более толстого слоя фосфора чувствительность испытаний снижается, так как краска является тепловой изоляцией. После нанесения слоя фосфора испытуемое изделие нагревают и затем охлаждают. Нагрев производят погружением изделия в горячую воду при температуре 54,5 °С, а охлаждение — погру-

жением в воду с температурой 4,5 °С. При нагревании можно использовать индукционный и инфракрасный нагреватели, в этих случаях изделие охлаждают в потоке воздуха.

В зоне изменения температуры на изделии наблюдаются темные участки, что позволяет выявить границы зон образования неметаллических соединений. Недостатком этого метода контроля является обратимость изменения цвета, т. е., спустя некоторое время, цветовая окраска на изделии исчезает. Кроме того, нанесенный фосфорный слой необходимо подвергать ультрафиолетовому облучению для более четкого установления температурного поля.

Контроль с помощью термоиндикаторов плавления. Этот контроль проводят с помощью термокарандашей и термолаков. Термокарандаши представляют собой термочувствительные мелки, имеющие определенные калиброванные точки плавления. Диапазон температур термокарандашей от 45 до 1100 °С. Каждый вид карандашей соответствует определенной температуре в пределах допуска ± 1 % от номинальной температуры. При контроле термокарандашом на испытуемое изделие в наиболее характерных участках наносят риски. При нагревании карандашные риски плавятся по мере того, как достигается температурный предел для термокарандаша данного типа.

Распределение температур и линии изотерм для таких поверхностей, как стенки топок, литейных ковшей, печей для обжига цемента и др., могут быть определены путем использования соответствующего набора термокарандашей. С этой целью на испытуемую поверхность наносят термокарандашом линии, образующие определенный рисунок: параллельные или радиально расходящиеся линии, концентрические окружности и т. п. Затем нагревают изделие и оценивают теплопроводность по последовательности расплавления рисок.

Термолак (термочувствительный лак) состоит из веществ, близких по составу к веществу термокарандашей, но эти вещества находятся во взвешенном состоянии в химически неактивной летучей невоспламеняющейся жидкости. Лак на изделие наносят кистью. После высыхания лака образуется матовое непрозрачное покрытие. При нагревании изделия до температуры плавления лака высушенный лак плавится, затем изделие охлаждают, расплавленный лак застывает. Образуется характерная гляцевидная кристаллическая или прозрачная поверхность. Термолаки используют при температурах от 45 до 1370 °С и применяют в случае, когда наблюдать за изделием необходимо с некоторого расстояния (например, при термообработке деталей). Этот метод целесообразно использовать для определения температурного поля и максимальных температур при испытании гладких поверхностей стекол, пластмасс и полированного металла.

Термоиндикаторы (термочувствительные пигменты) и инфракрасная фотография. Термочувствительные пигменты — это специальные термочувствительные краски, которые изменяют перво-

начальный цвет при достижении определенной температуры. Диапазон температур термочувствительных пигментов — от 40 до 1000 °С. Новые цвета пигментов не являются оттенками первоначального цвета, а резко отличаются от него и поэтому легко различимы. Некоторые пигменты изменяют цвет однократно, другие — многократно.

Время стабильного цвета пигментов, т. е. время от начала нагревания образца до изменения цвета пигмента, составляет примерно 30 мин. При изменении цвета пигмента раньше, чем через 30 мин, действительная температура испытуемого образца будет выше указанной в технических условиях на пигмент; позже 30 мин — температура несколько ниже. Точность определения температуры образца с помощью термочувствительных пигментов составляет ± 5 °С. Многие пигменты не изменяют окраску при остывании, другие изменяют ее так медленно, что даже после остывания можно определить достигнутую температуру, однако в результате выравнивания температуры за счет теплопередачи в образце рисунок, образованный изотермическими линиями, может изменяться даже после того, как нагревание образца прекращено. Следовательно, для установления точных температур на образце его необходимо быстро охладить, т. е. зафиксировать расположение изотермических линий на образце.

Перед тем как нанести на изделие термочувствительные пигменты (термоиндикаторы), необходимо очистить его от грязи и масла и промыть спиртом. Пигменты наносят на изделие кистью или разбрызгивают с помощью пульверизатора. Специальные пигменты применяют для испытаний в атмосфере углекислого газа, водяного пара, сернистого газа, аммиака и сероводорода.

Термочувствительные пигменты используют для определения теплопроводности листовых материалов, обнаружения трещин в изделиях, оценки качества соединения стальных цилиндров с надетыми на них медными кольцами, выявления характера и интенсивности распространения теплоты в зоне, прилегающей к сварному шву, для контроля пористости металла отливок.

Для выявления дефектов изделие покрывают с одной стороны пигментом и равномерно подогревают с противоположной стороны. В бездефектной зоне цвет на окрашенной стороне изменяется быстрее, чем в зоне наличия дефекта. Наблюдая за временными интервалами, по истечении которых изменяется окраска, и оценивая равномерность этого изменения, выявляют дефекты в изделии, например, трещины.

Для контроля отливок пигмент наносят на одну сторону отливки, а противоположную сторону равномерно нагревают. При достижении определенной температуры поверхности цвет пигмента изменится; если в отливке имеется пористость, изменение цвета произойдет с опозданием.

Инфракрасная фотография применяется для установления распределения температур нагретых тел, температура которых не-

сколько ниже температуры красного свечения, таких, как остывающие слитки металла и отливки, печи, детали двигателей, котлы высокого давления и др.

Инфракрасная фотография принципиально не отличается от обычной фотографии. Однако инфракрасное излучение в результате большей, чем у видимого излучения, длины волн после прохождения многолинзовой оптической системы не фокусируется в той же плоскости, что и видимое излучение. Поэтому, чтобы скорректировать разницу фокусных расстояний для инфракрасного и видимого излучения, необходимо несколько увеличить расстояние от пленки до объектива. Нагретые испытуемые изделия фотографируют в темном помещении. Область инфракрасного излучения тела начинается от границ видимого спектра, и четкой грани между двумя видами излучения нет. Следовательно, по мере увеличения длины волн инфракрасное излучение переходит в тепловое излучение, а затем — в радиоволны. Область инфракрасного излучения имеет большую протяженность, но для фотографии представляет интерес лишь узкая зона вблизи красного света. Излучение испытуемого изделия может быть зафиксировано на фотопленке. Чувствительность пленки к инфракрасному излучению достигается обработкой эмульсии специальными красителями. Качество инфракрасных фотоснимков зависит в основном от правильного выбора экспозиции.

Приборы для определения дефектов. Один из таких приборов — детектор (яркостный пирометр) «Эктрон». Прибор чувствителен к инфракрасному излучению. Чувствительным элементом является тонкий слой сульфида свинца, напыленный на стекло. Рабочий диапазон длин волн этого прибора от 0,25 до 3,5 мкм. При пониженных температурах детектор имеет большую чувствительность. Сульфид свинца является фоточувствительным полупроводником. Фоточувствительные проводники (фотопроводники) отличаются различной проводимостью в темноте и на свету. Полупроводники проявляют различную чувствительность к излучению волн разной длины.

Мощность сигнала от контролируемого изделия может быть увеличена при использовании оптической системы, цель которой — сфокусировать падающие лучи на детекторе. Однако особое внимание следует обратить на выбор материала оптической системы (например, силикатное стекло применимо только для длин волн порядка 2,7 мкм, в то время как кварц можно использовать во всем волновом диапазоне инфракрасного излучения).

Измерение температуры изделия на расстоянии с помощью инфракрасной радиометрии основано на том, что спектральный состав излучения нагретого тела является хорошо известной функцией температуры тела, т. е. основная часть излучения нагретого тела имеет определенную длину волны, которая зависит от температуры. Длина волны, соответствующая максимуму излучаемой энергии, уменьшается с возрастанием температуры. Радио-

метр — прибор для измерения энергии электромагнитного излучения оптического диапазона, основанный на его тепловом действии. Этот прибор воспринимает излучение в пределах малого телесного угла и преобразует энергию излучения в электрический сигнал. Амплитуду электрического сигнала можно определить с большой точностью. Так как характеристики спектра излучения подчиняются основным законам лучеиспускания, то для данного источника можно проградуировать выходную мощность электрического сигнала по температуре и измерить температуру при отсутствии контакта.

Радиометр фокусирует инфракрасные лучи, испускаемые нагретым телом, на детекторе инфракрасного излучения. Оптическая система радиометра работает эффективно при всех длинах волн в инфракрасной области. Выходная мощность электрического сигнала детектора пропорциональна энергии падающего излучения также во всем диапазоне длин волн. Такие приборы, называемые инфракрасными радиометрами постоянного тока, измеряют изменение электрических параметров термоэлектрического или болометрического чувствительного элемента в зависимости от температуры горячего тела. Кроме того, существуют инфракрасные радиометры переменного тока, основанные на сравнении измеряемого уровня излучения со стандартным. По этой схеме измерения инфракрасный детектор попеременно воспринимает изображение источника и зачерненного прерывателя. Таким образом, выходной сигнал прибора пропорционален разности между уровнями излучения от источника и прерывателя. Выходной сигнал является электрическим сигналом переменного тока.

Для получения двухмерного изображения температурного поля испытуемого изделия применяют эвалпорографы (пирометры). Их действие основано на регистрации инфракрасного излучения объекта на фотопленке. Такие приборы фиксируют разность температур в точках испытуемой поверхности изделия, при этом не требуется контакт с изделием и вспомогательное освещение. В этом приборе применяется тонкая нитроцеллюлозная мембрана, при отражении от которой белый цвет разлагается на спектральные составляющие. Мембрана толщиной 0,1 мкм помещена в вакуумируемую камеру между оптической системой и зрительным окуляром (рис. 6.1). С помощью оптической системы инфракрасные лучи от испытуемого участка поверхности изделия создают изображение на мембране. Покрытие, нанесенное с одной стороны мембраны, поглощает излучение, при этом температура мембраны изменяется постепенно в зависимости от количества поглощенной энергии.

Это влечет за собой изменение толщины масляной пленки на другой стороне мембраны. Изменение толщины пленки на мембране приводит к тому, что при освещении мембраны внешним источником света создается цветное изотермическое изображение испытуемой поверхности.

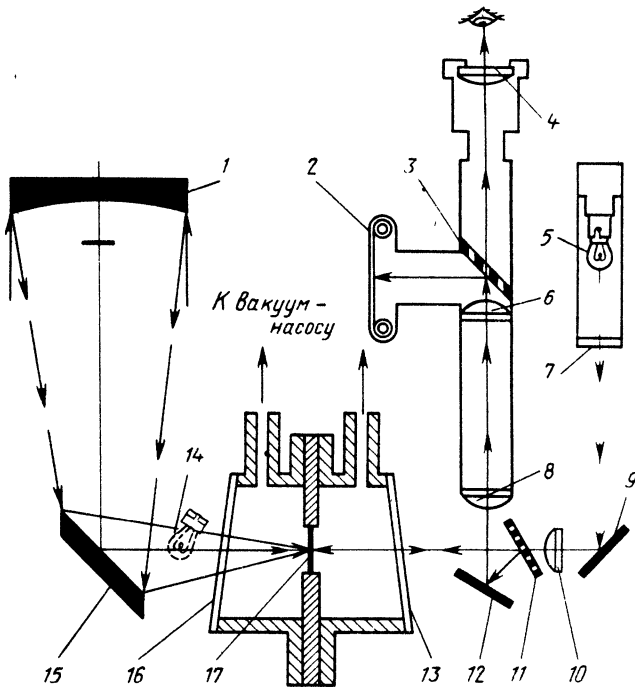


Рис. 6.1. Оптическая схема эвапорографа:

1 — фокусирующее зеркало; 2 — фотокамера; 3 — зеркало, отражающее 80 % световых лучей; 4 — окуляр; 5 — источник освещения; 6 — верхняя линза, фокусирующая изображение; 7 — теплопоглощающее зеркало; 8 — нижняя линза, фокусирующая изображение; 9 — первое преломляющее зеркало; 10 — линза; 11 — зеркало, отражающее 50 % световых лучей; 12 — второе преломляющее зеркало; 13 — окно из проводящего стекла; 14 — открытый источник света; 15 — преломляющее зеркало; 16 — окно из каменной соли; 17 — мембрана

Изотермическую картину, полученную при этом испытании, можно наблюдать визуально, а также зафиксировать на фотопленке. Для определения значений температур полученные результаты расшифровывают с помощью таблиц, разработанных на основе закона Стефана — Больцмана.

На рис. 6.2 показана камера эвапорографа. Окно 1 камеры изготовлено из каменной соли. Внутри камеры уложена пористая бумага 3, насыщенная маслом 2. Камера снабжена нагревательными спиралями 5. В центре камеры установлена мембрана 6. Окно 4 выполнено из проводящего стекла. Для измерения температуры используют также цветные, яркостные и радиационные пирометры.

Действие цветных пирометров основано на сравнении интенсивности излучения объекта в двух спектральных диапазонах. Оптическая система цветного пирометра содержит два цветных фильтра, через которые с помощью модулятора поток излучения от объекта попеременно направляется на фотоприемник. Серийно выпускаются цветные пирометры ЦЭП-3 с диапазоном измеряемых

температур 1400—2800 °С и «Инфрапир» для диапазона температур 0—100 °С.

Яркостные визуальные пирометры применяют для измерения температур выше 600 °С. Принцип их действия основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры. Серийно выпускают следующие пирометры: ОППИР-09, ОППИР-017, ОПК-57, МОП-48, ОМП-43, ЗОП-51М, ФЭП-4, ФЭП-8, ТОП-01, ИР-ПХ100 и др.

Радиационные пирометры основаны на использовании зависимости теплового излучения испытуемого объекта от его температуры. Их широко используют для измерения низких температур (20—100 °С). Приемниками излучения служат батареи, терморпары, болометры, пироэлектрические преобразователи.

Выпускаются радиационные пирометры: ПИРС-040, РАПИР с телескопом ТЕРА-201, РАПИР ТЕРА-201—50 и др.; диапазон измеряемых температур 20—500 °С.

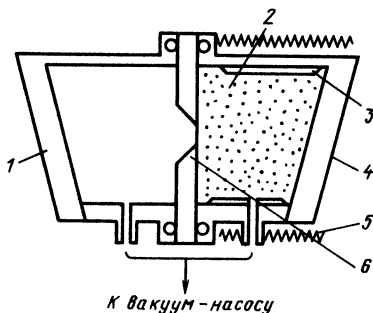


Рис. 6.2. Камера эвапорографа

6.4. Термический анализ фазовых превращений в металлах и сплавах

Простой термический метод. Структурные и фазовые превращения в металлах и сплавах приводят к изменению их физических свойств. При фазовых превращениях происходит выделение или поглощение скрытой теплоты превращения, а также наблюдается изменение теплоемкости металлов и сплавов. При изменении структуры металла или сплава, нагреваемого или охлаждаемого с постоянной скоростью, на кривых температура — время возможны резкие переходы или отклонения от плавной кривой. По этим кривым определяют температуру или температурный интервал превращения. Получение и расшифровка таких кривых известны как термический анализ. При термическом анализе испытуемый образец помещают в печь, имеющую зону равномерного нагрева протяженностью в несколько раз больше, чем длина образца. При необходимости установления не только температур превращений, но и температур плавления образец помещают в тигель соответствующей формы и объема. Затем печь плавно нагревают или охлаждают с постоянной скоростью, измеряют температуру t образца через установленные равные промежутки времени τ и строят график зависимости температуры от времени (рис. 6.3). Для измерения температуры используют радиационные пирометры с терморпарой (с открытым спаем). При испытании жидких сплавов терморпару защищают колпачком из огнеупорной кера-

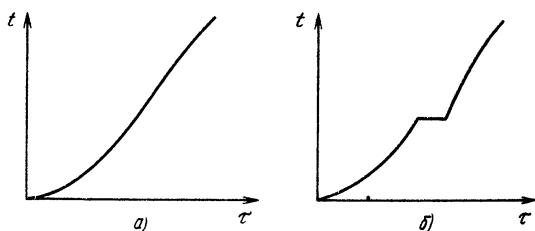


Рис. 6.3. Термические кривые:

а — нагрев образца до фазовых превращений; *б* — упрощенная термическая кривая

мики. Скорость нагрева или охлаждения должна быть такой, чтобы не было значительного температурного перепада по сечению образца. Обычно это скорость $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, при которой в образцах диаметром, например, 20 мм перепад температуры от периферий к центру составляет не более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$; при менее жестких требованиях к точности измерений можно использовать скорости нагрева $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Для определения температур используют образцы диаметром 20 мм и длиной 40—50 мм с цилиндрическими отверстиями для помещения термопары на глубину, равную примерно $\frac{2}{3}$ длины образца. Проволочки термопары изолируют с помощью двухканальной керамической трубки. Тип термопары зависит от диапазона исследуемых температур. Наиболее часто применяют термопары, изготовленные из проволоки диаметром 0,3—0,5 мм.

Для исследования процессов плавления или кристаллизации применяют тигли емкостью на 50—100 г металла. При меньшей емкости тигля введение в металл термопары с защитным колпачком вызывает значительное искажение температурных полей, при большей — одновременное затвердевание или плавление большого объема металла, что приводит к появлению дополнительных тепловых эффектов в результате теплообмена между слоями металла. Поэтому термические кривые в этом варианте не имеют плавного изменения на графике в конце реакции (плавления или затвердевания металла) и отклонение их от горизонтали во всем интервале превращения связано с тем, что скорость выделения или поглощения теплоты мала для компенсации тепловых потоков от внешних слоев образца или к этим слоям.

Метод обратных скоростей. Если вместо температуры и времени на кривых, полученных при простом термическом методе, отложить по соответствующим осям ординат производные этих параметров, то будут легко определены остановки (прямые участки) или изменения наклона кривых нагрева или охлаждения. Как известно, скорость нагрева или охлаждения при постоянном тепловом потоке определяется теплопроводностью испытуемого образца, следовательно, измерение указанной скорости как функции температуры позволяет построить термическую кривую.

Практически на графиках откладывают величину, примерно равную обратной величине скорости. Эти кривые называют кривыми скоростей. Для того чтобы построить такую кривую, измеряют время, необходимое для изменения температуры образца на одну и ту же небольшую величину (на \mathcal{E} или 5°C), при этом скорость нагрева образца должна оставаться постоянной. Это достигается с помощью стабилизации силы тока в нагревательных элементах печи. Метод обратных скоростей обеспечивает высокую точность определения параметров фазовых превращений металлов и сплавов. Графики, построенные в координатах время нагрева — температура, дают наглядное представление о небольших изменениях в кривизне термической кривой, связанных с неравномерностью нагрева, и о перегибах, обусловленных фазовыми превращениями. Точность установления температур превращения по кривым обратных скоростей ниже (рис. 6.4), чем по кривым время нагрева — температура, особенно при исследовании изотермических превращений. Однако метод обратных скоростей используют для анализа сложных неизотермических превращений, происходящих, например, при нагреве и охлаждении инструментальных углеродистых сталей.

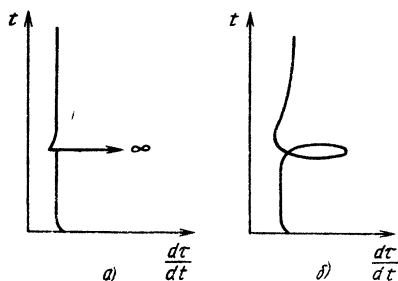


Рис. 6.4. Кривые обратных скоростей:

а — упрощенная; б — опытная

В некоторых случаях для упрощения анализа вначале строят идеальные кривые на основе опытных данных. Для этого используют табличные значения теплоемкости фаз, участвующих в данном превращении, а также полученные ранее экспериментальные кривые для изделия, аналогичного исследуемому. Расчетные кривые нагрева и охлаждения, которые получены по зависимости теплоемкости от температуры, несколько отличаются от экспериментальных.

При превращениях, происходящих в интервале температур, прямой участок или резкий переход (перегиб кривой) на опытных кривых охлаждения выражены более четко, чем на расчетных, так как всегда наблюдается более или менее значительное переохлаждение металла или сплава. На кривых нагрева температурный интервал превращений едва заметен, так как теплоемкость изменяется плавно, а не скачками, и сказывается влияние перегрева металла или сплава.

Дифференциальный термический метод базируется на измерении разности температур изделия и эталона. В качестве эталона применяют металлический образец, который не испытывает фазовых превращений в исследуемом интервале температур, а теплоемкость эталона близка к теплоемкости испытуемого изделия.

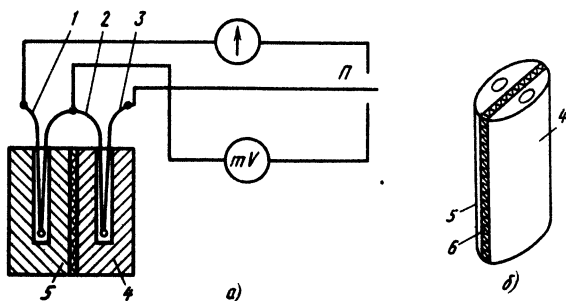


Рис. 6.5. Электрическая схема установки для дифференциального термического анализа (а) и соединение образца и эталона (б)

Для уменьшения теплообмена изделие и эталон, имеющие вид полуцилиндров, разделяют тонким листом слюды или асбеста. Для более сложных условий эксперимента эталон имеет форму полого толстостенного цилиндра, в котором с небольшим зазором устанавливается испытуемое изделие (образец). Это дает возможность максимально снизить теплообмен между образцом и эталоном.

Схема установки для дифференциального термического анализа приведена на рис. 6.5. Дифференциальная термопара установки состоит из двух одинаковых термопар 1—2 и 2—3, которые включены последовательно и навстречу, т. е. общая электродвижущая сила (ЭДС) равна нулю, при условии, что оба горячих спая находятся при одинаковой температуре. При всех других условиях указанная ЭДС пропорциональна разности температур и определяется с помощью гальванометра. На практике используют только относительную величину отклонения, поэтому не требуется точная настройка гальванометра. Для измерения температуры образца 4 применяют милливольтметр mV , который отградуирован вместе с термопарой 2—3. Для попеременного подключения термопары 2—3 к гальванометру или милливольтметру в схеме имеется переключатель П. Образец 4 и эталон 5 выполнены в виде полуцилиндров диаметром 20—30 мм и разделены листом 6 слюды толщиной 0,5—2,0 мм. В качестве термопар для исследования фазовых превращений в сплавах применяют никелевые или медные эталоны. В приведенной схеме не предусмотрено одновременное подключение к термопарам гальванометра и милливольтметра. При необходимости записи дифференциальной и обычной термической кривых следует ввести в образец дополнительную термопару для измерения только температуры. Хорошие результаты при этом методе наблюдаются, когда кривые нагрева и охлаждения и дифференциальные термические кривые строят на одном и том же графике. Это дает возможность наглядно сравнить простой метод с дифференциальным методом.

Графики, построенные по результатам испытания образца на установке для дифференциального термического анализа (рис. 6.6),

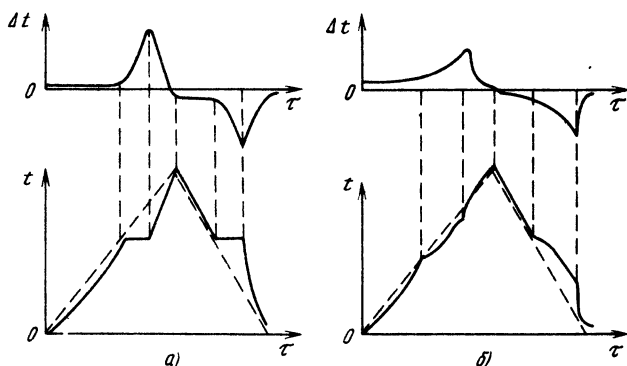


Рис. 6.6. Простые и дифференциальные термические кривые:
 а — изотермическое превращение; б — превращение в температурном интервале

показывают, что резкое изменение наклона дифференциальной кривой соответствует начальному положению превращения, а пик — завершению этого превращения. Дифференциальные кривые нагрева и охлаждения металла или сплава отличаются по форме. Это особенно заметно для превращений, происходящих в интервале температур.

6.5. Термический анализ при высоких температурах

Установки для термического анализа при высоких температурах. При исследовании фазовых равновесий в тугоплавких сплавах необходимо разработать методику дифференциального термического анализа при температурах выше 1500 °С. При таких высоких температурах возникают трудности с измерением температуры образца. Измерительные элементы высокотемпературных пирометров включают в себя в качестве датчиков температуры термометры сопротивления или специальные высокотемпературные термопары.

Для анализа фазовых превращений металлов и сплавов при высоких температурах используют термостаты. Термостат для термического анализа металлов и сплавов (рис. 6.7) имеет вольфрамовый или молибденовый блок 5, используемый в качестве эталона. Он крепится на керамической трубке 8, через которую проходят выводы термопар 1 и 6. Цилиндрический образец 2 диаметром 5—7 мм, длиной 2—5 мм и массой 0,5—2,5 г устанавливают в цилиндрический тигель 3 с толщиной стенки 0,8—1,0 мм и толщиной дна 0,5 мм. Тигель 3 устанавливают на электродах термопары 6 и накрывают его крышкой 4. Для отделения термопары 1 от термопары 6 служит керамическая прокладка 7 толщиной 1,5 мм.

Горячий спай термопары установлен в центре прокладки 7, а вольфрамовые и иридиевые электроды U-образной формы выведены через отверстия в прокладке 7. Диаметр проводов термопары

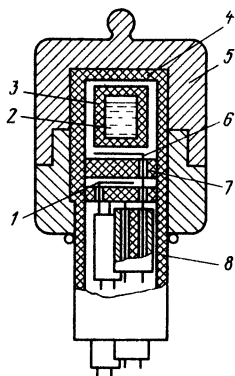


Рис. 6.7. Термостат для термического анализа при высоких температурах

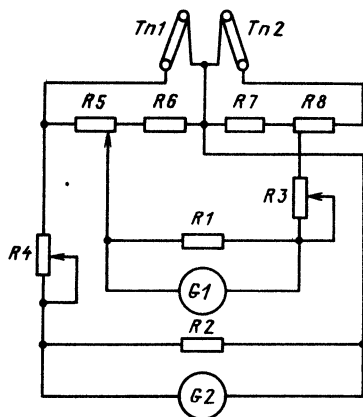


Рис. 6.8. Принципиальная электрическая схема установки для термического анализа металлов и сплавов при высоких температурах

должен быть 0,1—0,2 мм, что позволяет снизить теплоотдачу датчиков. Верхняя $Tn1$ и нижняя $Tn2$ термопары измеряют температуру блока — эталона 5 и образца 2 (см. рис. 6.7) и составляют дифференциальную термопару, которую подсоединяют к гальванометру $G1$ (рис. 6.8). Второй гальванометр $G2$ фиксирует отклонение температуры пропорционально температуре образца 2. Чувствительность прибора регулируется с помощью постоянных резисторов $R1$ и $R2$, а также переменных резисторов $R3$ и $R4$. Цепь резисторов $R5, R6, R7, R8$ необходима для того, чтобы ЭДС термопары поступала в цепь гальванометра дифференциальной термопары. При первом нагреве до температуры плавления образец не касается стенок тигля. Поверхность контакта между образцом 2 и тиглем 3 небольшая, а скорость диффузии металла (сплава) в твердом состоянии низка и, следовательно, кривая первого нагрева образца может рассматриваться как истинная характеристика чистого металла, не содержащего загрязнений.

При работе установки в атмосфере очищенного аргона вольфрамирнидиевые термопары хорошо работают при температуре 2000 °С.

Для испытаний по термическому анализу при высоких температурах применяют специальные нагревательные печи. Такая печь (рис. 6.9) содержит вольфрамовый нагреватель 1, установленный вокруг блока 2, внутри которого установлен образец. Нагреватель 1 присоединен к водоохлаждаемым медным силовым вводам. Для создания условий равномерного и однородного нагрева в печи применяют радиационные экраны: экраны 3 и 4 — керамические, экран 5 — из молибденовой жести, экран 6 — из коррозионно-стойкой стали. Печь закрывается стальным водоохлаждаемым

колпаком 7, уплотненным резиновой прокладкой. Для поддержания определенного температурного режима при нагреве или охлаждении образца печь снабжена устройством для охлаждения образца, которое в процессе работы печи наполняется водой или опорожняется с определенной скоростью.

Термопары для измерений при высоких температурах. Выпускаются термопары со стандартными и нестандартными градуировками: 1) хромель-алюмелевые (ТХА) термопары с верхним пределом измерения температур 1000 °С; 2) платинородий-платинородиевые (ТПР) термопары с верхним пределом измерения температур 1600 °С; 3) платинородий — платиновые термопары (ТПП) с верхним пределом измерения температур 1300 °С. Для изготовле-

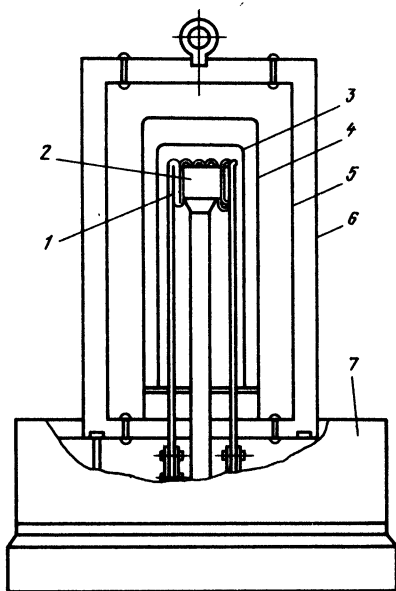


Рис. 6.9. Печь для термического анализа при высоких температурах

ния термопар применяют вольфрам, платину, молибден, родий, иридий, рений, тантал, ниобий, цирконий и их сплавы. При подборе термопар для высокотемпературных измерений необходимо учитывать химическую активность сплава термопар с рабочей средой. Термопары на основе платины безотказно работают в нейтральной и окислительной средах при нормальном и высоком давлениях и выходят из строя из-за возгонки в вакууме и в восстановительных атмосферах. Термопары на основе молибдена и вольфрама хорошо работают в нейтральных и некоторых восстановительных атмосферах, а также в вакууме, но выходят из строя при работе в окислительной среде.

6.6. Термический анализ при высоких скоростях нагрева и охлаждения

Датчики для измерения температуры. Термический анализ при быстром нагреве или охлаждении металлов и сплавов применяют для определения критических точек и температурных интервалов превращений, которые происходят при термической обработке сталей и сплавов. Эти данные необходимы для установления режимов нагрева токами высокой частоты, для построения термодинамических диаграмм, изучения процессов закалки и др. Точность измерения температуры в этих условиях зависит от чувстви-

тельности и инерционности двух основных элементов измерительного устройства — датчиков температуры и регистрирующего прибора температуры.

Для термического анализа при быстром нагреве или охлаждении используют термопары, горячий спай которых механически соединен с образцом. Точность измерения температуры зависит от диаметра проволочек термопары и способа крепления горячего спаива на поверхности образца. Существует несколько вариантов крепления термопары: а) приварка к образцу; б) зачеканка в отверстии образца; в) крепление с помощью проволоки.

Наиболее эффективный способ — приварка термопары к образцу с помощью регулируемого источника переменного тока (напряжением 10—15 В и силой тока 10 А) и медного сварочного электрода. Проволочки термопары приваривают к образцу раздельно. При такой приварке образец становится как бы частью горячего спаива.

Если материал образца введен в цепь термопары, измеряемая температура не изменяется, так как в сложной термопаре суммарная ЭДС определяется относительной ЭДС двух крайних проволочек. Приварку проволочек к образцу производят так, чтобы исключить перенос материала сварочного электрода в сварную точку (сила тока при сварке должна быть не более 10 А). В некоторых случаях образец можно охлаждать, особенно если исследуется превращение в сплавах с нестабильными структурами. Проволочки термопары должны быть тонкими, чтобы не изменилось температурное поле образца вблизи точки приварки. Установлено, что при применении проволочек диаметром 0,08—0,12 мм получают точность измерения температуры $\pm 10^\circ\text{C}$ при скоростях нагрева металла (сплава) образца до 10 000 $^\circ\text{C}$. При нагреве образца прямым пропусканием через него электрического тока точки приварки термопары обычно располагают в плоскости, перпендикулярной оси цилиндрического образца, чтобы уменьшить помехи. Расстояние между точками приварки термопары к образцу 0,2—0,3 мм. Для обеспечения высокой точности приварку термопары к образцу производят под бинокулярным микроскопом с небольшим увеличением.

При быстром нагреве металла (сплава) для измерения температур превращений используют, кроме термопар, также фотоэлектрические пирометры. К ним относится пирометр, выполненный на базе малоинерционного фоторезистора, который изготовлен из сульфида свинца, чувствительного к инфракрасным лучам. Пирометр позволяет измерять температуру от 100 $^\circ\text{C}$. Излучение от поверхности нагретого образца попадает на фоторезистор через отверстие диаметром 1 мм. Преимущества фотоэлектрического способа измерения температуры — малая инерция датчика и отсутствие его контакта с образцом, температуру которого измеряют. К недостаткам фотоэлектрического метода относится сравнительно низкая стабильность измерения температуры (различная

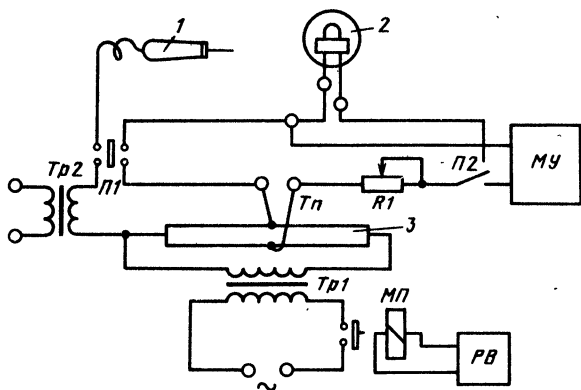


Рис. 6.10. Электрическая схема устройства для термического анализа при скоростном нагреве образца:

1 — сварочный электрод; 2 — шлейф; 3 — образец; МП — магнитный пускатель; Тп — термопара; МУ — мост Уинчестона; РВ — реле времени

точность показаний в зависимости от температуры образца) и нелинейность шкалы прибора, что ограничивает использование фотоэлектрических пирометров для термического анализа при быстром нагреве.

Контроль сопротивления термопары. Физической основой измерения температуры с помощью термопары является эффект взаимодействия тепловых и электрических процессов в металлических материалах. После соединения двух металлических проводников в один замкнутый контур появляется разность температур, что приводит к созданию термонапряжения (термоэлектродвижущая сила — термоЭДС). Магнитоэлектрический осциллограф предназначен для измерения силы тока. Как известно, сила тока определяется термоэлектродвижущей силой и полным сопротивлением цепи термопары. Следовательно, для получения воспроизводимых результатов сопротивление термопары необходимо поддерживать постоянным. Максимальная чувствительность шлейфа 35—55 мм/мА при длине световой стрелки 100 см, при этом максимальная сила тока 1,5—2,0 мА. Внутреннее сопротивление шлейфа равно примерно 14 Ом. Такие характеристики ограничивают максимальное сопротивление термопар.

Для уменьшения сопротивления термопары используют высококачественный переменный резистор, который позволяет после приварки термопары создать первоначальное сопротивление в цепи прибора. Контроль указанного сопротивления осуществляется с помощью электрического моста, выполненного в устройстве для термического анализа при быстром нагреве образца. Схема устройства приведена на рис. 6.10. Образец в этом устройстве нагревается при пропускании через него электрического тока от понижающего трансформатора Тр1. Время нагрева образца фиксируется по реле

времени, соединенному в трансформатором через магнитный пускатель. Термопару приваривают электродом, подсоединенным к трансформатору *Tr2*. Во избежание повреждения гальванометра в случае повышения силы тока при приварке термопары к образцу устройство снабжено переключателем *П1*. Сопротивление цепи термопары регулируется резистором *R1* и измеряется мостом Уитстона.

Приборы для регистрации температуры. Для регистрации температуры при быстром нагреве или охлаждении образца применяют автоматические самопишущие потенциометры, осциллокопы и светолучевые осциллографы.

Потенциометры даже с минимальным временем пробега каретки, равным 0,05 с, не дают качественной записи температуры нагрева образца, если скорость нагрева превышает 20—50 °С/с.

Для термического анализа металлов и сплавов используют магнитоэлектрические светолучевые осциллографы, так как они позволяют записывать кроме термической кривой еще другие зависимости термического анализа различных сталей и сплавов. В светолучевом осциллографе основной элемент — малоинерционный зеркальный гальванометр (называемый шлейфом или вибратором). Чувствительным элементом шлейфа является рамка, выполненная из очень тонкой проволоки и подвешенная с помощью пружинок в зазоре мощного постоянного магнита. В рамке укреплено небольшое зеркало, размеры которого изменяются в зависимости от чувствительности шлейфа и интенсивности светового луча. В корпусе шлейфа установлена небольшая линза для фокусировки лучей, отражаемых зеркалом. Все устройство установлено в пластмассовый корпус, заполненный прозрачным маслом. При прохождении тока через петлю последняя поворачивается относительно магнитного поля и зеркало отклоняет световой луч. Угол отклонения и перемещение светового луча вдоль экрана пропорциональны силе тока. Чувствительность шлейфа зависит от напряженности магнитного поля в зазоре, натяжения пружины, расстояния между проволочками рамки и может изменяться от 10 до 150 мм/мА.

Для качественного выполнения термического анализа металлов и сплавов одновременно записывают несколько параметров (удлинение образца, силу тока, пропускаемого через образец, напряжение).

Применяют многшлейфовые осциллографы: восьмишлейфовый осциллограф МПО-2; девятишлейфовый осциллограф 9-СО-302; двенадцатишлейфовый осциллограф К105 и др. Поскольку в используемых термопарах при измерении температур появляется сравнительно малая ЭДС, то обычно применяют гальванометры (шлейфы) с максимальной чувствительностью, например, типов У, УШ, М1012-600 и М1012-300.

6.7. Калориметрический анализ

Определение теплоемкости. Для того чтобы вызвать небольшое изменение температуры испытуемого образца из металла или сплава, необходимо передать от образца теплоту, т. е. понизить его энтальпию. Энтальпию образца можно определить методом смешивания или по теплоемкости, которая зависит от количества теплоты, переданной образцом какой-либо среде.

Определение энтальпии методом смешивания заключается в точном измерении повышения температуры сосуда и среды в нем в тот момент, когда в этот сосуд помещают нагретый образец. При помещении нагретого образца непосредственно в калориметрическую жидкость (вода, анилин, парафиновое масло и др.) возможны ошибки в измерении из-за разбрызгивания жидкости и образования пара в сосуде. Точность измерения снижается при повышении температуры нагрева образца. Чтобы исключить ошибки при измерении, нагретый образец помещают не в жидкость, а в металлический сосуд, помещенный в жидкость, но в таком случае период теплообмена увеличивается. Для ликвидации парообразования калориметрической жидкости применяют ледяные калориметры. В таком калориметре теплота образца вызывает плавление льда и количество расплавленного льда определяют по уменьшению объема смеси воды и льда. Калориметры работают в адиабатических условиях, и время теплообмена образца и среды практически не влияет на результаты измерений.

Метод смешивания дает хорошие результаты только в случае отсутствия превращений в образце в исследуемом интервале температур. В случае, когда закалка стали не влияет на характер превращения и при быстром охлаждении достигается равновесная структура, этот метод пригоден даже при наличии превращений в стали. Если закалка приводит к возникновению неравновесной структуры, энтальпию определяют по результатам измерения теплоемкости.

Теплоемкость измеряют по изменению температуры образца, получившего или отдавшего определенное количество теплоты. Прямой метод определения теплоемкости — это метод, при котором теплота Q переходит от нагретого образца к рабочей жидкости калориметра. Средняя удельная теплоемкость c в этом методе

$$c = \frac{Q}{m(t - t_{\text{н}})}, \quad (6.1)$$

где m — масса образца; t и $t_{\text{н}}$ — температура образца перед помещением в калориметр и конечная температура в калориметре.

Такой метод используют при сравнительно невысоких температурах (ниже точки кипения рабочей среды: вода, ртуть, сплав Вуда и др.).

Метод обратной калориметрии сводится к тому, что холодный образец помещают в среду с высокой температурой. Метод приго-

ден для исследования закаленной стали после отпуска (по скрытой теплоте закалки образца при нагревании в калориметре), рекристаллизации наклепанного металла и др.

Средняя удельная теплоемкость

$$c = \frac{Q}{m(t_k - t)} \quad (6.2)$$

Для определения теплоемкости образцов при низких и средних температурах применяют метод электрического нагрева образца. В этом случае образец помещают в спираль сопротивлением R , нагреваемую при пропускании электрического тока I в течение времени τ . Затем образец массой m нагревают от t_1 до t_2 . Без учета тепловых потерь в окружающую среду среднюю удельную теплоемкость образца определяют по формуле

$$c = \frac{I^2 R \tau}{m(t_2 - t_1)} \quad (6.3)$$

Указанный метод позволяет с большой точностью определить истинную теплоемкость, если количество теплоты, переданное образцу, и повышение его температуры сравнительно малы.

Истинная удельная теплоемкость c_p при определенной температуре

$$c_p = \frac{dQ}{mdt}, \quad (6.4)$$

где dQ — предел приращения энтальпии; dt — приращение температуры.

Модели калориметров и их применение. Для определения теплоемкости металлов и сплавов используют следующие калориметры: 1) калориметр конструкции Сайкса; 2) калориметр конструкции Смита; 3) дифференциальные калориметры.

Калориметр конструкции Сайкса применяется для изучения тепловых процессов при отпуске закаленных сталей. Эта установка снабжена автоматическим многоточечным потенциометром и электронным терморегулятором (рис. 6.11).

В этой установке образец 10 в виде полого закрытого цилиндра устанавливают в толстостенный цилиндрический медный блок 11, закрытый с обоих концов. Образец 10 термически изолирован от блока 11 и закреплен короткими заостренными кварцевыми стержнями. Блок 11 с образцом 10 устанавливают в кварцевую трубу, в которой создается вакуум. Затем образец 10 нагревают в печи 12. Нагреватель 9 устанавливают внутри образца 10. Изменяя силу тока и падение напряжения в нагревателе 9, определяют мощность, необходимую для повышения его температуры. Силу тока и напряжение измеряют с помощью калиброванных резисторов 1, 2 и 3. После выпрямления ток поступает на многоточечный потенциометр 4. Одна термопара измеряет температуру t_6 блока 11, другая — температуру t_0 образца 10. Дифференциальной термопарой определяют разность температур образца 10 и блока 11,

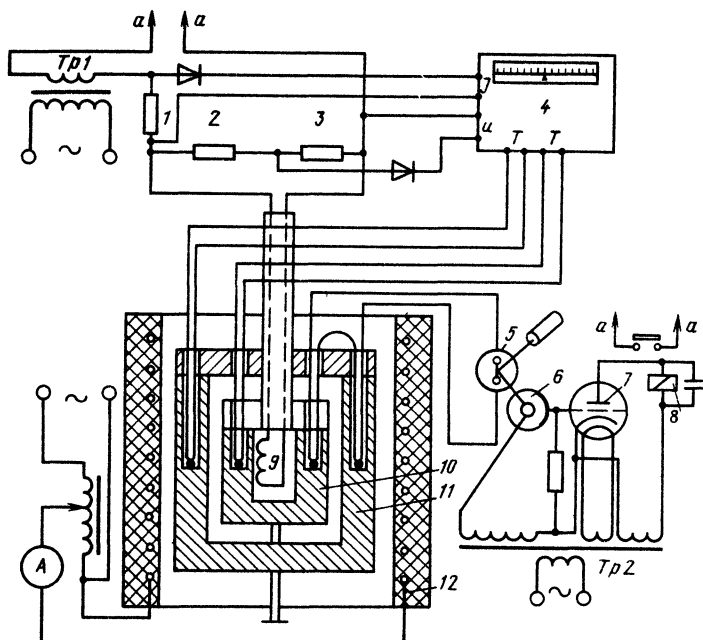


Рис. 6.11. Калориметр конструкции Сайкса

т. е. $t_6 - t_0$. При испытании блок 11 нагревают со скоростью $1^\circ\text{C}/\text{мин}$. При отключении нагревателя 9 температура образца 10 ниже температуры блока 11, а при включении нагревателя 9 образец нагревается быстрее в печи 12. Включением и отключением нагревателя 9 можно изменять разность $t_6 - t_0$ от некоторого небольшого положительного значения до такого же отрицательного. Для включения и отключения нагревателя 9 применяется фотоэлектрический терморегулятор. Напряжение, возникающее на дифференциальной термопаре в результате нагрева образца 10 и блока 11, вызывает отклонение стрелки зеркального гальванометра 5.

Когда $t_6 - t_0 = 0$, нагреватель 9 включен. При $t_6 - t_0 < 0$ световой луч, отраженный зеркалом гальванометра, попадает на фотоэлемент 6, электрический ток в лампе 7 уменьшается и реле 8 выключает нагреватель 9. Если $t_6 - t_0 = 0$, теплообмен между образцом 10 и блоком 11 не происходит, т. е. скорость нагрева образца 10 в этот момент определяется количеством теплоты, полученной от нагревателя 9. В этом случае теплоемкость можно вычислить по формуле

$$c_p = \frac{qI \Delta U}{m \left(\frac{dt_0}{d\tau} \right)}, \quad (6.5)$$

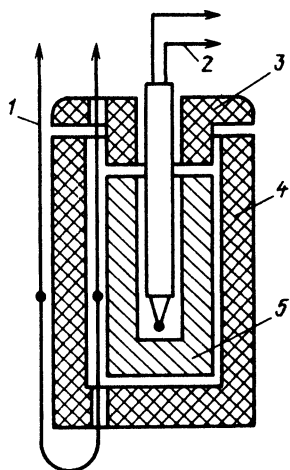


Рис. 6.12. Калориметр Смита

где q — тепловой эквивалент работы; I — сила тока; ΔU — падение напряжения на нагревателе g ; m — масса образца; $dt/d\tau$ — скорость изменения температуры образца.

Определяют температуры t_0 и $t_0 - t_0$ (t_0 определяют с помощью калиброванного зеркального гальванометра). Тогда

$$\frac{dt_0}{d\tau} = \frac{dt_0}{d\tau} - \frac{d(t_0 - t_0)}{d\tau}. \quad (6.6)$$

Метод Сайкеа был усовершенствован Смитом. По методу Смита проводят термический анализ, определяют теплоемкость и скрытую теплоту превращения. На рис. 6.12 показан основной узел калориметра. Образец 5 помещают в теплоизоляционный керамический стакан 4 , установленный в центре тручатой печи (на рисунке не показана). Стакан 4 закрыт огнеупорной крышкой 3 . В образец 5 вставлены термопара 2 для измерения его температуры и вторая термопара 1 для определения температурного градиента δt в стенке стакана 4 . Сущность метода заключается в том, что в процессе испытаний δt остается постоянным. При условии, что теплопроводность стакана 4 постоянна, тепловой поток ΔH , проходящий через стенку стакана 4 и переходящий на образец 5 , также будет постоянным. При постоянных ΔH или δt устанавливается стационарное состояние, при котором пустой стакан вначале нагревается на Δt_c в течение $\Delta \tau_c$, а количество теплоты, затраченное на повышение температуры на Δt_c , составляет

$$\Delta H \Delta \tau_c = \Delta t_c c_c m_c, \quad (6.7)$$

где c_c и m_c — теплоемкость и масса стакана 4 .

Тогда

$$\Delta H = \frac{\Delta t_c c_c m_c}{\Delta \tau_c}, \quad (6.8)$$

где $\frac{\Delta t_c}{\Delta \tau_c}$ — скорость нагрева стакана 4 от температуры t до $t + \Delta t_c$.

При помещении образца 5 в стакан 4 для поддержания постоянного значения ΔH необходимо прогревать стакан 4 с образцом 5 с другой скоростью, т. е. Δt_0 и $\Delta \tau_0$ должны отличаться от Δt_c и $\Delta \tau_c$. В таком случае зависимость (6.8) будет иметь вид

$$\Delta H = \frac{\Delta t_0}{\Delta \tau_0} (c_0 m_0 + c_c m_c), \quad (6.9)$$

где c_0 и m_0 — теплоемкость и масса образца.

Чтобы определить теплоемкость образца c_0 , необходимо знать теплоемкость c_c и массу m_c стакана 4. Произведение $c_c m_c$ определяют опытным путем совместно с эталоном, теплоемкость которого заранее определена. Тогда зависимость (6.9) можно представить

$$\Delta H = \frac{\Delta t_э}{\Delta \tau_э} (c_0 m_0 + c_э m_э), \quad (6.10)$$

где $\frac{\Delta t_э}{\Delta \tau_э}$ — скорость нагрева эталона от температуры t до $t + \Delta t$; $c_э$ и $m_э$ — теплоемкость и масса эталона.

При совместном решении зависимостей (6.8), (6.9) и (6.10) с исключением ΔH и $c_0 m_0$ получим

$$c_0 = \frac{(c_э m_э) \left(\frac{\Delta \tau_0}{\Delta t_0} - \frac{\Delta \tau_c}{\Delta t_c} \right)}{\left(\frac{\Delta \tau_э}{\Delta t_э} - \frac{\Delta \tau_c}{\Delta t_c} \right) m_0}. \quad (6.11)$$

Измерив скорости нагрева пустого стакана, стакана с образцом и стакана с эталоном при заданном температурном градиенте на стенке стакана, можно определить теплоемкость образца при известном значении теплоемкости эталона.

По зависимости (6.11) можно также определить скрытую теплоту превращения в этом калориметре, если зависимость (6.11) представить в виде

$$\Delta H = \frac{c_0 m_0}{\frac{\Delta \tau_0}{\Delta t_0} - \frac{\Delta \tau_c}{\Delta t_c}}. \quad (6.12)$$

Определив ΔH при температуре превращения и используя зависимость

$$L \cdot m_0 = \Delta H \Delta \tau, \quad (6.13)$$

найдем скрытую теплоту превращения L и продолжительность превращения $\Delta \tau$ при постоянной температуре.

Точность измерения методом Смита ниже, чем при использовании более сложных методов, так как метод основан на сравнении образца с эталоном. При близких значениях теплоемкости образца и эталона результаты испытаний получаются хорошими.

Дифференциальные калориметры используют для определения теплоемкости в моменты отдыха и рекристаллизации металла при нагреве пластически деформированных металлов и при фазовых превращениях в металлах и сплавах. В этих процессах тепловой эффект незначителен, он не превышает 4—12 кДж/кг, поэтому измерять теплоемкость образцов описанными выше методами затруднительно.

Испытуемый образец и эталон (отожженный образец из того же металла, что и эталон) нагревают одновременно в калориметрической коробке дифференциального калориметра. В полости эталона и образца помещают одинаковые микропечи, соединенные

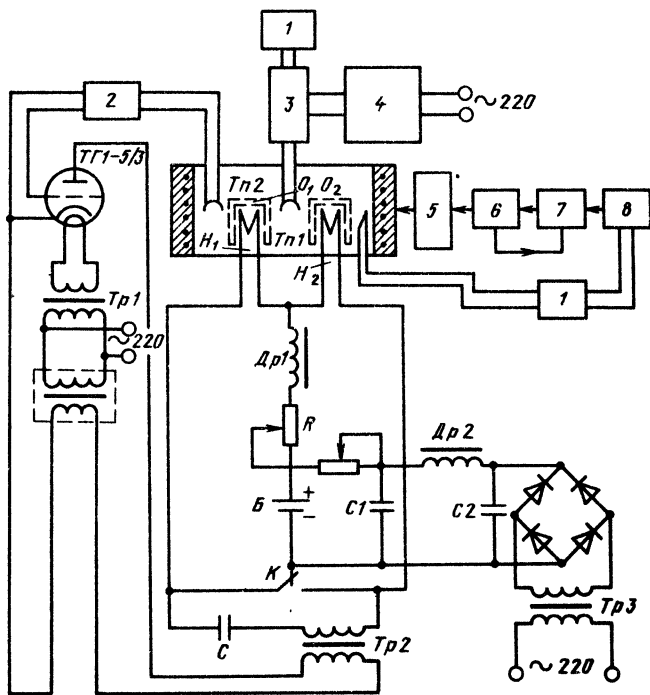


Рис. 6.13. Электрическая схема дифференциального калориметра:

1 — потенциометр; 2 — фотоэлектрический усилитель; 3 — магнитный усилитель; 4 — стабилизатор; 5 — регулятор напряжения; 6 — исполнительный механизм; 7, 8 — регулирующие устройства

последовательно и питаемые переменным током. Микропечи обеспечивают дополнительный подогрев образца и эталона, чтобы разность температур между ними и калориметрической коробкой равнялась нулю. Разность температур между образцом O_1 и калориметрической коробкой измеряется и регулируется дифференциальной термопарой $Tn2$. Теплообмен между ними должен отсутствовать, однако при непрерывном нагреве между образцом и эталоном появляется небольшая разность температур, которая характеризует количественно температурную зависимость происходящих при этом процессов. Для повышения точности измерений в основную цепь микропечей H_1 и H_2 (рис. 6.13) установлена вспомогательная цепь постоянного тока с питанием от аккумуляторной батареи B . С помощью конденсатора C и дросселя $Др1$ цепи разделяют. Сила постоянного тока в цепи регулируется переменным резистором R . Переключатель K подсоединяет вспомогательную цепь к одной из микропечей для дополнительного нагрева образца.

В этой схеме разность температур измеряется по двум вариантам:

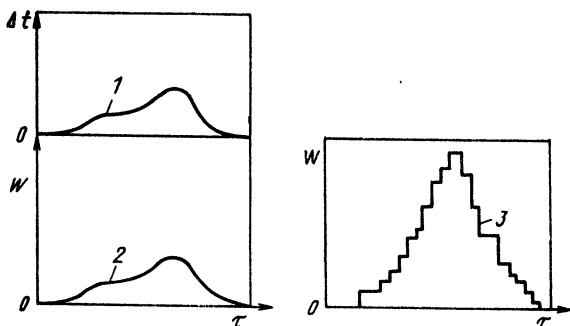


Рис. 6.14. Кривые тепловых потоков:

1 — первоначальная; 2 — при повторном нагреве; 3 — при равновесии температур образца и эталона, равной нулю

1. Разность температур деформированного или закаленного образца O_1 и отожженного образца O_2 измеряется дифференциальной термопарой $Tn1$ и поддерживается равной нулю в ходе основного и повторного контрольных нагревов. Тепловой поток W находится в прямой зависимости от силы постоянного тока, необходимой для дополнительного нагрева отожженного образца O_2 и поддержания минимальной разности температур между образцами O_1 и O_2 . Такой способ считается наиболее надежным для установления суммарного теплового эффекта в первую очередь при изотермических процессах, когда температура образцов остается постоянной и теплообмен между ними практически отсутствует.

2. Первый этап измерения проводят по схеме дифференциального термического анализа, в этом случае вместо гальванометра к дифференциальной термопаре подключают потенциометр, измеряющий разность температур, которая появляется в результате тепловых эффектов превращения. Тепловой поток определяют в ходе второго этапа измерения. Наиболее подходящим является метод, при котором в ходе повторного нагрева воспроизводят первоначальную кривую разности температур за счет дополнительного нагрева постоянным током образца O_1 . Тепловой поток W в этом случае соответствует величине израсходованного постоянного тока (рис. 6.14). Главным условием для точного измерения тепловых эффектов в процессе непрерывного нагрева является также соблюдение постоянной скорости нагрева в течение всего испытания, для чего используют программные термические регуляторы.

6.8. Дилатометрический метод

Методы измерения плотности металлов и сплавов. Дилатометрический метод базируется на измерении изменений плотности или удельного объема металлов и сплавов.

Плотность ρ металла — масса единицы объема:

$$\rho = m/V, \quad (6.14)$$

где m — масса образца; V — объем образца.

Удельный объем V_0 представляет собой объем единицы массы вещества, т. е. это величина, обратная плотности:

$$V_0 = 1/\rho. \quad (6.15)$$

Следовательно, измерение плотности или удельного объема состоит в установлении массы и объема испытуемого образца. Массу образца определяют на аналитических весах, а объем образца гидростатическим или пикнометрическим методами. Пикнометрический метод состоит в определении объема жидкости, вытесненной при погружении в нее образца. Точность измерения 1 %.

Более точные результаты измерения получают методом гидростатического взвешивания, при котором масса образца определяется дважды, т. е. на воздухе и при погружении образца в жидкость с известной плотностью $\rho_{ж}$.

Объем образца тогда определяют

$$V = \frac{m_0 - m_{ж}}{\rho_{ж}}, \quad (6.16)$$

где m_0 — масса образца в воздухе; $m_{ж}$ — масса образца в жидкости.

Плотность вычисляют

$$\rho = \frac{m_0}{m_0 - m_{ж}} \rho_{ж}. \quad (6.17)$$

Учитывая, что плотность воздуха $\rho_{в}$,

$$\rho = \frac{m_0}{m_0 - m_{ж}} (\rho_{ж} - \rho_{в}) + \rho_{в}. \quad (6.18)$$

Плотность воздуха при 20 °С равна $\rho_{в} = 1,2$ кг/м³.

При испытании образец подвешивают на тонкой вольфрамовой нити диаметром 10—20 мкм. Массу нити необходимо учитывать при измерении плотности образца.

Плотность образцов из металлов и сплавов определяют следующим образом.

В качестве примера определим плотность образца из инструментальной быстрорежущей стали методом гидростатического взвешивания (МГВ), а также пикнометрическим методом для контроля МГВ.

Определение плотности методом гидростатического взвешивания заключается во взвешивании образца на воздухе и при погружении его в воду, а также в расчете плотности исследуемого образца в соответствии с законом Архимеда. Применяют образцы произвольной формы с гладкой поверхностью.

Для измерений используют аналитические весы с точностью измерения $\pm 0,0001$ г. Перед каждым взвешиванием необходимо проверить нулевую точку весов или уравновесить массу корзинки, в которую помещают образец.

Оснастка для проведения МГВ состоит из корзинки 1 и сосуда 2 с жидкостью (рис. 6.15). Корзинка выполнена из металли-

ческого прутка диаметром 0,25 мм. Сосуд может быть любого размера и формы, но образец должен свободно погружаться на глубину не менее 10 мм от поверхности жидкости. Обычно используют стеклянные сосуды.

Для измерения плотности применяют дистиллированную воду с температурой 12—22 °С с добавлением 1—2 капель поверхностного натяжения жидкости (например, триэаноламина), что защищает образцы от оседания на них пузырьков воздуха.

Пробы (образцы) берут из любой части изделия. Рекомендуется использовать образцы объемом больше 0,5 см³, а массой — меньше 50 г, очищенные от окалины и случайных загрязнений наждачной бумагой. Образцы также промывают и обезжиривают. Во время взвешивания образец и вода, в которую его погружают, должны иметь комнатную температуру.

Плотность исследуемого материала рассчитывают по формуле

$$\rho = \frac{m}{m - m_w} \rho_w, \quad (6.19)$$

где m — масса образца, взвешенного на воздухе, г; m_w — масса образца, взвешенного в дистиллированной воде, г; ρ_w — плотность дистиллированной воды выбирают по следующим данным:

Температура воды, °С	17	18	19	20	21	22
Плотность воды						
ρ_w , г/см ³	0,9988	0,9986	0,9984	0,9982	0,9980	0,9972

Плотность образцов из металлов и сплавов рассчитывают с точностью до 0,001 г/см³. Допустимая разность результатов двух последовательных измерений должна быть не более 0,005 г/см³. В случае большей разности определение плотности образца следует повторить. За результат определения плотности принимают среднее арифметическое двух последовательных измерений с точностью до 0,01 г/см³.

Пикнометрический метод определения плотности. Плотность определяют по отношению массы к объему образца, причем объем образца определяют с учетом того, что масса воды в объеме образца равна массе воды, вытесненной образцом при помещении его в пикнометр.

Метод используют в случаях, когда материалом для испытания является стружка или мелкие кусочки, что не позволяет поместить образцы в корзинке, или когда одна из поверхностей об-

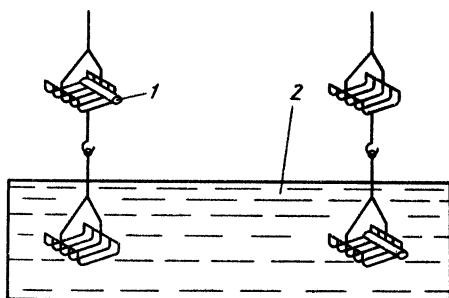


Рис. 6.15. Схема взвешивания образца

разца имеет излом. Образец может быть в виде порошка или стружки. Пикнометрический метод является вспомогательным методом и применяется в случае, если невозможно применение метода гидростатического взвешивания.

Для измерения плотности образца применяют аналитические весы с точностью измерения до $\pm 0,0001$ г.

Для измерения плотности необходимо иметь пикнометр, вакуум-эксикатор, вакуумный насос, дистиллированную воду для заполнения пикнометра.

Пикнометр имеет объем от 15 до 25 см³ и такую ширину шейки в наиболее узком месте, чтобы через нее свободно проходила навеска. Рекомендуются пикнометры объемом 20 см³ и диаметром шейки в наиболее узком месте 7 мм.

Необходимо провести по крайней мере два определения. Образец массой 5—10 г должен быть очищен от загрязнений, ржавчины и окислы и обезжирен. Затем образец помещают в предварительно взвешенный пустой пикнометр и взвешивают на аналитических весах с точностью до $\pm 0,0001$ г. После взвешивания пикнометр заполняют дистиллированной водой и проводят обезгаживание. Для этого помещают пикнометр в вакуум-эксикатор, соединенный с вакуумной системой.

После обезгаживания пикнометр необходимо закрыть притертой пробкой. Затем пикнометр вместе с жидкостью и образцом снова взвешивают на аналитических весах с точностью до $\pm 0,0005$ г.

Плотность определяют по формуле

$$\rho = \frac{(m_p - m_0) \rho_w}{(m_p - m_0) - (m_{pw} - m_w)}, \quad (6.20)$$

где m_0 — масса пустого пикнометра, г; m_p — масса пикнометра с образцом, г; m_{pw} — масса пикнометра с образцом и дистиллированной водой, г; m_w — масса пикнометра с дистиллированной водой, г; ρ_w — плотность дистиллированной воды, г/см³.

Расчеты следует проводить с точностью до 0,001 г/см³. Допустимая разность результатов двух последовательных измерений должна быть не больше 0,005 г/см³. При большей разности опыт следует повторить. Плотность образца принимают равной среднему арифметическому двух последовательных измерений с точностью до 0,01 г/см³.

Основные виды дилатометров и их назначение. Дилатометры делят на пять основных групп: с оптическим измерением длины; индикаторные; быстродействующие рычажные; дифференциальные оптические; электрические.

Дилатометры с оптическим измерением длины применяют для непосредственного наблюдения изменения длины образца при различных температурах. Размеры образцов при расширении и сжатии измеряют с помощью микрометрических микроскопов, установленных горизонтально на подвижном основании. Для нагрева образцов в интервале температур от -150 до $+300$ °C ис-

пользуется соляная ванна, а от 300 до 1000 °С — камерная печь, заполненная нейтральным газом. Точность определения коэффициента теплового расширения составляет 0,1 %.

Измерения проводят с помощью эталона, выполненного в виде прямоугольного бруска с обработанными поверхностями. К одной из сторон точечной сваркой приваривают испытуемый образец из фольги толщиной 0,2—0,3 мм или проволоки диаметром 0,5—2 мм. Эталон с образцом размещают в печи, в которой выполнены отверстия для измерения стрелы прогиба образца. Стрелу прогиба образца $\lambda_{пр}$ измеряют с помощью длиннофокусного микроскопа с окулярным микрометром.

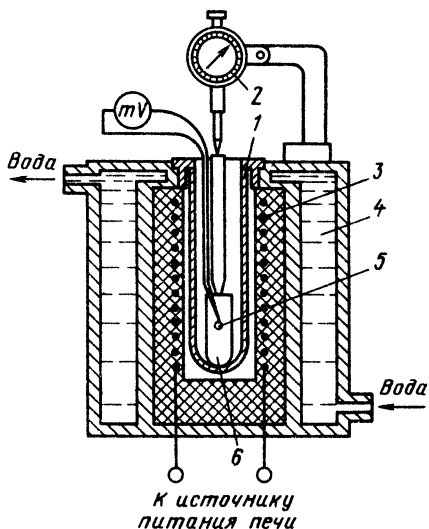


Рис. 6.16. Индикаторный dilatометр

Прибор позволяет определить относительное изменение объема, равное 10^{-5} — 10^{-6} . Индикаторный dilatометр является простейшим прибором для измерения термического расширения металлов и сплавов. Он состоит из dilatометрической державки 1 (кварцевая трубка и толкатель), индикаторного микрометра 2 и печи 3 с водоохлаждаемой рубашкой 4 (рис. 6.16). Термопара 5, прикрепленная к поверхности образца 6, регистрирует температуру образца 6. Чувствительность индикаторного dilatометра увеличивается при фиксации на оси индикатора небольшого зеркала и снабжении прибора круглой шкалой с осветителем. В таком случае увеличение dilatометра равно $k = 4\pi R$, где R — радиус шкалы (мм), так как полный оборот зеркала (2π) соответствует удлинению образца на 1 мм, а поворот зеркала на величину $\pi/2$ приводит к перемещению светового луча на πR мм по шкале.

Коэффициент расширения образца вычисляют по формуле

$$\alpha'_0 = \alpha_k + \frac{M_n}{M_t} \frac{1}{kl_0} \operatorname{tg} \varphi, \quad (6.21)$$

где α'_0 — истинный коэффициент расширения образца; α_k — коэффициент расширения кварца; M_n и M_t — масштабы записи параметров; k — увеличение dilatометра; l_0 — начальная длина образца; $\operatorname{tg} \varphi$ — угол наклона касательной к dilatограмме в точке, соответствующей температуре t .

Быстродействующие рычажные dilatометры используют для изучения тепловых процессов в металлах или сплавах, протека-

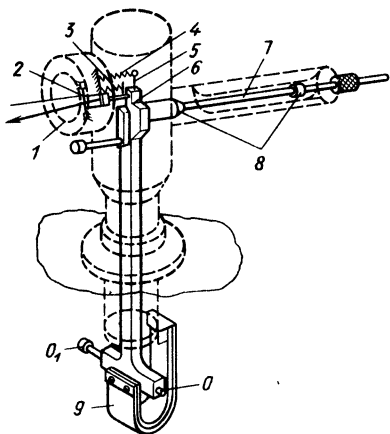


Рис. 6.17. Быстродействующий рычажный dilatометр

ющих длительное время. Образцы нагреваются при пропускании через них электрического тока, при этом скорость нагрева или охлаждения образца должна быть такой, чтобы не произошел перепад температур как по сечению образца, так и между образцом и трубкой-державкой. Следовательно, излучение тепловых процессов при закалке или скоростном нагреве стали или сплава нельзя провести с помощью индикаторных dilatометров. Для этих целей используют специальные малоинерционные dilatометры. В этих dilatометрах применяют проволоочные образцы,

нагреваемые при пропускании через них электрического тока. На рис. 6.17 показан быстродействующий рычажный dilatометр. В нем использована проволока диаметром 1,2—2,5 мм и длиной 120—130 мм. Расстояние между зажимами dilatометра, т. е. длина рабочей части образца, равно 100 мм. При нагреве образца 7 рычаг 6 вращается относительно оси OO_1 и шпилька 5 поворачивает зеркало 2. Пружина 3 растягивает образец, а пружина 4 прижимает зеркало к шпильке. Образец 7 зажимается в цапгах 8, а ток к подвижному концу образца подводят по проводу 9. Dilatометр устанавливают вблизи шлейфа для измерения температуры; лучи осветителя осциллографа направлены на зеркало dilatометра. Линза 1 на dilatометре предназначена для фокусирования лучей. Запись dilatограммы осуществляется фотокамерой. При низких скоростях нагрева до $1000\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ по dilatометрическим кривым определяют критические точки фазовых превращений. При более высоких скоростях нагрева образца по dilatограмме можно определить объемные превращения в сталях и сплавах и коэффициенты расширения образца. Dilatометр снабжен закалочным устройством, с помощью которого можно прекратить нагрев и закалить образец 7 в проточной воде. Такие dilatометры широко используются для установления коэффициента расширения при отпуске, рекристаллизационном отжиге и процессах закалки сталей и сплавов.

Дифференциальные оптические dilatометры выпускаются нескольких типов: дифференциальные dilatометры с катками; dilatометры Шевенара; универсальные dilatометры ДКМ.

Дифференциальные оптические dilatометры основаны на сравнении расширения испытуемого образца и эталона.

При измерении на дифференциальных dilatометрах необходимо использовать минимальные скорости нагрева и охлаждения с таким расчетом, чтобы температуры образца и эталона были одинаковы в каждый момент времени в процессе испытаний.

В промышленности используются также электрические dilatометры, которые основаны на том, что любой электрический датчик перемещения может быть использован для измерения геометрических параметров образца при условии, что этот датчик обладает достаточной чувствительностью и малой инерцией. В конструкции этих dilatометров применяют датчики емкостные, индуктивные, сопротивления и фотоэлектрические. На основании этого электрические dilatометры подразделяют на dilatометры с емкостными датчиками, dilatометры с индукционными датчиками, dilatометры с датчиками сопротивления и фотоэлектрические dilatометры.

Электрические dilatометры используют для изучения быстропротекающих процессов, расширения образца и измерения плотности в зоне сварного шва, когда необходима высокая точность оценки результатов при очень малых размерах образца.

Определение коэффициента термического расширения. При нагревании металла наблюдаются его расширение и уменьшение плотности, при этом плотность изменяется резко при фазовых превращениях. Расширение металла при нагреве можно определить по формуле

$$V_{t_1} = V_0 [1 + \alpha_v (t_1 - t_0)], \quad (6.22)$$

где V_0 и V_{t_1} — объем металла при начальной и конечной температурах t_0 и t_1 соответственно; α_v — коэффициент объемного расширения металла (сплава).

В технике применяют средний коэффициент объемного расширения, который относится к некоторому интервалу температур:

$$\alpha_{v(t_2-t_1)} = \frac{V_{t_2} - V_{t_1}}{t_2 - t_1} \frac{1}{V_0}, \quad (6.23)$$

и истинный коэффициент объемного расширения, соответствующий определенной температуре:

$$\alpha_{vt} = \frac{1}{V_1} \frac{dV}{dt} \approx \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}. \quad (6.24)$$

Поскольку применять гидростатический и пикнометрический методы при повышенных температурах нельзя, то на практике сначала определяют изменения линейных размеров, потом рассчитывают соответствующие изменения объемов.

Изменение длины металлического образца при нагреве можно определить

$$l_{t_2} = l_{t_1} [1 + \alpha_l (t_2 - t_1)], \quad (6.25)$$

где l_{t_1} и l_{t_2} — длина образца при начальной t_1 и конечной t_2 температурах; α_l — коэффициент линейного расширения образца.

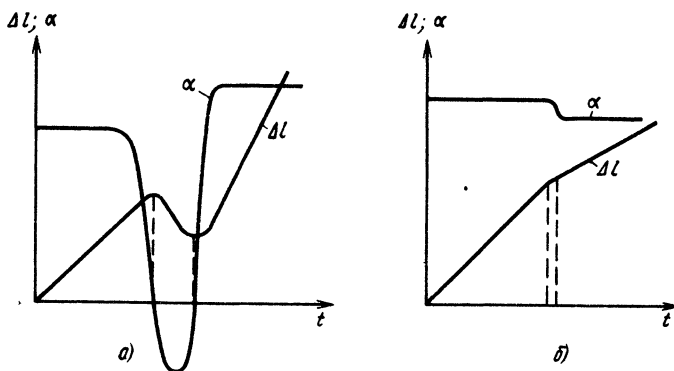


Рис. 6.18. Графики изменения удлинения (Δl) и коэффициента расширения (α) сплава при фазовых превращениях первого рода (а) и второго рода (б)

Можно определить и средний коэффициент расширения образца в интервале температур $\alpha_{\text{в}}(t_2 \rightarrow t_1)$ и истинный коэффициент расширения $\alpha_{\text{н}}$ при температуре t :

$$\alpha_{\text{в}}(t_2 \rightarrow t_1) = \frac{1}{l_0} \left(\frac{l_{t_2} - l_{t_1}}{t_2 - t_1} \right); \quad (6.26)$$

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt}. \quad (6.27)$$

Указанные соотношения справедливы для металлов и сплавов в температурных интервалах, в которых не происходят фазовые превращения.

Установлено, что фазовые превращения первого рода сопровождаются скачкообразным изменением удельного объема и соответствующим изменением коэффициента расширения (рис. 6.18). Поэтому измерения длины или объема образца при нагреве могут быть использованы для определения температуры начала и конца фазового превращения металла или сплава. Коэффициенты термического расширения при нагреве образцов определяют с помощью dilatометров.

6.9. Магнитные методы

Способы получения магнитных полей и их измерение, область применения магнитных методов. Дефекты металлов и сплавов, такие, как закалочные и шлифовочные трещины, волосовины, закаты, усталостные трещины, вызывают искажение магнитного поля, наведенного в изделии. Эти искажения магнитных силовых линий объясняются тем, что несплошности (дефекты) имеют иные магнитные свойства, чем окружающий их материал. Все магнитные методы испытания изделий базируются на использовании

устройств, в помощью которых это искажение (поле рассеяния) может быть измерено или обнаружено.

Самый простой метод обнаружения искажений магнитного поля заключается в перемещении над намагниченным изделием обыкновенного компаса. Стрелка компаса будет совпадать с направлением магнитных силовых линий, а изменение направления магнитных силовых линий и будет указывать на любое искажение магнитного поля. Основной недостаток этого метода — низкая чувствительность.

Для определения искажений магнитного поля в изделиях используется магнитопорошковый метод — метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии. Он является простым и удобным методом обнаружения дефектов материалов.

Метод состоит в намагничивании изделия и нанесении на него магнитных частиц в виде порошка или в виде порошка, взвешенного в жидкости. В месте нахождения дефекта — на поверхности изделия или близко от нее — появляется пара магнитных полюсов. Эти полюса действуют подобно маленьким магнитам, которые удерживают на поверхности магнитный порошок. Образуется изображение дефекта, видны его расположение и протяженность. Точность этого метода зависит от состояния поверхности испытуемого изделия, которая должна быть сухой, очищенной от окалины и ржавчины. Над поверхностными дефектами образуются магнитопорошковые наслоения, плотно сцепленные с поверхностью изделия. Подповерхностным дефектам соответствуют менее резкие очертания рисунка, так как сцепление порошка с поверхностью ослаблено.

Таким методом можно определять трещины напряжения, шлифовочные трещины, неметаллические включения, дефектыковки и лития.

Кроме магнитного порошка, для регистрации рассеянного магнитного поля используют магнитную пленку типа применяемой в магнитофонах, но более широкую. Считывание сигналов с пленки осуществляют с помощью прибора, датчиком которого служит магнитофонная головка. Этот метод называется магнитографическим. С его помощью обнаруживают дефекты в более толстом поверхностном слое.

Напряженность поля рассеяния определяется большим числом факторов: величиной намагничивания, магнитной проницаемостью материала, формой изделия, формой, размером, расположением и ориентацией дефекта. Напряженность уменьшается с увеличением глубины расположения дефекта под поверхностью. Нанесение магнитного порошка на изделие обеспечивает более высокую чувствительность при обнаружении дефектов по сравнению с нанесением магнитной суспензии.

Магнитное поле можно навести одним из трех способов:

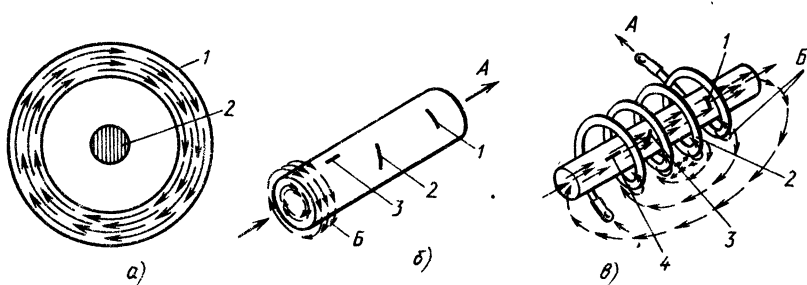


Рис. 6.19. Схемы намагничивания:

a — в помощь центрального проводника (1 — изделие; 2 — проводник); *б* — циркулярное намагничивание (1 — поперечная трещина; 2 — трещина под углом 45°; 3 — продольная трещина; *A* — направление тока; *B* — магнитные силовые линии); *в* — продольное намагничивание (1 — поперечная трещина; 2 — соленоид; 3 — трещина под углом 45°; 4 — продольная трещина; *A* — направление тока; *B* — магнитные силовые линии)

пропусканьем электрического тока непосредственно по изделию или по его части;

пропусканьем электрического тока через проводник, окружающий изделие;

намагничиванием изделия в помощь постоянных магнитов.

Намагничивание изделия пропусканьем по нему электрического тока известно как циркулярное намагничивание. Электрический ток пропускают через какую-либо часть изделия в помощь контактов. Необходимо следить за тем, чтобы поверхности контактов были чистыми, в противном случае ток большой силы может вызвать возникновение дуги и прожог изделия. Электрический ток можно включать после того, как контакты надежно присоединены к поверхности, а отключить ток необходимо до отсоединения контактов.

Второй метод намагничивания основан на том, что при введении в соленоид изделия из ферромагнитного материала в нем возникает магнитное поле. Этот способ намагничивания называют продольным (полюсным) намагничиванием. Для наведения продольного магнитного поля наматывают на изделие гибкий кабель, при этом чем меньше число витков, тем больше ток намагничивания. Гибкий кабель широко применяют для намагничивания изделий больших размеров. Если изделие выполнено в виде трубы 1, то ее намагничивают пропусканьем тока по центральному проводнику 2 (рис. 6.19, *a*). При намагничивании изделие должно быть установлено как можно ближе к проводнику с током. На одну и ту же часть намагничиваемого изделия могут быть наложены одновременно два магнитных поля. В таком случае появляется результирующее магнитное поле, величина и направление которого определяются двумя наведенными полями. Результирующее поле будет изменяться как по направлению, так и по величине, если одна или обе составляющие поля являются переменными.

Для достижения наибольшей чувствительности намагничивать изделие необходимо так, чтобы направление магнитного поля было перпендикулярно дефекту на изделии. С помощью кругового магнитного поля можно обнаруживать лишь дефект, расположенный параллельно оси изделия (рис. 6.19, б). Продольное магнитное поле позволяет обнаружить поперечный дефект изделия (рис. 6.19, в).

Для намагничивания применяют постоянный и переменный электрический ток, при этом интенсивность магнитного поля зависит от силы электрического тока, а напряжение источника тока должно быть небольшим, чтобы обеспечить безопасность работы и свести к минимуму возможность повреждения изделия. Постоянный электрический ток создает магнитное поле, которое глубоко проникает в металл изделия. Действие магнитного поля, вызванного переменным током, ограничивается поверхностными слоями изделия, поэтому переменный ток используют для обнаружения поверхностных дефектов.

Для намагничивания изделия можно поместить его между полюсами постоянного магнита или электромагнита, который имеет U-образную форму. Сила электрического тока, необходимого для намагничивания и применяемого для контроля сварных швов, изменяется от 600 до 2000 А в зависимости от толщины изделия и расстояния между электродами. Значение силы тока определяется стандартами или инструкциями, прилагаемыми к дефектоскопическому оборудованию.

Источниками постоянного электрического тока могут быть батареи, генераторы или двухполупериодные выпрямители переменного тока. Импульсный переменный ток получают с помощью однополупериодного выпрямителя однофазного переменного тока. В качестве низковольтных источников тока большой силы можно использовать мотор-генераторы, используемые при сварочных работах (максимальная сила тока около 300 А).

Комбинированное намагничивание производят одновременно воздействием на контролируемый участок изделия двух взаимно перпендикулярных переменных магнитных полей, сдвинутых по фазе на 90° (вращающееся поле), или же одного переменного и одного постоянного поля (винтовое поле), при этом одно из магнитных полей может быть циркулярным, а другое — продольным.

Преимуществом комбинированного намагничивания является возможность одновременного выявления дефектов как продольного, так и поперечного направления. При этом повышаются производительность и надежность комбинированного метода контроля.

Магнитные методы применяют для контроля любых изделий, изготовленных из магнитного материала, для обнаружения морщин, закатов и расслоений в металле, поверхностных дефектов в сварных швах (непровар, пора, шлаковое включение, свищ и усадочная раковина).

Магнитопорошковые дефектоскопы — устройства для выявления дефектов в изделиях с использованием в качестве индикатора магнитных порошков.

Используют стационарные и передвижные дефектоскопы различных конструкций.

С помощью магнитопорошковых дефектоскопов контролируют отдельные детали в узлах без их демонтажа, а также детали серийного производства, изготавливаемые в автоматическом режиме. Существуют универсальные дефектоскопы и специализированные.

Универсальные магнитопорошковые дефектоскопы широко применяют для контроля изделий разной формы и размеров. Выпускаются стационарные универсальные дефектоскопы разных типов: У-604-68 — максимальная длина контролируемой детали 1725 мм; УМДЭ-10000 — для контроля деталей диаметром до 800 мм и длиной до 1600 мм; с приставкой длина детали 4000 мм; УМД-9000 — для контроля изделий длиной до 1700 мм, диаметром до 900 мм; МДС-1,5 — для контроля деталей длиной до 200 мм и диаметром 40 мм.

Универсальные дефектоскопы позволяют размагничивать изделия, не снимая их с дефектоскопа.

Широко используются также зарубежные универсальные дефектоскопы следующих типов: УН 350 (ФРГ) — для контроля изделий длиной 360 мм; УНС 3000 (ФРГ) — для контроля изделий длиной 3000 мм; U 320 G (ФРГ) — для контроля изделий длиной 300—3200 мм; КРН-4D (США); PRA-8 и PRA-3D (Япония).

Известно более 100 типов специализированных дефектоскопов. Это в основном автоматизированные установки, в которых все операции, кроме осмотра, автоматизированы. Эти установки предназначены для контроля деталей одного типа при крупносерийном производстве.

Определение физических свойств металлов и сплавов. Магнитные методы применяют также для определения физических свойств магнитного материала. Установлено, что между магнитными свойствами материала и его физическими характеристиками существует определенное соотношение.

Для измерения магнитных свойств необходимо получение магнитных полей соответствующей напряженности, однородных магнитных полей и магнитных полей, имеющих особую конфигурацию. В магнитных измерительных приборах используются магнитное поле электрического тока и намагничивающие катушки-соленоиды или электромагниты с ярмом и полюсными башмаками специальной формы. Образцы незамкнутой формы можно намагнитить в цилиндрической катушке-соленоиде. Напряженность H поля внутри нее можно определить, зная силу тока I , число витков и геометрические размеры катушки (соленоида):

$$H = \frac{0,4\pi IN}{\sqrt{l^2 + d^2}}, \quad (6.28)$$

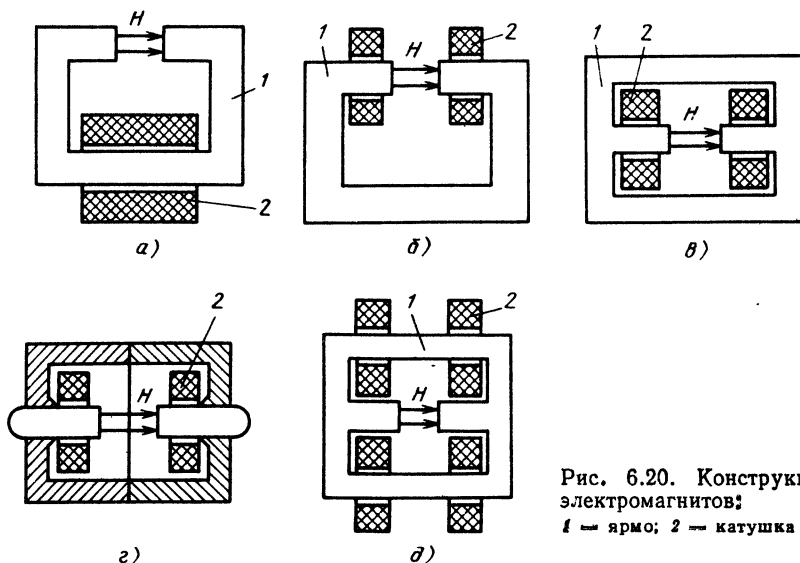


Рис. 6.20. Конструкции электромагнитов;
1 — ярмо; 2 — катушка

где l — длина катушки, см; d — диаметр среднего витка катушки, см.

Образцы в форме тороидов или рамок намагничивают с помощью обмотки, равномерно распределенной по периметру. При этом получают однородное поле при полном отсутствии рассеяния и размагничивающего действия концов образца.

В этом случае напряженность поля тороидальной катушки определяют по формуле

$$H = \frac{0,2lN}{R_{\text{ср}}}, \quad (6.29)$$

где $R_{\text{ср}}$ — средний радиус тороида.

Используя простейшие соленоиды и катушки, можно получить напряженность поля порядка $8 \cdot 10^4$ — $16 \cdot 10^4$ А/м. Эти поля слишком слабы для исследования магнитотвердых материалов или изучения фазовых превращений в сплавах, когда требуется применение насыщенных полей, поэтому в таких случаях используют катушки с ферромагнитными сердечниками (электромагниты).

В электромагнитах ярмо, выполненное из мягкого железа, представляет собой малое сопротивление магнитному потоку, и поэтому поле концентрируется в узком воздушном зазоре, куда помещают образец для намагничивания (рис. 6.20, а—д). Напряженность поля в зазоре является известной величиной, и рассчитывают только размеры ярма, число витков, диаметр провода и силу тока, проходящего через катушку.

Измерение напряженности магнитного поля. Напряженность поля измеряют разными методами: индукционным, методом напряженности, магнитным и методом эффекта Холла.

При испытаниях в основном используют различные модификации индукционного метода и метода, базирующегося на применении датчиков ЭДС Холла, например, баллистический метод и метод измерительного генератора. При измерении баллистическим методом применяется небольшая катушка из неметаллического материала, на которую навивается медный провод, соединенный с баллистическим гальванометром. При установлении измерительной катушки в положение, при котором вектор напряженности поля направлен по нормали к плоскости витков, при быстром удалении катушки из магнитного поля в ее витках появляется ЭДС. Напряженность поля связана с ЭДС следующей зависимостью:

$$H = \frac{c_b R}{SN} 10^8, \quad (6.30)$$

где c_b — баллистическая постоянная гальванометра; R — общее сопротивление баллистической цепи; N — число витков катушки; S — площадь витков катушки.

Разновидность индукционного метода — метод измерительного генератора. Проводящий контур вращается в магнитном поле с постоянной угловой скоростью. Во время вращения контура в нем возникает ЭДС, пропорциональная напряженности измеряемого поля.

В приборах для измерения магнитных полей применяют полупроводниковые датчики ЭДС Холла, с помощью которых измеряют как постоянные, так и переменные магнитные поля. Действие их основано на эффекте Холла — возникновении поперечного электрического поля в проводнике при помещении его в магнитное поле.

Кроме напряженности магнитного поля, при контроле изделий магнитными методами определяют характеристики ферромагнетиков. Измерение намагниченности и построение петли магнитного гистерезиса проводят по двум вариантам. Первый вариант — определение магнитного момента по углу отклонения магнитной стрелки от своего первоначального положения (магнитный метод).

Второй вариант — измерение изменения потока, охватывающего измерительную катушку, которая окружает изделие, при изменении параметров намагничивающего поля (баллистический метод).

Для построения петли гистерезиса важное значение имеет форма образца. Чаще всего применяют образцы в форме тороида. На тороидальный образец наматывают измерительную катушку, а поверх нее наматывают намагничивающую катушку (рис. 6.21). Источником тока служит батарея GB . Силу тока регулируют реостатом $R1$. Сила тока измеряется амперметром A .

Направление тока изменяют с помощью двухполюсного рубильника $K1$ и дополнительно силу тока регулируют в одном направлении с помощью реостата $R2$ и рубильника $K2$. Эталонная катушка M включена в цепь с помощью рубильника $K3$; она применяется для

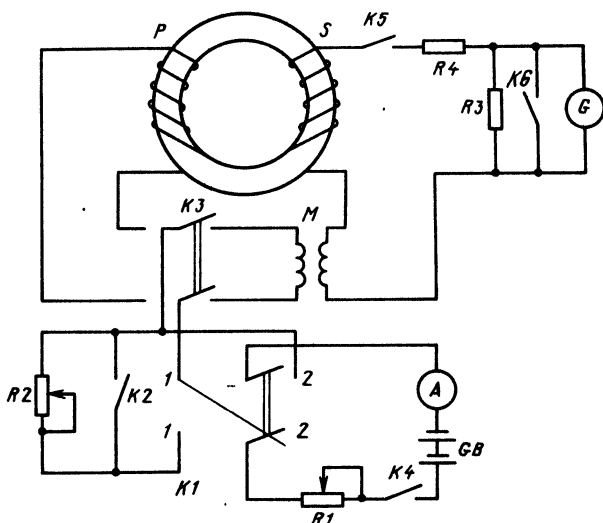


Рис. 6.21. Схема баллистической установки

градуировки цепи баллистического гальванометра G . Последний можно включить в цепь рубильником $K5$ или стабилизировать его работу рубильником $K6$. Установка работает следующим образом. При включении тока I в намагничивающей катушке появляется поле напряженностью H и образец намагничивается до индукции B . Появление поля напряженностью H и намагничивание образца до индукции B происходят за время τ , в течение которого поток изменяется от 0 до $\Phi = BS$ (S — площадь поперечного сечения образца).

Количество электричества, протекающего через цепь баллистического гальванометра, равно

$$Q = \frac{NBS}{R}, \quad (6.31)$$

откуда

$$B = \frac{c_B R}{NS} 10^8 \alpha_r, \quad (6.32)$$

где c_B — баллистическая постоянная; α_r — отклонение стрелки гальванометра.

Этим методом можно определить индукцию или изменение индукции при изменении намагничивающего поля.

Построение начальной кривой намагничивания выполняется методом коммутации. Измерение при полностью размагниченом образце начинается с установления минимальной силы тока и магнитной тренировки образца с помощью трех- или четырехкратного реверсирования намагничивающего тока. Магнитная тренировка образца заключается в следующем: 3—4 раза с помощью

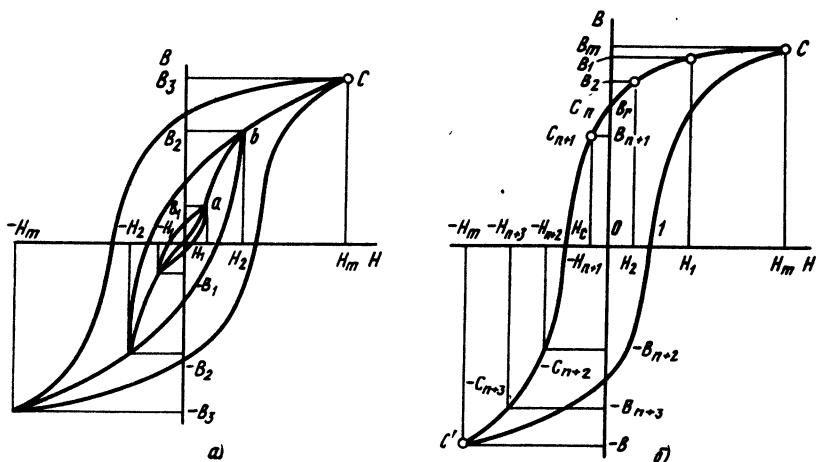


Рис. 6.22. Начальная кривая намагничивания (а) и петля гистерезиса (б)

реостата $R1$ и рубильника $K1$ плавно и медленно изменить силу тока в намагничивающей цепи от максимального значения $+I_{\max}$ до 0 и (после переключения направления тока) до $-I_{\max}$, затем вновь уменьшить силу тока до 0, изменить направление тока и увеличить силу тока до $+I_{\max}$ и т. д. После этого включают гальванометр и с помощью рубильника $K1$ быстро изменяют направление тока.

При этом стрелка гальванометра отклоняется пропорционально изменению магнитной индукции от B_1 до $-B_1$, так как поле изменяется от H_1 до $-H_1$ или наоборот. Иначе, отклонение стрелки гальванометра пропорционально удвоенной индукции B_1 , которая соответствует полю H_1 . После первого измерения выключают гальванометр, затем увеличивают силу тока, проводят магнитную тренировку и производят следующее измерение параметров магнитного поля. Последовательное проведение таких измерений при увеличении силы тока дает возможность построить начальную кривую намагничивания (рис. 6.22, а).

Построение петли гистерезиса. Построение петли гистерезиса осуществим в первом квадранте. Установим координаты точки C , соответствующие максимальному значению напряженности поля H (рис. 6.22, б). Измерение проводим методом коммутации. Затем рубильник $K1$ установим в положение 1—1 и реостатом $R2$ устанавливаем силу тока, соответствующую напряженности H_1 при разомкнутом рубильнике $K2$ (см. рис. 6.21). После этого замыкаем $K2$, с помощью рубильника $K1$ проводим магнитную тренировку образца при максимальной силе тока и оставляем рубильник $K1$ в позиции 1—1. Затем включаем гальванометр и размыкаем $K2$. Сила тока изменяется так, что напряженность поля изменяется от H_m до H_1 , а индукция — от B_m до B_1 , т. е. откло-

нение стрелки гальванометра пропорционально $B_m - B_1$. В результате получим точку C верхнего участка петли гистерезиса. Повторение измерения при другом значении силы тока, соответствующего напряженности поля H_2 , дает возможность получить следующую точку кривой и т. д. Последнюю точку этой части петли можно получить, уменьшив силу тока от максимума до нуля. Эта точка определяет величину остаточной индукции.

Построение петли слева от оси ординат (участок $C_n - H_c - C'$) сложнее. Исходной точкой и в этом варианте является точка C , соответствующая максимальной индукции. После определения этой точки рубильник $K1$ устанавливают в положение 1—1 (см. рис. 6.21), в данном случае условно соответствующее отрицательному направлению поля, размыкают рубильник $K2$ и реостатом $R2$ устанавливают небольшую силу тока, соответствующую напряженности поля $-H_{n+1}$. Потом замыкают рубильник $K2$, проводят магнитную тренировку, оставляют рубильник $K1$ в позиции 2—2 и размыкают рубильник $K2$.

Затем включают гальванометр и изменяют положение рубильника $K1$. За счет этого напряженность поля изменяется от H_m до $-H_{n+1}$, а индукция — от B_m до B_{n+1} , т. е. отклонение показаний гальванометра пропорционально $B_n - B_{n+1}$. Последовательным повторением описанных приемов при увеличении отрицательного поля получают левую часть петли. При отключении резистора $R2$ получим точку C' , соответствующую значению B_m ; вторую ветвь петли гистерезиса строят симметрично первой, не проводя измерений.

Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса предназначены для определения основных магнитных характеристик материала: магнитной проницаемости, остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силы, намагниченности насыщения.

Магнитные методы установления фазовых превращений. Для структуры сталей и сплавов характерны следующие фазы: феррит, мартенсит, карбид и остаточный аустенит. Первые три фазы обладают ферромагнитными свойствами, а остаточный аустенит — парамагнитными. Первичные магнитные свойства металлов и сплавов — намагниченность насыщения и температура (точка Кюри) зависят от состава фазы и типа кристаллической решетки, следовательно, их изучение позволяет получить данные, которые необходимы для построения диаграмм состояний сплавов. Поэтому при изменении фазового состава или строения фазы наблюдается изменение точки Кюри и намагниченности насыщения изделия. При растворении металла в ферромагнитной основе удельная намагниченность при данной температуре и точка Кюри основы сплава уменьшаются с возрастанием количества растворенного вещества. Обычно удельная намагниченность и точка Кюри зависят от состава сплава, поэтому состав однофазного ферромагнитного сплава может быть определен по графику, построенному в координатах удельная намагниченность сплава —

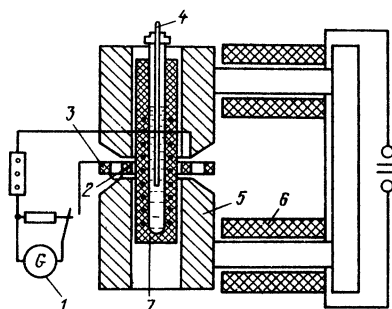


Рис. 6.23. Схема баллистического магнитометра

температура. При содержании в сплаве двух или более структурных фаз форма кривых усложняется. Такой магнитный метод измерения можно применять и для случая, когда одна из структурных фаз в сплаве немагнитна или слабомагнитна, например, остаточный аустенит. При наличии нескольких немагнитных фаз количественный анализ провести невозможно.

Магнитный метод применяется также для анализа диаграмм равновесия фаз в сплавах. С помощью этого метода определяют границы растворимости α - и β -фаз в сплавах с использованием удельной намагниченности насыщения и точки Кюри при температурах фазовых превращений. Измерение намагниченности насыщения для фазового анализа сплавов необходимо проводить в сильных магнитных полях, достаточных для полного насыщения. Напряженность полей ($5,57-6,37$) 10^6 А/м обеспечивает достаточную точность измерений при фазовом анализе сплавов.

Устройства для испытания металлов и сплавов магнитным методом. Для изучения фазовых превращений применяют баллистический магнитометр. Он состоит из электромагнита для намагничивания образца, измерительной катушки, помещенной в зазоре между полюсами магнита, и баллистического гальванометра. При введении образца в катушку и выведении его показания гальванометра изменяются пропорционально намагниченности насыщения образца, установленного под стержнем 4 (рис. 6.23). Мощный электромагнит 6 этого магнитометра дает напряженность поля в зазоре ($7,96-9,55$) 10^6 А/м. В отверстие полюсных башмаков 5 установлена небольшая печь 7, а в зазоре электромагнита размещена баллистическая катушка 2. Величина магнитного потока, проходящего через катушку, пропорциональна намагниченности насыщения образца и напряженности поля. Поэтому отклонение гальванометра I

$$\alpha = kS (4 \pi M_s + H_s), \quad (6.33)$$

где k — коэффициент; S — площадь поперечного сечения образца; M_s — намагниченность насыщения образца; H_s — напряженность внешнего магнитного поля.

Для компенсации изменений напряженности поля при внесении или удалении образца служит компенсационная катушка 3, ЭДС которой пропорциональна изменению внешнего поля H_s .

Баллистический магнитометр используют для изучения изотермического распада переохлажденного аустенита, мартенситного превращения, отпуска закаленной стали.

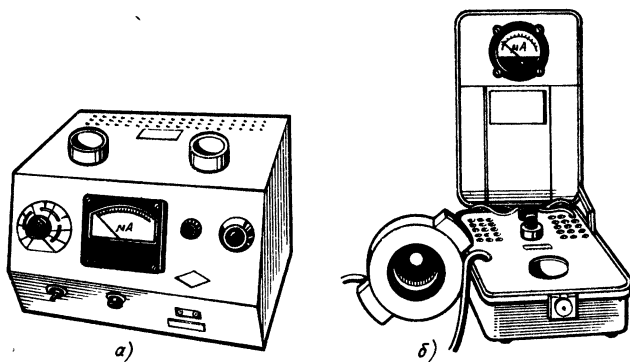


Рис. 6.24. Аустенометр для контроля сверл и протяжек

Для контроля качества термической обработки сверл диаметром 1—5 мм служат аустенометры. Показания снимаются с встроенного в аустенометр показывающего прибора — микроамперметра типа М24 или М494 на 100 мкА и с дополнительного показывающего прибора — гальванометра высокой чувствительности. При использовании такого гальванометра возможен контроль инструмента диаметром меньше 1 мм. Для подключения дополнительного прибора имеются специальные клеммы и переключатель. Регулятор чувствительности прибора работает только при использовании дополнительного показывающего прибора (рис. 6.24, а).

Аустенометр для контроля качества термической обработки протяжек диаметром 40—80 мм из инструментальной быстрорежущей стали показан на рис. 6.24, б. Прибор имеет выносную измерительную катушку на длинном шестиметровом кабеле для контроля протяжек больших размеров. Прибор имеет два эталона-цилиндра из быстрорежущей стали длиной 100 мм. Эталоном диаметром 40 мм измеряют протяжки с диаметром задней направляющей 40—60 мм; эталоном 60 мм — диаметром 60—80 мм. При контроле качества термической обработки сверл и протяжек, изготовленных из инструментальной быстрорежущей стали, определяют их твердость после закалки и отпуска.

На рис. 6.25 показан прибор для контроля глубины закаленного слоя напильников. Он основан на определении зависимости между магнитной проницаемостью и толщиной закаленного и отожженного слоев металла. Принцип работы прибора тот же, что и у аустенометров. Прибор рассчитан на контроль напильников всех типоразмеров. Эталоном служат отожженные образцы из стали У12, помещенные в вертикальную катушку. Измерительная катушка имеет обмотку, ЭДС которой обеспечивает включение вспомогательного реле, управляющего включением микроамперметра, т. е. при помещении напильника в измерительную катушку показывающий прибор включается автоматически.

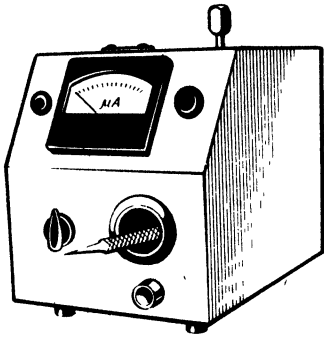


Рис. 6.25. Прибор для контроля глубины закаленного слоя напильников

Для измерения магнитной анизотропии материалов и изучения фазовых превращений в ферромагнитных материалах применяют анизометр Акулова. Для исследования быстрот протекающих фазовых превращений применяют магнитометры переменного и постоянного тока. Анализ осциллограмм, полученных на этих приборах, позволяет определить температурные интервалы и степени распада остаточного аустенита при отпуске и другие металлографические изменения в образцах из металлов и сплавов.

6.10. Электрические методы

Основы электрических методов. Физическая величина, которая характеризует электрические свойства металлов и сплавов, называется удельным электрическим сопротивлением ρ_R . Под удельным электрическим сопротивлением понимают электрическое сопротивление однородного проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм² при прохождении через него электрического тока. Эта характеристика определяется только природой металла (сплава) и не зависит от формы и размеров образца. Удельное сопротивление определяют по формуле

$$\rho_R = \frac{Rs}{l}, \quad (6.34)$$

где R — сопротивление образца, Ом; l — длина образца, м; s — площадь поперечного сечения образца, мм².

Величину, обратную удельному электрическому сопротивлению, называют удельной электрической проводимостью и определяют по формуле

$$\sigma_p = 1/\rho_R. \quad (6.35)$$

При нагревании металлов и сплавов удельное электрическое сопротивление возрастает и описывается для большинства металлов и сплавов зависимостью

$$\rho_{Rt} = \rho_{R0} (1 + \alpha t), \quad (6.36)$$

где ρ_{Rt} и ρ_{R0} — удельное электрическое сопротивление при температурах t и 0 °С; α — средний в интервале температур температурный коэффициент сопротивления;

$$\alpha = \frac{\rho_{Rt} - \rho_{R0}}{\rho_{R0} t}. \quad (6.37)$$

При точных измерениях этого коэффициента необходимо учитывать также тепловое расширение образца

$$\alpha_p = \alpha_r + \alpha_l (1 + \Delta t \alpha_r), \quad (6.38)$$

где α_r — температурный коэффициент сопротивления всего образца; Δt — температурный интервал; α_l — коэффициент линейного расширения.

Электрические методы контроля используют для выявления расслоений в прокатанном листовом металле, дефектов в отливках, некачественных сплавов, дефектных швов, расслоений в биметаллических пластинах, трещин и др., а также для сортировки металлических изделий, измерения толщины пленок, проверки химического состава металлических изделий.

При испытаниях используют следующие методы электрического контроля:

электрический (метод измерения электрического сопротивления); электропотенциальный; трибоэлектрический.

Метод измерения электрического сопротивления. Сущность метода заключается в том, что при пропускании электрического тока через металлическое изделие между двумя его точками возникает разность потенциалов, наличие дефекта изменяет эту разность. По изменению разности потенциалов судят о внутреннем состоянии изделия.

При измерении электрического сопротивления на результаты испытаний значительно влияет поверхностное контактное сопротивление. Для исключения этого влияния разработаны специальные электроды.

При испытаниях удельное электрическое сопротивление металлов и сплавов не определяют, а обычно сравнивают сопротивление образцов, отличающихся составом или обработкой, или следят за изменением электрического сопротивления в ходе обработки или фазовых превращений металлов и сплавов. Изменение сопротивления образцов небольшое, поэтому применяют чувствительные приборы. В основном измеряют сопротивление и размеры образцов и по этим параметрам рассчитывают удельное электрическое сопротивление. Сопротивление образца измеряют с использованием постоянного или переменного тока. Чаще используют измерительные приборы постоянного тока, имеющие большую точность и чувствительность, а выходной сигнал измерительной схемы на переменном токе всегда можно преобразовать в постоянный ток.

Вольтметры и амперметры являются простейшими приборами для измерения электрического сопротивления, но они имеют недостаточную чувствительность. Хорошие результаты получают при использовании компенсационных элементов, таких как потенциометры и электрические мосты.

Электропотенциальный метод основан на измерении разности потенциалов на определенном участке (сравнении напряжения

на эталонном резисторе с напряжением на образце). Сравнение проводится нулевым методом, при котором в момент включения компенсационных элементов через нуль-индикатор электрический ток не проходит. Метод обеспечивает высокую точность измерений при испытаниях металлов и сплавов.

Для лабораторных испытаний применяют потенциометры типов ППТВ-1 и ППТН-1, предназначенные для измерения разностей потенциалов 10 мВ — 1,2 В. При использовании делителя напряжения типа ДН-1 верхний предел можно расширить до 600 В.

Трибоэлектрический метод. Два разнородных металла под нагрузкой перемещают один относительно другого, в результате чего появляется некоторое напряжение. Это напряжение изменяется от долей микровольта до нескольких милливольт в зависимости от состава металлов. Это явление известно под названием «трибоэлектрического эффекта» и вызвано перераспределением электронов разнородных металлов пары трения. Такой эффект появляется также при трении однородных металлов, один из которых является термообработанным. Напряжение, возникающее при механическом трении, не зависит от скорости и направления движения натирающего устройства с образцом. Шероховатость поверхностей образцов почти не влияет на трибоэлектрический потенциал, однако поверхности контактирующих металлов должны быть очищены от окалины и загрязнений.

Испытания трибоэлектрическим методом позволяют установить изменение содержания в углеродистых сталях примесей (фосфора, серы, кремния). Этим методом определяют наличие добавок меди в сплавах. Метод позволяет отличить аустенитные коррозионно-стойкие стали от сталей других марок, а также проводить сортировку медных сплавов в зависимости от содержания в них сурьмы.

6.11. Параметрический вихретоковый метод

Метод основан на применении вихревых токов и используется для определения дефектов, неоднородностей структуры и отклонений в химическом составе электропроводных материалов. Метод наиболее эффективен при выявлении дефектов, расположенных близко к поверхности детали. Суть метода в следующем: при поднесении к поверхности изделия катушки, по которой проходит переменный электрический ток, в металле наводятся вихревые токи. Сила вихревых токов зависит от силы и частоты переменного тока, электрической проводимости, магнитной проницаемости и формы изделия, относительного расположения катушки и изделия, а также от наличия в изделии неоднородностей или несплошностей. Электрическая проводимость зависит от механической или термической обработки изделия. Любое отклонение в структуре и различные дефекты в изделии влияют на распределение и силу наведенных вихревых токов, а следовательно, и на характер маг-

нитного поля. Эти изменения магнитного поля можно обнаружить по их влиянию на первичную обмотку катушки, помещенной в непосредственной близости от изделия.

Методы, основанные на возбуждении и измерении вихревых токов, используются для бесконтактного измерения электрической проводимости при повышенных температурах, а также для определения межкристаллитной коррозии.

С помощью этого метода можно определить изменения электрической проводимости и диаметра изделия, вызванные упругой и пластической деформацией. Методы вихревых токов можно автоматизировать и применять для контроля изделий в массовом производстве.

6.12. Акустические методы

Классификация акустических методов. Акустические методы контроля основаны на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в испытуемом изделии.

Акустические волны распространяются в однородной среде направленно и без существенных затуханий, а на границе раздела двух сред (например, металл—воздух) полностью отражаются.

В зависимости от частоты упругие колебания разделяются на инфразвуковые, звуковые, ультразвуковые и гиперзвуковые.

Для неразрушающего контроля используют колебания в основном ультразвукового диапазона.

Рассмотрим следующие методы акустического контроля: теневой, метод прохождения, метод отражения, эхоимпульсный (эхометод), резонансный, метод свободных колебаний, зеркально-теневой, метод акустоупругости и акустико-эмиссионный. С помощью этих методов выявляются нарушения сплошности и однородности металлов и сплавов, контролируются физико-механические свойства материалов.

К преимуществам методов акустического контроля относятся высокая чувствительность и производительность, возможность выявления глубоко лежащих дефектов с определением их размеров и места расположения, возможность автоматизации контроля.

Резонансный метод. При методе свободных колебаний появляются колебания нескольких собственных частот, в результате чего получить звучание чистого тона по этому методу трудно. Разработаны методы возбуждения колебаний с помощью вспомогательных вибраторов, таких, как пьезоэлектрический преобразователь, магнитострикционный генератор колебаний или электромагнитный вибратор. Подсоединение вспомогательного вибратора изменяет собственную частоту колебаний контролируемого изделия.

Для возбуждения малых колебаний используют электромагнитные методы для магнитных материалов и методы наведенных токов для немагнитных материалов с хорошей проводимостью.

В этом случае не требуется непосредственного контакта между изделием и системой возбуждения колебаний, а колебания изделия происходят с собственной частотой. Для магнитных материалов область максимальных амплитуд колебаний находится между полюсами электромагнитной катушки, по которой протекает переменный ток.

Резонансную частоту можно определить путем измерения частоты переменного тока, как соответствующей максимальной амплитуде колебаний. В немагнитных материалах с хорошей проводимостью колебания можно возбудить пропусканием переменного тока по катушке, расположенной вблизи изделия. В результате взаимодействия магнитного поля катушки с магнитным полем вихревых токов, наведенных в изделии, появляется переменная во времени электромагнитная сила, которая вызывает вибрацию изделия. Максимальная переменная электромагнитная сила появляется в том случае, когда магнитное поле перпендикулярно направлению вихревого тока.

Метод свободных колебаний. Свободные колебания изделия затухают даже в том случае, если изделие полностью изолировано от окружающей среды. Однако некоторая часть энергии колебания всегда преобразуется в теплоту. Часть энергии колебания изделия, преобразованная в теплоту, является энергией затухания упругих колебаний в изделии или так называемой энергией «внутреннего трения». Коэффициент поглощения Q определяется следующей зависимостью при условии, что затухание происходит медленно:

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W}, \quad (6.39)$$

где W — полная упругая энергия колебаний, отнесенная к единице объема образца или к единице длины образца; ΔW — доля упругой энергии колебаний, отнесенная к единице объема образца или к единице длины образца.

Для исследования процессов внутреннего трения разработаны следующие экспериментальные методы.

1. Установление постоянных затухания амплитуды свободных колебаний; этот метод заключается в определении времени, в течение которого амплитуда колебаний уменьшится на определенную величину. Отношение амплитуд двух смежных во времени колебаний есть величина постоянная; натуральный логарифм этого отношения δ (логарифмический декремент) принимается за величину внутреннего трения; коэффициент поглощения и логарифмический декремент δ связаны соотношением

$$Q = \pi/\delta. \quad (6.40)$$

Метод используется при очень малых напряжениях, но при этом методе внешние потери (потери энергии в местах крепления образца) значительны, распределение напряжений неравномерно, изменение частоты колебаний затруднительно.

2. Определение петли гистерезиса на кривой напряжение — деформация в процессе вынужденных колебаний. Метод применяется для измерения напряжения и деформации во время циклического нагружения образца. Площадь, образуемая замкнутой кривой на построенном по результатам замеров графике, используется для вычисления внутренних энергетических потерь. Метод целесообразно использовать при больших напряжениях; преимуществом его является равномерное распределение напряжений.

3. Определение резонансной кривой в процессе вынужденных колебаний. По этому методу образец подвергается воздействию переменной по времени силы, частота которой варьируется. В это время измеряют амплитуду колебаний образца. В процессе измерений определяют значение двух частот, для которых амплитуда равна половине резонансной амплитуды. Чем меньше внутреннее трение в образце, тем круче резонансная кривая на графике. Если ΔF — изменение наложенной частоты, необходимое для изменения амплитуды от половины ее максимального значения по одну сторону резонансной частоты до половины ее максимального значения по другую сторону, то отношение $\Delta F/F$ является мерой внутреннего трения:

$$Q = \frac{F}{F_2 - F_1}, \quad (6.41)$$

где F — резонансная частота; F_1 — частота, бóльшая резонансной, с амплитудой, равной 0,707 амплитуды при резонансной частоте; F_2 — частота, меньшая резонансной, с амплитудой, равной 0,707 амплитуды при резонансной частоте.

По этому методу потери на внутреннее трение можно определить в изделии с поперечным сечением любой формы.

4. Определение рассеиваемой энергии при вынужденных колебаниях. Коэффициент поглощения энергии определяют путем измерения мощности, подаваемой на вибратор, или по повышению температуры изделия. Установив эти значения и зная частоту колебаний, можно определить энергию затухания ΔW . Указанный метод можно использовать при высоких напряжениях, но он имеет малую точность и не пригоден для изучения материалов с малым внутренним трением.

Внутреннее трение и методы определения его характеристик. В процессе возникновения внутреннего трения в металлических изделиях часть механической энергии упругих колебаний преобразуется в теплоту. Внутреннее трение в металлах и сплавах зависит от их упругих свойств. Установлено несколько тепловых процессов, результатом которых является переход механической работы (энергии) в теплоту. Изменение объема твердого тела всегда сопровождается изменением его температуры. Когда твердое тело подвергается сжатию, его температура повышается; растяжение твердого тела сопровождается снижением температуры. Имеются

также тепловые потери, обусловленные теплоотдачей в окружающую среду.

Прямой метод определения внутреннего трения заключается в измерении отношения $\frac{\Delta W}{W}$ (ΔW — энергия, рассеянная в процессе одного цикла напряжения; W — упругая энергия, запасенная в изделии в момент максимальной деформации). Иногда $\frac{\Delta W}{W}$ называют коэффициентом поглощения. Эту величину можно определить в расчете на один цикл нагружения образца. Как установлено, она зависит от амплитуды и частоты циклических напряжений, а также от технологии изготовления изделия. В процессе свободных колебаний изделия амплитуда колебаний уменьшается за один период в $l^{N/2Mf}$ раз (N — показатель затухания колебаний; M зависит от формы и массы изделия; f — частота колебаний). Логарифмический декремент затухания в таком виде равен

$$\delta = \frac{N}{2Mf}. \quad (6.42)$$

При вынужденных колебаниях амплитуда сохраняется постоянной в том случае, когда энергия от вибратора полностью компенсирует потери энергии при затухании. Если E — постоянный уровень энергии колебаний и $f_c \Delta E$ — мощность, подводимая от вибратора (f_c — собственная частота колебания изделий), то емкость затухания выражается как

$$D = \frac{\Delta E}{E}. \quad (6.43)$$

Если подача энергии к изделию прекращается и амплитуда колебаний через τ , с, падает от значения A_0 до значения A_n , то емкость затухания определяется из соотношений

$$D = \frac{2 \ln \frac{A_0}{A_n}}{f_c \tau}. \quad (6.44)$$

Важной проблемой при измерении внутреннего трения по резонансному методу является потеря энергии на опорах крепления образца. Для устранения этих потерь изделие подвешивают на тонких проволоках или нитях. Однако и в этом случае в местах подвески образца энергия рассеивается. Если исключить постороннее демпфирование, то резонансный метод дает возможность определить характеристики внутреннего трения и упругие постоянные образца.

Определение внутреннего трения в твердых телах практически можно осуществить с помощью резонансного метода. Для возбуждения продольных колебаний используют кварцевые пьезокристаллы. Пьезокристаллы с помощью цемента закрепляют на торце испытуемого изделия и амплитуду колебаний измеряют

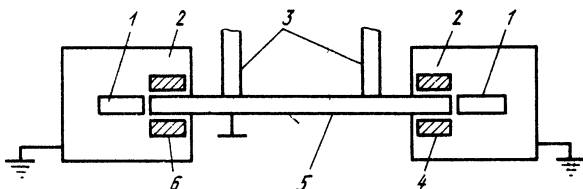


Рис. 6.26. Схема устройства для измерения внутреннего трения

с помощью диска Рэлея, подвешиваемого вблизи другого конца изделия.

Испытания проводят на стержнях из меди, алюминия и стекла при частотах примерно 40 кГц.

Разработано простое устройство для определения внутреннего трения при малых напряжениях. Устройство обеспечивает простоту закрепления образцов, непродолжительность измерения и высокую точность (отклонение до 1 %) (рис. 6.26). Образец 5 в виде стержня постоянного поперечного сечения подвешивают на двух проволоках 3. На катушку возбуждения 4 подается переменный ток, в результате чего в образце 5 наводятся вихревые токи. При взаимодействии поля магнита 1 с наведенными вихревыми токами возникает осевая сила, приложенная к одному концу образца 5. Движение от осевой силы передается через образец 5 с частотой переменного электрического тока на катушку возбуждения 4 со скоростью, равной скорости распространения звука в образце. На другом конце образца 5 под действием колебаний возникают вихревые токи, которые наводят переменное напряжение в детекторной катушке 6, установленной в медной камере 2 и окружающей этот конец образца 5.

Наведенное напряжение усиливается и после выпрямления подается на два отпирающих контура, которые подают импульсы напряжения в момент падения величины выпрямленного сигнала ниже некоторого определенного значения. Оба контура подсоединяются к схеме отсчета колебаний. Для измерения величины затухания усилитель вибратора с помощью электронного устройства отключается и колебания образца 5 становятся свободными. По мере уменьшения амплитуды свободных колебаний потенциал на выходе усилителя падает от некоторого заданного значения, в результате чего срабатывает отпирающий контур и включается счетчик. При дальнейшем затухании колебаний и падении выходного потенциала до другого заданного значения включается второй отпирающий контур, что приводит к отключению счетчика, т. е. счетчик регистрирует интервал времени, в течение которого происходит заданное падение потенциала на выходе усилителя.

Емкость затухания колебаний связана с измеряемой величиной соотношением

$$D = \log \frac{U_1 U_2}{f\tau}, \quad (6.45)$$

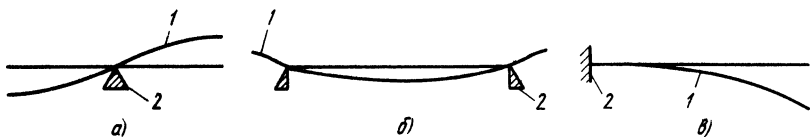


Рис. 6.27. Способы закрепления образцов:

a — в середине образца; *б* — на расстоянии $1/4$ длины образца; *в* — одного конца образца; 1 — образец; 2 — опора

где D — емкость затухания; U_1 — потенциал в момент начала работы счетчика; U_2 — потенциал в момент окончания работы счетчика; f — частота колебаний; τ — интервал времени, регистрируемый счетчиком.

Определение констант упругости твердых тел. В балках или стержнях могут быть вызваны продольные, поперечные и крутильные колебания. Каждое изделие обладает определенными характеристическими частотами, при которых происходит его вибрация. Эти характеристические частоты зависят от размеров, массы, формы, упругих свойств изделия. Для изделий простой формы можно установить соотношение между различными их параметрами и частотой колебаний. Если невозможно установить указанные соотношения математическим способом для изделий сложной формы, то эти зависимости определяют опытным путем.

При распространении продольной волны вдоль изделия частицы перемещаются параллельно длине изделия. Если изделие колеблется с любой из его характеристических частот, то в изделии появляются стоячие волны. Зафиксированный один конец стержня *b* считается узлом стоячей волны независимо от вида колебаний. В стоячей волне расстояние между соседними узлами или антиузлами всегда составляет половину длины волны. На рис. 6.27 приведены три способа закрепления изделия, которым соответствуют различные виды продольных колебаний.

Связь между параметрами изделия и частотой колебаний устанавливается по формулам:

первого способа закрепления (см. рис. 6.27, *a*)

$$\lambda = 2L \quad (6.46)$$

и

$$f = \frac{v}{2L}, \quad (6.47)$$

где λ — длина волны; L — длина стержня (изделия); f — резонансная частота при изгибе; v — скорость распространения волны в изделии.

Скорость распространения продольных волн в стержне определяется по зависимости

$$v = \sqrt{E/\rho}, \quad (6.48)$$

где E — модуль упругости; ρ — плотность материала стержня.

С учетом (6.48) формула (6.47) имеет вид

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.49)$$

Для второго способа закрепления (см. рис. 6.27, б) длина волны

$$\lambda = L. \quad (6.50)$$

Для стержня, который закреплен в середине или на расстоянии $L/4$ от каждого его конца, частоту колебаний можно определить по формуле

$$f = \frac{N}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6.51)$$

где N — целое число, зависящее от вида колебаний.

Для третьего способа закрепления (см. рис. 6.27, в) длина волны

$$\lambda = 4L, \quad (6.52)$$

а частоту колебаний стержня вычисляют по формуле

$$f = \frac{M_1}{4L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6.53)$$

где M_1 — целое нечетное число, зависящее от вида колебаний.

При приложении нагрузки к любому изотропному телу в нем возникают деформации двух видов: сжатия или удлинения в сочетании с изменением поперечного сечения тела и относительного перемещения плоскостей, параллельных направлению приложенной нагрузки. Сопротивление материала упругой деформации выражается упругими постоянными или модулями. Модуль упругости при осевом растяжении-сжатии обозначает сопротивление материала продольной деформации (удлинению), а модуль сдвига G характеризует сопротивление сдвигу. Коэффициент Пуассона μ выражает отношение сужения поперечного сечения тела к удлинению. Модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона связаны зависимостью

$$E = 2(1 - \mu)G. \quad (6.54)$$

Такая зависимость справедлива лишь для изотропного материала и не применима к таким материалам, как дерево. Дополнительные модули упругости можно определить по формулам:

$$E_f = f^2 CM_f \quad (6.55)$$

$$E_s = f_s^2 DM_s, \quad (6.56)$$

где E_f — динамический модуль упругости при изгибе; E_s — динамический модуль упругости при сдвиге; f — резонансная частота при изгибе; f_s — резонансная частота при кручении; C — коэффициент, зависящий от размеров и формы изделия, вида колебаний

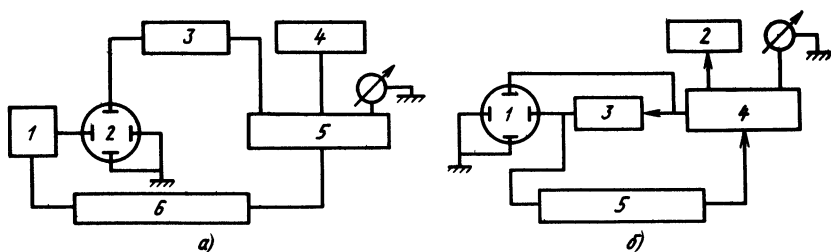


Рис. 6.28. Схемы получения упругих колебаний в образцах:

a — внешним возбуждением (1 — передатчик; 2 — осциллограф; 3 — фаза; 4 — счетчик; 5 — усилитель; 6 — контрольный образец); *б* — самовозбуждением (1 — осциллограф; 2 — счетчик; 3 — фаза; 4 — усилитель; 5 — контрольный образец)

и коэффициента Пуассона; D — коэффициент, зависящий от размеров изделия и вида колебаний; M — масса изделия.

Коэффициенты C и D определены экспериментально и приведены в справочных таблицах.

Упругие колебания образцов из металлов и сплавов определяют следующим образом. Выбирают (назначают) образец для испытания, например алюминиевый. Определяют у него модуль упругости и модуль сдвига при кручении.

Для определения упругих констант образцов используют прибор для измерения собственной частоты (0,6—25 кГц), приспособление для закрепления образца, пьезоэлектрическую систему возбуждения и регистрации колебаний, штангенциркуль, микрометрический винт и аналитические весы.

Чтобы получить упругие колебания в образцах длиной 100 мм и диаметром 10 мм с помощью электромеханических систем возбуждения, собственные колебания в образце возбуждают пьезоэлектрическими преобразователями.

Собственная частота колебаний принимается приемником, усиливается и указывается на цифровом устройстве в герцах. В случае резонанса, при котором частота возмущения совпадает с собственной частотой испытуемого образца, возникают высокие амплитуды колебаний, которые изображаются на экране осциллографа в виде фигур Лиссажу.

На рис. 6.28, *a* и *б* приведены схемы получения упругих колебаний внешним возбуждением и самовозбуждением образца.

Установление характеристик колебаний при растяжении, изгибе и кручении осуществляют посредством самовозбуждения или внешнего возбуждения (см. рис. 6.28) колебаний двух тонких проволочек. Эти тонкие проволочки переносят колебания пьезоэлектрического преобразователя (генератора) колебаний на образец, т. е. образец принимает частоты колебаний от пьезоэлектрического преобразователя.

При условии нахождения торцов проволочек под небольшим давлением можно возбудить колебания всех видов.

Теневой метод акустического контроля основан на ослаблении акустических волн под влиянием дефектов. Такой метод предусматривает применение двух преобразователей, один из которых излучает ультразвуковые колебания, другой принимает их. Ослабление сигнала зависит от площади сечения потока ультразвуковых излучений, площади отражающей поверхности дефекта и его расположения по толщине изделия.

Для теневого метода ультразвукового контроля необходим доступ к изделию с обеих сторон, так как ультразвуковые колебания вводятся с одной стороны изделия, а принимаются с другой.

Теневой метод в основном применяют для контроля качества плит, профилей, листового проката, сварных конструкций и т. д.

Эхоимпульсный акустический метод основан на подаче к контролируемому изделию коротких импульсов ультразвуковых колебаний и приеме отраженных эхосигналов от дефектов или границы раздела двух сред металл—воздух. Основные показатели эхометода, определяющие область его применения: точность определения координат обнаруженного дефекта, чувствительность, разрешающая способность, мертвая зона и др.

Чувствительность эхометода определяется минимальной площадью дефекта, четко выявляемого и регистрируемого ультразвуковым дефектоскопом.

При этом необходимо учитывать акустические характеристики материала испытываемого изделия, глубину залегания дефекта, а также материал и размеры преобразователей, частоту ультразвуковых колебаний.

Разрешающая способность — это минимальное расстояние между двумя дефектами, расположенными в направлении подачи ультразвуковых колебаний. Эхосигналы от дефектов регистрируются раздельно индикатором дефектоскопа.

Мертвая зона определяется минимальным расстоянием между дефектом и точкой ввода ультразвуковых колебаний. Эхосигналы от дефекта и от поверхности изделия в виде ультразвуковых излучений (зондирующий импульс) раздельно регистрируются индикатором эходефектоскопа. Величина временной мертвой зоны зависит в основном от длительности возбуждающего импульса и скорости распространения ультразвука в материале контролируемого изделия.

Акустико-эмиссионный метод. По этому методу ультразвуковая волна проходит через изделие и фокусируется на детекторной камере, где и формируется изображение. Камера заполнена жидкостью большой вязкости, в которой взвешены алюминиевые частицы размером 5—25 мкм. Если ультразвуковое излучение отсутствует, то частицы находятся в неоднородном, хаотическом состоянии, что является результатом тепловых перемещений. Ориентация частиц зависит от интенсивности ультразвукового излучения в данной точке теневого изображения. Поэтому изменение интенсивности отраженного излучения определяет количе-

ство ультразвуковой энергии, прошедшей через испытуемое изделие. Дефектам соответствуют темные участки изображения.

Акустико-эмиссионным методом определяют расслоение, усадочные раковины, пористость, трещины, пустоты, ликвации и другие дефекты сложных изделий и сварных конструкций.

Для ультразвукового контроля используется универсальная и специализированная дефектоскопическая аппаратура отечественного и зарубежного производства. Наибольшее распространение получили отечественные универсальные ультразвуковые дефектоскопы мод. УДМ-1М, ДУК-6В, ДУК-65, которые применяют в качестве составных элементов специализированных контрольных установок. Разработаны установки для ультразвукового контроля труб диаметром 6—500 мм: ИДЦ-3М, ИДЦ-10, УДТ-4М, УДТ-4, «Микрон-3», «Микрон-4», «Микрон-5», ИДЦ-6, ИДЦ-8, «Ротор-120», БУР-1М, «Комплекс», «Днепр-1» и «Днепр-2». Используются также установки зарубежного производства: РОТ-50, РОТ-120, РСК-500 (ФРГ), Гелискан ХЛ/Б и Гелискан 10/18 (Англия).

Для контроля мелкозернистых металлических материалов и изделий применяется ультразвуковой структурный анализатор АСК-1 с частотой ультразвука 10 и 20 МГц. Прибор ДСК-1 предназначен для относительного структурного анализа металлов, а также для измерения абсолютных значений затухания и скорости распространения колебаний.

В СССР и за рубежом применяются новые способы обработки информации с применением вычислительной ультразвуковой голографии. Для этого используют, например, пьезопреобразователи, с помощью которых сканируют (считывают) информацию с определенного участка (порядка 200×200 мм) поверхности контролируемого изделия. Получаемую при этом информацию направляют в память ЭВМ. Дальнейшую обработку всей информации, полученной на большом участке сканирования, выполняют на ЭВМ, используя те же алгоритмы, которые реализуются в оптической голографии при наложении световых лучей. Способ позволяет точнее установить форму и размеры дефектов и более обоснованно судить о влиянии их на работоспособность изделия.

6.13. Методы капиллярного контроля

Классификация методов капиллярного контроля. Капиллярный контроль широко применяют для обнаружения дефектов в деталях из латуни, коррозионно-стойкой стали, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, пластмасс, стекла, пористого бетона и др.

Из многих методов капиллярного контроля наиболее распространены цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной. Они основаны на капиллярных явлениях. Капилляр, выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны, называют поверхностной несплошностью, а сквозной капилляр, соединяющий противоположные стенки объекта контроля, —

сквозной несплошностью. При капиллярном контроле индикаторные жидкости заполняют полости поверхностных и сквозных несплошностей. Образующиеся индикаторные следы регистрируются визуально или с помощью преобразователя. Индикаторный след (рисунок) появляется при нанесении на поверхность детали проявителя, предназначенного для извлечения индикаторной жидкости из полости несплошности. Кроме того, при этом создается фон для лучшей контрастности рисунка.

Индикаторный рисунок и выявляет расположение, форму, длину несплошности.

Капиллярные методы подразделяются по способу выявления индикаторного рисунка.

При цветном методе индикатором служит проникающая жидкость, которая образует индикаторный рисунок на фоне поверхности объекта контроля.

При люминесцентном методе используют проникающие жидкости, способные люминесцировать под воздействием ультрафиолетового излучения на фоне поверхности объекта контроля.

Люминесцентно-цветной метод включает элементы люминесцентного и цветного методов. Проникающая жидкость может люминесцировать в ультрафиолетовых лучах, а также имеет видимую при обычном освещении окраску. Осмотр деталей можно производить как при обычном освещении, так и при ультрафиолетовом излучении.

Подготовка деталей к контролю. Поверхность контролируемой детали и полости несплошностей перед контролем должны быть тщательно очищены. Различные покрытия (гальванические, лакокрасочные и т. д.) снижают эффективность контроля.

Жидкости (бензин, керосин, органические растворители, вода и т. д.), попавшие в полости несплошностей, препятствуют проникновению в них индикаторных жидкостей и тем самым снижают интенсивность окраски или люминесценцию рисунка.

Применяют паровой, механический, химический и электрохимический способы очистки, а также сушку, промывку водой, органическими растворителями и т. д.

При выборе способа подготовки деталей к контролю необходимо учитывать: материал изделия, характер загрязнения, вид покрытия, вид обработки, предшествовавший контролю.

Основные операции капиллярного контроля следующие:

- подготовка деталей к контролю;
- нанесение на детали проникающей жидкости;
- удаление избытка проникающей жидкости с поверхности деталей;
- нанесение проявителя;
- осмотр деталей;
- окончательная очистка деталей (удаление проявителя и следов других дефектоскопических материалов с их поверхности).

По характерным признакам индикаторного рисунка определяют характер дефекта: трещины имеют вид сплошных, иногда прерывистых линий различной конфигурации; межкристаллитная коррозия выявляется в виде пятен, размытых полос; поры — в виде отдельных точек.

Чувствительность методов капиллярного контроля зависит от качества проведения каждой операции контроля, от качества дефектоскопических материалов, освещения, температуры окружающей среды и т. д. Под чувствительностью понимают раскрытие несплошности типа единичной трещины определенной длины, выявленное с заданной вероятностью по заданным геометрическому или оптическому параметрам следа.

Чувствительность люминесцентного метода составляет по ширине несплошности 10 мкм и по глубине 30—40 мкм, цветного — по ширине несплошности 1—2 мкм и по глубине 10—30 мкм.

Аппаратура для проведения капиллярного контроля. Дефектоскопы бывают переносные, передвижные и стационарные.

Переносное и передвижное оборудование предназначено для контроля деталей в полевых условиях, на ремонтных предприятиях, при необходимости контроля небольших участков без разборки контролируемого узла.

Стационарное оборудование используется при массовом контроле деталей на участках капиллярной дефектоскопии. Транспортировка деталей от одной операции к другой может быть механизирована (люминесцентный дефектоскоп ЛДП-3). Имеются автоматизированные установки для люминесцентной и цветной дефектоскопии, в которых автоматизированы режимы технологических операций контроля деталей, за исключением визуального контроля, проводимого оператором (автоматическая установка УКЛ-1).

В качестве источников ультрафиолетовых излучений применяются газоразрядные ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления. Отечественной промышленностью выпускаются лампы типов ДРТ-2, ДРТ-4, ДРТ-5, ДРТ-7, СВД-120А, ДРШ-250, ДРШ-500, ДРШ-1000. Все эти лампы являются источниками ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения. Для выделения ультрафиолетового излучения применяют светофильтры типов УФС-1, УФС-2, УФС-3, УФС-4, УФС-6, УФС-8.

Разработаны и выпускаются промышленностью лампы для люминесцентной дефектоскопии, не требующие применения светофильтров. Это лампы типов ДРУФ-125 и ДРУФ3-125.

Так как при капиллярной дефектоскопии используются токсичные материалы и эксплуатируются электроустановки, необходимо строго соблюдать правила техники пожаро- и взрывобезопасности, а также санитарно-гигиенические правила, обеспечивающие безопасность работающих.

6.14. Методы течеискания

Классификация методов течеискания. Течеискание — вид неразрушающего контроля, обеспечивающего выявление сквозных дефектов в изделиях. Методы течеискания основаны на применении пробных веществ, проникающих через течи и регистрируемых средствами течеискания. В качестве пробных веществ применяют жидкость, газы, пары легколетучих жидкостей. В зависимости от пробного вещества методы разделяют на жидкостные и газовые. Наиболее широко используют газы, которые обеспечивают более высокую чувствительность.

Течь — это канал или пористый участок изделия, нарушающие его герметичность. Под герметичностью понимают свойство изделий препятствовать проникновению через их стенки жидкости, газа или пара.

Кроме сквозных дефектов, которыми являются ранее указанные каналы, пробные вещества могут проникать через перегородки в результате диффузии, например, стекло или резина проницаемы для гелия.

Различают схемы с внутренним и внешним избыточными давлениями. В первом случае давление внутри объекта контроля выше, чем снаружи, а во втором — наоборот. Если избыточное давление выше атмосферного, то такой способ называют опрессовкой или компрессионным способом. Если для создания разности давлений из объекта контроля или камеры, в которую он помещен, удаляют воздушную среду, то способ контроля называют вакуумным. Если вакуум в камере — это способ вакуумной камеры; если в камере пробный газ, например гелий — способ гелиевой камеры.

К наиболее распространенным методам течеискания относятся масс-спектрометрический, галогенный, пузырьковый, манометрический и жидкостный.

Масс-спектрометрический метод контроля. Гелиевый течеискатель, в котором в качестве пробного газа применяется гелий, обладает высокой чувствительностью при проведении испытаний на герметичность. Промышленный гелиевый течеискатель может обнаружить присутствие одной части гелия в 10 миллионах частей воздуха. Это соответствует утечке гелия менее 1 см^3 газа в год при нормальных температуре и давлении. Гелиевый течеискатель представляет собой портативный прибор, спроектированный в расчете на максимальную чувствительность к гелию. Молекулы газа, входящие в прибор, бомбардируются электронами, испускаемыми нагретой нитью. Образовавшиеся в результате этой бомбардировки ионы ускоряются и фокусируются электрическим полем. Затем ионы проходят между полюсами постоянного магнита, магнитное поле которого отклоняет ионы и заставляет их двигаться по круговым орбитам. Ионы, имеющие равные массы, после выхода из магнитного поля собираются в одной

точке. Гелиевый течейскаатель устроен таким образом, что в нем накапливаются только ионы гелия. Поток ионов гелия образует слабый электрический ток, который может быть усилен и использован для того, чтобы привести в действие электрический прибор, регистрирующий уровень звукового сигнала.

Гелий используют для обнаружения утечек потому, что он является инертным газом и не реагирует с другими газами, а также с материалом испытываемого изделия. Гелий имеет малый атомный вес, свободно проникает через небольшие щели. Применяют следующие способы испытаний на герметичность с использованием гелиевого течейскаателя: способ обдува; способ гелиевых чехлов и камер; вакуумных камер; способ испытаний накоплением пробного вещества в вакууме; с использованием вакуумных присосок; с накоплением в чехлах пробного газа.

Серийно выпускаемый масс-спектрометрический течейскаатель СТИ-11 имеет порог чувствительности к потоку пробного газа $5 \cdot 10^{-16}$ Вт. Масса течейскаателя 260 кг, а переносной течейскаатель ТИ1-14 имеет порог чувствительности $5 \cdot 10^{-13}$ Вт, он состоит из двух блоков — вакуумного и регистрационного.

Галогенный метод. Действие галогенного течейскаателя основано на резком увеличении эмиссии положительных ионов щелочных металлов в чувствительном элементе при появлении в пробном газе галогенов (веществ, в состав которых входят элементы группы галоидов: фтор, хлор, бром и йод). Чаще всего в качестве пробных веществ используют пары соединений, содержащих фтор-фреоны (хладоны) различных марок. Хладоны — легколетучие жидкости, давление их насыщенного пара при комнатной температуре равно (6—30) 10^3 Па. Вещества эти не имеют запаха, безвредны, неагрессивны.

Простейший галогенный течейскаатель представляет собой галоидную горелку, состоящую из емкости для газа и латунной пластинки. Газ зажигается и нагревает латунную пластинку. В присутствии газообразного галоида цвет пламени меняется, что указывает на образование галоида меди.

Галогенный метод основан на том, что эмиссия положительных ионов с накаливаемой металлической поверхности увеличивается при попадании на нее галогенов. Для того чтобы пробный газ постоянно протекал над поверхностью нагретого до 800 °С галогеночувствительного элемента, в прибор встроены всасывающий вентилятор.

Промышленностью выпускаются галогенные течейскаатели типов БГТИ-7 и ГТИ-6. Прибор ГТИ-6 имеет массу 10 кг, питается от сети и имеет преобразователи двух типов: атмосферный — с порогом чувствительности $1 \cdot 10^7$ Вт и вакуумный — $1 \cdot 10^{-9}$ Вт. Прибор БГТИ-7 — портативный, он имеет массу 5,5 кг, питается от батареи, его порог чувствительности к потоку пробного газа $5 \cdot 10^7$ Вт. Галогенный метод используют, когда не требуется высокая чувствительность.

Пузырьковый метод заключается в регистрации пузырьков пробного газа, проникающего через течи в изделии, погруженном в жидкость или покрытом мыльной или другой пленкой, способной образовывать пузыри.

Чувствительность этого метода может быть достаточно высокой при использовании высоких давлений. Установлено, что хорошие результаты испытаний получают при использовании в качестве наполнителя сосудов смеси водорода и эфира, так как эфир имеет малое поверхностное натяжение, а водород характеризуется высокой проницаемостью. Оба вещества взрывоопасны, их можно заменить гелием.

Создавать давление в испытуемом изделии следует до его погружения в жидкость, так как для обнаружения небольших отверстий, заполненных жидкостью, требуется значительное давление. Для осмотра изделия следует применять лупу с двух-трехкратным увеличением, помещенную на расстоянии 100—150 мм от изделия.

Преимущества пузырьковых испытаний следующие: не требуются дорогостоящие приборы, быстрота испытаний, возможность точного определения нахождения дефекта, а также испытание всего изделия одновременно. Жидкость для пузырьковых испытаний должна иметь малое поверхностное натяжение и малую вязкость.

При использовании пузырькового метода возможен контроль в воздушной среде. Первым этапом при испытании сварных сосудов в воздушной среде является воздушная опрессовка. В сосуде создается определенное давление воздуха и места утечки обнаруживаются с помощью мыльного раствора, наносимого на поверхность сварных швов. Применяют также химические индикаторы для обнаружения утечки газов, вводимых во внутренние полости сосудов. Поверхность сварного шва зачищают и покрывают белым фенолфталеиновым индикатором. После этого в высушенный сосуд вводят аммиачно-воздушную смесь.

При утечке газа через сварной шов белая окраска индикатора изменяется на ярко-розовую. Индикатор состоит из смеси: 5 частей 2 %-ного раствора фенолфталеина в спирте, 2 частей дистиллированной воды, 10 частей глицерина и до 5 частей порошка окиси титана. Кроме этого, применяют смесь аммиака и двуокиси серы.

Жидкостный метод. При жидкостном испытании дефекты находят по проникновению жидкости в полости дефектов и через эти полости. Наиболее простой метод — гидростатическая опрессовка. Внутри испытуемого изделия создается давление, превышающее наружное давление. Для создания разности давлений в изделии используют воду, масло, воздух и т. п. Давление при опрессовке должно повышаться постепенно. Места утечек можно обнаружить по фильтрации воды или газа. Наличие утечек определяют также по изменению давления жидкости или газа.

Жидкостный метод испытаний применяется для контроля работающих под давлением сварных сосудов, трубопроводов или трубной арматуры, открытые концы которых могут быть заглушены. Сосуды подвергают гидравлической опрессовке, при этом давление испытаний в 1,5—2 раза превышает рабочее давление. Утечка может быть обнаружена в течение 24 ч после проведения испытаний.

Манометрический метод основан на регистрации изменения полного давления в системе испытаний в результате перетекания проникающих веществ через течи. Существуют абсолютный и дифференциальный методы. Абсолютным методом герметичность оценивают по показаниям одного или нескольких манометров, измеряющих давление в одном и том же объеме газа. При дифференциальном методе измеряют разность показаний двух манометров, на один из которых пробный газ не действует. Наиболее простой вариант реализации манометрического метода — измерение давления опрессовки в объекте контроля либо в камере, в которую помещен объект контроля. При этом объект или камера отсечены (отключены) от насоса. Порог чувствительности вакуумного манометрического метода не превышает значений 10^{-3} — 10^{-4} Вт.

Манометрическим методом в основном контролируют прочность сварных изделий. Для контроля изменения давления применяются гидростатические, дифференциальные и электрические манометры, напоромеры, тягомеры, а также мембранные элементы УСЭПА и сигнализаторы давления.

При проведении испытаний на герметичность необходимо выполнять требования противопожарной безопасности и соблюдать правила безопасной работы с электрооборудованием.

Гидравлические испытания проводят либо в бронекабине, либо на огражденном участке с расстоянием от объекта контроля до ограждения не менее 10 м. На ограждении делают предупреждающие надписи. Дефектоскописты при осмотре мест течи в процессе гидроиспытаний должны пользоваться прозрачными щитами, предохраняющими лицо от струй воды.

Периодически необходимо проверять исправность арматуры, манометров, клапанов, заглушек и других узлов; увеличивают и снижают давление в контролируемом изделии постепенно без гидравлических ударов. Запрещается ремонтировать оборудование, производить переключения при наличии давления в системе.

Течейскатели нельзя ремонтировать, если прибор находится под электрическим напряжением. На участке, где проводят контроль галогенными течейскателями, недопустимо наличие открытого пламени, нагретых поверхностей, так как в этом случае фреоны могут разлагаться с образованием ядовитых газов. Помещение, где проводят контроль, должно иметь хорошую венти-

ляцию, водопровод, систему подачи сжатого воздуха, дренажную систему и систему сброса газов для повторного использования.

6.15. Радиографический и радиоскопический методы

Основные сведения о радиографии. Сущность метода радиографии заключается в том, что интенсивность излучения (рентгеновского и γ -излучения) изменяется при наличии в контролируемом изделии внутреннего дефекта.

Наиболее распространенным методом промышленной радиографии является рентгенография. Источник излучения — рентгеновские аппараты с $U \leq 1000$ кВ, $I \leq 25$ мА. Просвечивание изделий производится на радиографическую пленку (черно-белую и цветную). Расшифровку радиографических снимков и оценку качества контролируемого изделия производят опытные операторы-расшифровщики.

На снимках выявляют следующие дефекты сварных соединений: трещины продольные и поперечные; непровары; поры, газовые включения; шлаковые включения, а также наружные дефекты — прожоги, подрезы, утяжины.

При промышленной радиографии используют в основном схемы просвечивания, обеспечивающие контроль качества шва, плоских изделий и изделий типа полых тел вращения. Схемы просвечивания сварных конструкций рекомендованы ГОСТ 7512—82.

Чувствительность просвечивания и производительность контроля зависят от правильного выбора источника излучения, радиографической пленки и усиливающего экрана. При контроле изделий с протяженными швами или швами сложной конфигурации их разбирают на участки таким образом, чтобы схемы просвечивания соответствовали схемам, рекомендуемым ГОСТ 7512—88. При просвечивании через две стенки сварных соединений труб малого диаметра используют схему просвечивания со смещением источника излучения на расстояние, зависящее от радиуса трубы, ширины шва и фокусного расстояния. Смещение позволяет избежать наложения изображения участка шва, обращенного к источнику излучения, на изображение участка шва, обращенного к пленке.

Изделия типа полых тел вращения контролируют по схемам просвечивания с разверткой изображения изделия на одном снимке. Изделие и радиографическая пленка синхронно перемещаются, в то время как источник излучения остается неподвижным.

Подготовка изделий к просвечиванию состоит в очистке их от шлака, масла и других загрязнений, удалении всех наружных дефектов.

Радиографическая пленка реагирует на прошедшее через объект излучение. Она состоит из основы (целлюлоза, стекло,

бумага) и равномерно нанесенного на нее светочувствительного слоя — эмульсии бромистого серебра, равномерно в виде зерен распределенного в желатине. Эмульсию наносят с обеих сторон. Толщина покрытия примерно 0,025 мм. При облучении пленки рентгеновским или γ -излучением в кристаллах бромистого серебра происходят изменения, приводящие к тому, что кристалл становится способным к проявлению, т. е. восстановлению металлического серебра под действием проявителя.

Ручная фотообработка радиографических снимков включает проявление, промежуточную промывку, фиксирование, окончательную промывку и сушку пленки. Предварительно пленку закрепляют в рамке или устанавливают в специальной кассете. Затем рамку или кассету опускают в бак с проявителем. Время проявления зависит от температуры раствора, а также от числа пленок, обработанных в этом растворе.

Время проявления составляет 5—12 мин при 16—24 °С. После проявления производят промежуточную промывку, после чего пленку фиксируют в течение 10—20 мин при 18—20 °С. Затем следует окончательная промывка в проточной воде в течение 20—30 мин при 18—20 °С. Сушку радиографических снимков проводят в комнатных условиях в течение 3—4 ч либо в специальных сушильных шкафах в течение 15—25 мин при температуре воздуха 28—35 °С.

Основные сведения о радиоскопии. Радиоскопический метод испытания изделий основан на преобразовании радиационного изображения испытываемого изделия в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя. Обнаружение дефектов изделия предусматривается непосредственно в процессе испытаний.

Методы радиоскопии позволяют исследовать контролируемое изделие непосредственно в момент его просвечивания, поэтому сокращается время между началом контроля и моментом получения заключения о качестве контролируемого изделия.

Благодаря малой инерционности радиоскопических систем изделия можно контролировать под разными углами к направлению просвечивания. При этом повышается вероятность обнаружения дефектов и обеспечивается возможность контроля деталей и узлов в эксплуатационных условиях.

Для проведения радиоскопии используют радиационные интроскопы—устройства, позволяющие получать информацию о внутреннем строении материалов и изделий и отображающие ее на выходном экране радиационно-оптического преобразователя в виде светотеневых картин. Преобразователем радиационного изображения называют устройство для преобразования изображения, сформированного ионизирующим излучением в результате его взаимодействия с изделием, в изображение другого вида. Наиболее распространены радиационно-оптические преобразователи, дающие световое изображение.

Радиоскопия применяется, как и радиография, для выявления дефектов в сварных и паяных соединениях, трубах, отливках и других изделиях. Для радиоскопии применяются те же пленки, что и для радиографии дефектов различных изделий.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные дефекты металлов и сплавов.
2. В чем заключается тепловой метод определения дефектов изделий?
3. Что такое термопара? Из каких элементов она состоит?
4. Назовите методы измерения плотности металлов и сплавов.
5. Назовите виды дилатометров и расскажите, для каких целей они применяются.
6. Приведите основные методы определения магнитных характеристик металлов и сплавов.
7. Укажите основные электрические методы определения дефектов в металлических изделиях.
8. Расскажите об акустических методах испытания изделий.

ИСПЫТАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

7.1. Испытания строительных материалов и изделий

К строительным материалам относят щебень, гравий, брусчатку, гранит, кварцит, мрамор, кирпич, цемент, бетон и другие материалы. Строительные материалы испытывают на сжатие, прочность сцепления, износ, изгиб и т. д.

При испытании цементов всех видов определяют тонкость помола, нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста, равномерность изменения объема цемента, предел прочности при изгибе и сжатии образцов-балочек, изготовленных из цементного раствора.

Испытание на сжатие. При испытании горной породы определяют предел прочности образцов при сжатии. Образцы доводят до разрушения на гидравлическом прессе. Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью 0,5 МПа/с. Предел прочности вычисляют с точностью до 1 МПа по формуле

$$R_{сж} = P/F, \quad (7.1)$$

где P — разрушающее усилие прессы, Н; F — площадь поперечного сечения образца, мм².

При испытании кирпича и камней силикатных определяют предел прочности при сжатии образцов стандартных размеров (ГОСТ 379—79).

Из числа изделий, соответствующих требованиям ГОСТ 379—79 по внешнему виду и размерам, отбирают для определения предела прочности при сжатии 5 шт. камней или полнотелого кирпича, или 10 шт. пустотелого кирпича; 3 кирпича или камня — для определения водопоглощения; 10 камней или полнотелых кирпичей и 20 пустотелых кирпичей — для определения морозостойкости.

Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе установлены ГОСТ 8462—85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе». Испытания проводят на гидравлическом прессе. Предел прочности при сжатии кирпича определяют на образцах, состоящих из двух целых кирпичей или из двух его половинок, а предел прочности кам-

ней — на целом камне. Кирпич делят на половинки распиливанием или раскалыванием (см. прил. 1 ГОСТ 8462—85).

Кирпичи или его половинки укладывают друг на друга. Половинки размещают поверхностями раздела в противоположные стороны. Для соединения частей образца и выравнивания опорных поверхностей используют цементный раствор (см. обязательное прил. 2 ГОСТ 8462—85). При подготовке образцов выравнивают поверхности, которые в конструкции располагаются перпендикулярно направлению сжимающей нагрузки. Образцы измеряют с погрешностью до 1 мм. Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20—60 с после начала испытаний. Предел прочности вычисляют по формуле (7.1).

Для определения предела прочности цемента при изгибе и сжатии (ГОСТ 310.4—81) изготавливают образцы-балочки из цементного раствора, состоящего из цемента и песка (соотношение 1 : 3). Соотношение количеств воды и цемента должно быть не менее 0,4. Раствор должен иметь такую консистенцию, чтобы расплыв конуса при В/Ц, 0,4 составлял 106—115 мм. Для каждого установленного срока испытаний изготавливают по три образца. Для испытаний на сжатие используют полученные после испытаний на изгиб шесть половинок балочек. Половинку балочки помещают между двумя пластинками таким образом, чтобы боковые грани, которые при изготовлении образцов прилегали к стенкам формы, находились на плоскости пластинок, а упоры пластинок плотно прилегали к торцовой гладкой плоскости образца. Затем образец вместе с пластинами центрируют на опорной плите пресса. Средняя скорость нарастания нагрузки при испытании должна быть $(2,0 \pm 0,5)$ МПа/с. Предел прочности вычисляют по формуле (7.1).

Испытание на прочность сцепления. Прочность сцепления отделочного покрытия с поверхностью силикатных кирпича и камней (ГОСТ 379—79) определяют для каждой марки изделия один раз в месяц путем отрыва металлической пластинки толщиной 3—5 мм и размером 20×20 мм, приклеенной к отделочному покрытию. Пластинку с петлей приклеивают к покрытию изделий тонким слоем быстротвердеющего клея БФ-2 или эпоксидного клея состава, массовые доли: 100 смолы ЭД-6, 10 полиэтиленполиамины, 250 портландцемента. Перед отрывом по периметру пластинки производят надрез покрытия. Отрыв покрытия производят не ранее чем через двое суток после выдержки образцов при комнатной температуре.

Прочность сцепления $R_{сц}$ определяют по формуле

$$R_{сц} = P/F, \quad (7.2)$$

где P — разрушающая нагрузка; F — площадь отрыва покрытия.

Испытание на износ. Истираемость (износ) щебня (гравия) определяют по потере массы зерен при испытании пробы в по-

лочном барабане с шарами (чугунными или стальными). Барабан вращается со скоростью 30—33 об/мин.

Истираемость щебня U , %, определяют по формуле

$$U = \frac{m - m_1}{m} 100, \quad (7.3)$$

где m — масса пробы щебня (гравия), г; m_1 — суммарная масса остатков на предохранительном и контрольном ситах, г.

Испытание на изгиб. При испытании на изгиб керамического и силикатного кирпича (ГОСТ 8462—85) определяют предел прочности при изгибе на целом кирпиче. Образец устанавливают на двух опорах пресса. Нагрузку прикладывают в середине пролета и равномерно распределяют по ширине образца.

Нагрузка на образец должна возрастать непрерывно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20—60 мин после начала испытаний.

Предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа, вычисляют по формуле

$$R_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (7.4)$$

где P — разрушающая нагрузка, Н; l — расстояние между осями опор, см; b — ширина образца, см; h — высота образца посередине пролета, см.

Определение нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста. Методы испытаний установлены ГОСТ 310.3—76. В лабораторных условиях для приготовления цементного теста применяют чашу сферической формы, изготовленную из коррозионно-стойкой стали. Лопатку для перемешивания изготовляют из упругой коррозионно-стойкой стали.

Для испытаний применяют прибор Вика с иглой и пестиком.

Нормальной густотой цементного теста считают такую его консистенцию, при которой пестик прибора Вика, погруженный в кольцо, заполненное тестом, не доходит на 5—7 мм до пластинки, на которой установлено кольцо. Нормальная густота цементного теста характеризуется количеством воды, необходимым для затворения, выраженным в процентах от массы цемента.

Для определения сроков схватывания готовят цементное тесто: 400 г цемента высыпают в чашу и вливают воду в количестве, необходимом для получения теста нормальной густоты. Продолжительность перемешивания и растирания — 5 мин с момента приливания воды. Началом схватывания цементного теста считают время от начала затворения (момента приливания воды) до момента, когда игла не доходит до пластинки на 2—4 мм. Концом схватывания теста считают время от начала затворения до момента, когда игла опускается в тесто не более чем на 1—2 мм.

Тонкость помола цемента определяют по остатку на сите. Пробу цемента, подготовленную по ГОСТ 310.1—76, высушивают

в сушильном шкафу при температуре 105—110 °С в течение 2 ч и охлаждают в эксикаторе. На сито прибора для механического просеивания высыплют 50 г цемента (точность отвешивания до 0,05 г). Закрыв сито крышкой, устанавливают его в прибор для механического просеивания. Через 5—7 мин от начала просеивания останавливают прибор, осторожно снимают доннышко и высыплют из него прошедший через сито цемент, прочищают сетку с нижней стороны мягкой кистью, вставляют доннышко и продолжают просеивание.

Операцию просеивания считают законченной, если при контрольном просеивании сквозь сито проходит не более 0,05 г цемента.

Контрольное просеивание выполняют вручную при снятом доннышке прибора на бумагу в течение 1 мин. Тонкость помола цемента определяют как остаток на сите с сеткой № 008 в процентах к первоначальной массе просеиваемой пробы с точностью до 0,1 %.

Определение равномерности изменения объема цемента. Для испытания готовят тесто нормальной густоты. Две навески теста массой 75 г каждая, приготовленные в виде шарика, помещают на стеклянную пластинку, предварительно протертую машинным маслом. Постукивают ею о твердое основание до образования из шариков лепешек диаметром 7—8 см и толщиной в середине около 1 см. Затем лепешки заглаживают смоченным водой ножом от наружных краев к центру до образования острых краев и гладкой закругленной поверхности. Эти лепешки хранят в течение 24 ± 2 ч с момента изготовления в ванне с гидравлическим затвором, а затем подвергают испытанию кипячением. По истечении времени хранения две цементные лепешки вынимают из ванны, снимают с пластинок и помещают в бачок с водой на решетку. Воду в бачке доводят до кипения, которое поддерживают в течение 3 ч, после чего лепешки в бачке охлаждают и производят их внешний осмотр немедленно после извлечения из воды.

Цемент отвечает требованиям стандарта в отношении равномерности изменения объема, если на лицевой стороне лепешек не обнаружено радиальных доходящих до краев, трещин или сетки мелких трещин, видимых невооруженным глазом или в лупу, а также каких-либо искривлений и увеличения объема лепешек.

7.2. Испытания текстильных материалов

Текстильные материалы подвергают испытанию на прочность, на разрыв, стойкость к истиранию и жесткость при изгибе и т. д.

Испытания при растяжении (ГОСТ 3813—72). Испытывают текстильные материалы и изделия из волокон и нитей всех видов. При этом определяют:

разрывную нагрузку — наибольшее усилие, выдерживаемое пробными полосками при растяжении их до разрыва, выраженное в ньютонах;

удлинение при разрыве — приращение длины растягиваемой пробной полоски в момент разрыва к зажимной длине пробной полоски, выраженное в процентах;

удлинение при стандартной разрывной нагрузке — приращение длины растягиваемой пробной полоски в момент достижения нормы разрывной нагрузки, предусмотренной стандартами или техническими условиями на ткани или штучные изделия; раздирающую нагрузку — усилие, необходимое для дальнейшего раздиранья специально надрезанной пробы, выраженное в ньютонах.

Испытания текстильных материалов производят на разрывных машинах: машина РМ-30-1 для испытания одиночного волокна, машина ДШ-3М-2 для испытания штапеля, машина РМ-3-1 для испытания одиночной нити, машина для испытания пасмой (мотком), установка ИТ-3 для испытания ткани на износ.

7.3. Испытания пластических масс

Изделия, изготовленные из пластических масс прессованием, формованием, на основе органического связующего вещества, подвергают испытаниям на растяжение, сжатие, на статический изгиб, на определение модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе, на абразивный износ, а также определяют их твердость.

Испытание на растяжение. При испытании определяют: прочность при растяжении; при разрыве; предел текучести при растяжении; условный предел текучести; относительное удлинение при максимальной нагрузке; относительное удлинение при разрыве; относительное удлинение при пределе текучести.

Образцы для испытания изготавливают механической обработкой или прессованием. При изготовлении образцов механической обработкой из изделий и полуфабрикатов, в том числе из листов и пластин, максимально допустимая толщина должна быть 3 мм для образцов типа 1 (ГОСТ 11262—80), соответствовать толщине изделия или полуфабриката, но не более 10 мм для образца типа 2. Образцы типов 1, 2 и 3 имеют каждый общую длину 115 мм, 150 мм и 250 мм, ширину рабочей части 6 мм, 10 мм и 25 мм, причем образцы типа 1 и 2 имеют утоненную часть в середине.

Испытание на сжатие. При испытании пластмасс на сжатие (ГОСТ 4651—82) определяют разрушающее напряжение при сжатии ($\sigma_{ср}$), напряжение сжатия при пределе текучести ($\sigma_{сг}$), напряжение сжатия при условном пределе текучести ($\sigma_{сгу}$) и напряжение сжатия при установленной условной деформации ($\sigma_{сд}$), МПа, по формуле

$$\sigma = F/A_0, \quad (7.5)$$

где F — нагрузки, соответствующие вычислению $\sigma_{ср}$, $\sigma_{ст}$, $\sigma_{сту}$, $\sigma_{сд}$, Н; A_0 — площадь минимального начального сечения образца, мм².

Образцы для испытания имеют форму прямоугольной призмы, прямого цилиндра или прямой трубки; высота образца может быть 35, 40, 45 и 50 мм. Число образцов из изотропных пластмасс — не менее 10 (не менее пяти — для каждой оси анизотропии).

Испытательная машина при испытании на сжатие должна обеспечивать измерение нагрузки с погрешностью не более 1 %. Измеритель нагрузки должен быть практически безынерционным.

Испытание на статический изгиб. Определяют разрушающее напряжение при изгибе ($\sigma_{и}$), напряжение при изгибе при заданной величине прогиба ($\sigma_{и.п}$), максимальное напряжение при изгибе ($\sigma_{и.маx}$) по формуле

$$\sigma_{и} (\sigma_{и.п}, \sigma_{и.маx}) = \frac{M}{W}, \quad (7.6)$$

где M — изгибающий момент; W — момент сопротивления сечения образца.

Изгибающий момент (M) вычисляем по формуле

$$M = \frac{P_{и} (P_{и.п} P_{и.маx}) L_v}{4},$$

где $P_{и}$ ($P_{и.п}$, $P_{и.маx}$) — нагрузка; L_v — расстояние между опорами.

Момент сопротивления образца (W) вычисляют по формуле

$$W = \frac{bh^3}{6},$$

где b и h — ширина и толщина образца.

Образцы для испытания в соответствии с ГОСТ 4648—71 изготовляют механической обработкой и формованием.

Определение модуля упругости при растяжении. Модуль упругости (E_p) определяют как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения, установленному ГОСТ 9550—81, по формуле

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) l_0}{A_0 (\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (7.7)$$

где F_2 — нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %, Н; F_1 — нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,2 %, Н; l_0 — расчетная длина образца, мм; A_0 — площадь начального поперечного сечения образца, мм²; Δl_2 — удлинение, соответствующее нагрузке F_2 , мм; Δl_1 — удлинение, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

Число образцов для испытания должно быть не менее трех. За результат испытания принимают среднее арифметическое значение всех параллельных определений.

Определение модуля упругости при сжатии. Модуль упругости при сжатии (E_c) — отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации сжатия, установленному ГОСТ 9550—81.

Модуль упругости определяют по формуле

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1) h_0}{A_0 (\Delta h_2 - \Delta h_1)}, \quad (7.8)$$

где F_2 — нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,3 %, Н; F_1 — нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,1 %, Н; h_0 — начальная высота образца или базы, мм; A_0 — площадь начального поперечного сечения образца, мм²; Δh_2 — изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_2 , мм; Δh_1 — изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

Определение модуля упругости при изгибе. Модуль упругости при изгибе — отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации, установленному ГОСТ 9550—81.

Испытания на изгиб проводят двумя методами: А — при нагружении по трехточечной схеме и Б — при нагружении по четырехточечной схеме. По методу А испытуемый образец нагружают наконечником в середине расстояния между опорами.

По методу Б испытуемый образец нагружают парой наконечников, расположенных в средней трети расстояния между опорами.

Модуль упругости при изгибе ($E_{изг}$) вычисляют по формуле: по методу А

$$E_{изг} = \frac{L_v^3 (F_2 - F_1)}{4bh^3 (z_2 - z_1)}; \quad (7.9)$$

по методу Б

$$E_{изг} = \frac{0,185L_v^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (z_2 - z_1)}, \quad (7.10)$$

где L_v — расстояние между опорами, мм; F_2 — нагрузка при относительной деформации крайних волокон 0,3 %, Н; F_1 — нагрузка при относительной деформации крайних волокон 0,1 %, Н; b — ширина образца, мм; z_2 — прогиб образца, соответствующий относительной деформации крайних волокон 0,3 %, мм; z_1 — прогиб образца, соответствующий относительной деформации крайних волокон 0,1 %, мм.

За результат испытаний принимают среднее арифметическое значение всех параллельных определений.

Испытание на ударную вязкость по Шарпи. Сущность метода заключается в испытании, при котором образец, лежащий на двух опорах, разрушается при ударе маятника, причем линия

удара находится посередине между опорами и непосредственно напротив надреза у образцов с надрезом.

Испытание на удар служит для оценки поведения образцов, предусмотренных ГОСТ 4647—80, под действием ударных напряжений и для оценки хрупкости или вязкости образцов в пределах, установленных условиями испытания.

Ударную вязкость вычисляют по формулам:

1) для образцов без надреза

$$a_n = \frac{A_n}{bs} 10^3; \quad (7.11)$$

2) для образцов с надрезом

$$a_n = \frac{A_n}{bs_n} 10^3; \quad (7.12)$$

где A_n — энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза; A_n — энергия, затраченная на разрушение образца с надрезом; b — ширина образца по его середине; s — толщина образца без надреза по его середине; s_n — толщина образца с надрезом по его середине.

Относительную ударную вязкость вычисляют по формуле

$$kz = \frac{a_n}{a_n}, \quad (7.13)$$

где a_n — ударная вязкость образца с надрезом; a_n — ударная вязкость такого же образца без надреза.

Испытуемые образцы имеют форму брусков прямоугольного сечения, размеры которых установлены ГОСТ 4647—80.

Определение твердости. Сущность метода заключается во вдавливании стального шарика под действием заданной нагрузки в поверхность испытуемого образца. Для этого образец помещают на опорную плиту (стол) так, чтобы обеспечить его наиболее полное прилегание к опорной плите, и вводят его в соприкосновение с шариком. Затем прилагают предварительную нагрузку и устанавливают устройство, отсчитывающее глубину внедрения, на нулевую отметку. Плавно в течение 2—3 с прикладывают одну из основных нагрузок, а через 30 с после приложения основной нагрузки измеряют глубину внедрения шарика с погрешностью не более 0,005 мм.

Твердость, МПа, вычисляют по формуле

$$H = \frac{P \cdot 0,21}{\pi d \cdot 0,25 (h - 0,04)}, \quad (7.14)$$

где P — нагрузка на шарик, Н; d — диаметр шарика; h — глубина внедрения шарика; 0,25 — базовая глубина внедрения ша-

рика; 0,21 и 0,04 — коэффициенты приведения нагрузки к глубине внедрения 0,25 мм.

Испытание на абразивный износ. Этот метод испытаний заключается в определении уменьшения объема образца в результате истирания шлифовальной шкуркой. Показатель истирания предназначен для сравнительной оценки износа пластмасс при абразивном истирании без смазочного материала. Для испытаний применяют образцы в виде: бруска квадратного сечения $(10 \pm 0,4) (10 \pm 0,4)$ мм, высотой 10—20 мм; цилиндра диаметром $10 \pm 0,4$ мм, высотой 10—20 мм; составного образца в виде бруска или цилиндра тех же размеров, состоящего из слоя испытуемой пластмассы толщиной не менее 2 мм, прикрепленного к основанию из другого твердого материала.

За показатель истирания образца пластмассы принимают уменьшение его объема в кубических миллиметрах на 1 м пути истирания.

Показатель истирания каждого образца пластмассы V_i , мм³/м, вычисляют по формуле

$$V_i = K \frac{G - G_1}{\rho_n L} 1000, \quad (7.15)$$

где K — коэффициент пересчета, характеризующий истирающую способность рулона шкурки; G — масса испытуемого образца с держателем до истирания, г; G_1 — масса испытуемого образца с держателем после истирания, г; ρ_n — плотность образца, г/см³; L — длина пути истирания, м.

Испытание проводят в помещении при температуре воздуха 20 ± 5 °С и относительной влажности 65 ± 5 %.

Испытание на ползучесть при растяжении при постоянной нагрузке. Ползучесть — процесс развития деформации во времени. Метод заключается в испытании образца на растяжение под действием постоянной растягивающей нагрузки в течение длительного времени и в измерении деформации образцов во времени и (или) времени между моментом приложения полной нагрузки и установлением в образце заданной величины деформации.

Исходя из цели испытания определяют деформацию — отношение приращения длины базы образца в данный момент времени к начальной длине базы образца; среднюю скорость ползучести — увеличение деформации в единицу времени; показатель ползучести — увеличение деформации в течение заданного промежутка времени $(t_2 - t_1)$, выраженное в процентах, к деформации в момент времени t_1 , и другие параметры.

Для испытаний применяют образцы типа 2 по ГОСТ 11262—76; способ изготовления образцов, место и направление их вырезки из полуфабрикатов или изделий должны отвечать требованиям ГОСТ 11262—76.

Испытание на ползучесть проводят на испытательной машине, состоящей из следующих основных частей: захватов для крепе-

ния образца, нагружающей системы и прибора для измерения деформации образца.

Образцы для испытания подвергают кондиционированию по ГОСТ 12423—66 при следующих режимах: температура 25 и 27 °С, относительная влажность 50 и 65 %, давление от 86 до 106 кПа. Время кондиционирования указывается в нормативно-технической документации на материал или методы испытаний.

Контрольные вопросы

1. Какие методы испытания проводятся на строительных материалах?
2. Укажите особенности испытания текстильных материалов.
3. Какие параметры определяются при испытании пластмасс?

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

8.1. Испытания на обрабатываемость металлов резанием

Обрабатываемость металла резанием характеризуется следующими факторами: качеством обработки — шероховатостью обрабатываемой поверхности и точностью размеров; периодом стойкости режущего инструмента; сопротивлением резанию (скорость и сила резания); видом стружкообразования. Практически обрабатываемость стали определяют сравнительными испытаниями путем обтачивания образцов из испытываемой стали и из стали 45 (эталон).

Рассмотрим каждый из этих факторов.

1. *Шероховатость обрабатываемой поверхности и точность размеров.* Шероховатость поверхности обрабатываемого изделия зависит от назначения и требуемой точности размеров изделия. Для чистовой обработки широко применяют хонингование, притирку, полирование.

Шероховатость поверхности определяется высотой неровностей и шагом между ними. Чем меньше высота неровностей и меньше шаг между ними, тем более высокое качество имеет обработанная поверхность.

2. *Период стойкости режущего инструмента* — это время резания новым или восстановленным режущим инструментом от начала резания до отказа. Под временем резания понимают интервал времени, в течение которого инструмент находится в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью, сопровождающемся снятием стружки.

Для оценки периода стойкости обработку резанием (сверление, точение, фрезерование и т. д.) проводят при одинаковых условиях испытания на однородных изделиях. Повторяя испытания при различных скоростях резания, устанавливают соотношение между скоростью резания и путевой наработкой между отказами.

Период стойкости является частным случаем временной наработки до отказа и между отказами (время резания). Установлена связь между периодами стойкости и наработкой между отказами. Например, временная наработка между отказами, выраженная

машинным временем T_m , и период стойкости связаны зависимостью

$$T_m' = T \frac{l_{p.x}}{l_p} = T \frac{t_{p.x}}{t_p}, \quad (8.1)$$

где $l_{p.x}$ и $t_{p.x}$ — соответственно длина и время рабочего хода инструмента; l_p , t_p — соответственно путь и время резания.

Путевая наработка между отказами l и период стойкости T связаны зависимостью

$$l = Tv, \quad (8.2)$$

где v — скорость резания.

При серийном и массовом производстве период стойкости можно оценить числом изготовленных деталей одного вида за указанный период.

3. *Сила резания* должна быть по возможности незначительной (образование сливной стружки), что важно для обеспечения долговечности инструмента и станка. Знание силы резания и распределения ее составляющих в процессе резания важны для конструктора станка.

Для технического обеспечения измерения силы резания ее раскладывают на три составляющие (P_x , P_y , P_z). Главная составляющая силы резания P_z во много раз превышает P_x и P_y . Следовательно, в большинстве случаев вполне достаточно определить P_z . При измерении силы резания важное значение имеет смещение измерительного сечения. Допускаемое смещение зависит от сечения стружки. При грубой обработке оно может составлять до 500 мкм, а при чистовой обработке допускается отклонение 5—10 мкм.

При статических и динамических испытаниях для измерений используют ленточные тензометры. Такие приборы действуют с очень малым смещением измерительного сечения и их можно использовать при испытаниях на производстве.

4. *Стружкообразование*. Для получения качественной поверхности изделия, безопасности работы и во избежание повреждения инструмента стружка при обработке должна быть дробленой.

Материалы можно классифицировать по их способности образовывать и не образовывать стружку. К первым относятся все стали, цветные металлы, дерево, каучук, пластмассы и кожа, вторая группа — естественные и искусственные камни, твердые сплавы, алмазы, стекло, фарфор.

Форма стружки при точении изменяется с увеличением затупления резца в такой последовательности: винтовая спираль стружки уменьшающегося диаметра—завитки—полудуги (вплоть до хрупких, очень коротких стружек); при высоких скоростях резания твердосплавными резцами, в случае если не выработана лунка, которая формирует стружку, образуется морщинистая прямосбегающая стружка.

8.2. Технологические испытания

Технологические испытания — испытания, проводимые при изготовлении продукции с целью оценки ее технологичности.

Метод испытания на выдавливание листов и лент толщиной от 0,1 до 2,0 мм регламентирован ГОСТ 10510—80. Метод основан на выдавливании сферического пуансона в образец, зажатый между матрицей и прижимным кольцом, до начала образования на выдавливаемой лунке сквозной трещины и измерения глубины лунки.

Признаком окончания испытания является резкое уменьшение усилия выдавливания.

Испытание на перегиб листов и ленты. Испытание на перегиб выявляет способность металла выдерживать многократный перегиб. Испытание применяют для лент и листов толщиной менее 4 мм при температуре 20_{-10}^{+15} °С. При изготовлении образцов сохраняют прокатанную поверхность или покровный слой (оцинковку, хромирование и т. д.). Образец зажимают в губках прибора перпендикулярно плоскости, проходящей через оси валков. Верхний конец образца должен проходить через паз в водке, закрепленном на рычаге прибора. Длина зажимаемого конца образца должна быть не менее высоты губок.

Первый перегиб — загиб образца на 90° вправо или влево и возвращение в вертикальное положение; второй перегиб — загиб на 90° в противоположную сторону и снова возвращение в вертикальное положение и т. д. до разрушения образца.

Метод испытания на расплющивание используют для определения способности металла к деформации и для выявления дефектов поверхности изделий. Испытание заключается в расплющивании образца вдоль его оси в холодном или горячем состоянии до образования головки заклепки или расплющивании головки заклепки.

При испытании образцов полос или листов расплющивание производят до увеличения ширины образца до значения, предусмотренного стандартами на испытываемые изделия. Стержни заклепок расплющивают до образования головки диаметром 1,5—1,6 и высотой 0,4—0,5 диаметра стержня.

Метод испытания на навивание проволоки. Испытание заключается в навивании проволоки плотно прилегающими витками по винтовой линии на цилиндрическую оправку, диаметр которой указывается в стандартах на изготовление проволоки.

Проволоку диаметром менее 4 мм навивают на стержень диаметром, равным диаметру образца; проволоку диаметром 4—6 мм — на стержень диаметром, равным двойному диаметру образца; проволоку диаметром более 6 мм — на стержень диаметром, равным тройному диаметру образца.

Результат испытания является положительным при отсутствии расслоений, трещин, надрывов, излома или разрушения как в основном материале образца, так и в его покрытии.

8.3. Испытания слесарного инструмента

К слесарному инструменту относятся отвертки, ножовочные полотна, гаечные ключи, губцевый инструмент.

Для оценки качества слесарного инструмента и проведения испытаний разработаны специальные методики.

Методика испытаний гаечных ключей. При испытании гаечных ключей контролируют твердость металла ключей, прочность ключей, марку стали и проводят внешний осмотр ключей (сохранность гальванических покрытий).

Твердость металла ключей определяют по ГОСТ 9013—59.

Испытанию на прочность подвергают 10 ключей, прошедших контроль на соответствие требованиям стандартов по внешнему виду, точности размеров, шероховатости поверхности и т. д.

Гаечные ключи испытывают на кругильных машинах мод. МК-50, развивающих крутящий момент до 500 Н·м, а также на крутильных машинах типа Риле (США) и ЦДМУ (ГДР) или на специальных стендах с горизонтальной и вертикальной плоскостями вращения (крутящий момент не менее 5000 Н·м).

Ключи с открытыми зевами, кольцевые и разводные устанавливают зевом на оправку, имеющую в поперечном сечении форму правильного шестигранника или квадрата (для ключей односторонних с четырехгранным зевом).

Испытания на прочность ключей проводят в ручном или автоматическом режимах.

К ручке ключа на расстоянии $\frac{2}{3}$ ее длины от испытуемого зева подводят палец ведущего рычага, соединенного с ведущим шпинделем машины.

Нагрузку при испытании разводных ключей прилагают к концу рукоятки на расстоянии не более 50 мм от ее торца в направлении, совпадающем с направлением отвода подвижной губки ключа. Угловая скорость рычага $\left(\frac{\pi}{12 \cdot 30} \text{ рад/с}\right)$ плавно передается ключу и через оправку — маятнику. Отклонение маятника создает крутящий момент, пропорциональный углу поворота оправки, при этом крутящий момент должен плавно возрастать до значения, указанного в стандартах на испытания ключей.

Угол и момент записываются диаграммным устройством испытательной машины. При проведении испытаний на испытательных стендах необходимо прикладывать нагрузки (сменные грузы), подсчитываемые по формуле

$$P = M_{кр}/l, \quad (8.3)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент для данного ключа; l — длина от оси оправки до точки приложения нагрузки.

Все ключи должны выдерживать не менее трех нагружений. После испытаний не допускаются остаточные деформации ключей, превышающие поле допуска, снижающие прочность ключей и точность зева (трещины, изменение размеров зева).

Методика испытания на прочность губцевого инструмента. Проводят испытания на прочность губцевого инструмента при изгибе, резании и кручении. Для проверки полного усилия раскрытия губок нагрузка величиной 9,8 Н прилагается к рычагу в местах их наибольшего раскрытия.

Испытание рукояток губцевого инструмента при изгибе проводят на специальном стенде. Нагрузку (50 Н) прилагают к рукояткам в местах наибольшего расстояния между ними. Измеряют расстояние между точками приложения нагрузки. Затем нагрузку увеличивают до 627 Н — для инструмента длиной 125 мм; 755 Н — для инструмента длиной 160 мм; 1038 Н — для инструмента длиной 180 мм; 1020 Н — для инструмента длиной 200 мм.

Постепенно уменьшают нагружение до 50 Н, затем измеряют расстояние между рукоятками в точках приложения нагрузки. Разность между первым и вторым измерениями не должна превышать 1 мм.

После испытаний не допускаются ослабление крепления рычага в шарнире, перекосы и нарушения плавного хода. При испытаниях производят трехкратное нагружение.

Испытания на прочность при резании подвергают комбинированные плоскогубцы и кусачки различных типов. Перед началом испытаний определяют силу резания, необходимую для перекусывания проволоки заданного диаметра. Для определения силы резания на стенде устанавливают две твердосплавные пластины, кромки которых отшлифованы под углом $60 \pm 1^\circ$ с радиусом закругления 0,3 мм; режущие кромки параллельны друг другу и расположены перпендикулярно проволоке, предназначенной для перекусывания. Сила, необходимая для перекусывания, определяется как среднее арифметическое из трех замеров.

Для оценки работоспособности губцевого инструмента производят трехкратное перекусывание проволоки, диаметр которой зависит от длины испытываемых плоскогубцев.

Испытания на работоспособность проводят на специальном стенде, имеющем отсчетное устройство для определения числа перекусываний и позволяющем установить силу, необходимую для перекусывания. Стенд имеет автоматическую подачу проволоки в зону резания, а число перекусываний должно быть не менее 1000. Перекусываемая проволока должна иметь сопротивление разрыву до 1860 МПа.

После испытаний на режущих кромках не должно быть зазубриваний, искажений режущих кромок, сколов и других дефектов, влияющих на работоспособность губцевого инструмента.

Испытание отверток на механическую прочность. Цель испытаний — проверка способности отверток передавать крутящие

моменты, обеспечивающие затяжку резьбовых соединений (оценка работоспособности).

Испытание отверток на прочность проводят для определения прочности рукояток, надежности крепления рукояток и стержня, а также прочности рабочего конца стержня.

Определение прочности рукояток проводят трехкратным свободным падением отвертки с высоты 1,5 м на бетонную или каменную плиту. Проверку прочности рабочего конца стержня и надежности крепления рукоятки и стержня производят на специальной установке.

Для проверки прочности соединения рукоятки и стержня рукоятку отвертки устанавливают в захвате для крепления рукоятки испытательной машины. Рукоятку устанавливают между вкладышами втулки и закрепляют винтами. Втулка затем соединяется со шпинделем. Рабочий конец отвертки устанавливают в захвате установки. Рабочий конец отвертки устанавливается с помощью вставок таким образом, чтобы нагруженным было сечение среза. Вставки с рабочим концом охватывают обоймой, устанавливают их на хвостовике и затягивают гайкой. Хвостовик соединяют со шпинделем.

После проверки нулевого положения силоизмерителя включают вращение ведущего захвата установки. Происходит нагружение отвертки крутящим моментом. По достижении заданной нагрузки вращение ведущего захвата переключается на обратное, отвертка разрушается. Нагрузка прилагается по 3 раза в обоих направлениях.

После испытания партии отверток их делят на две группы — выдержавшие испытания и разрушившиеся.

Процент отверток, выдержавших испытания, характеризует прочность партии отверток.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры характеризуют обрабатываемость резанием металлов и сплавов?
2. Назовите методы технологических испытаний материалов.
3. С какой целью проводят испытания слесарно-монтажного инструмента?

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

9.1. Государственные стандарты и метрология

Стандартизация направлена на совершенствование управления народным хозяйством, повышение технического уровня и качества продукции, интенсификацию общественного производства, рациональное и экономное использование ресурсов.

Стандартизация — это деятельность, заключающаяся в нахождении решений для повторяющихся задач в сфере науки, техники и экономики, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области.

Главной задачей стандартизации в СССР является создание системы нормативно-технической документации, определяющей прогрессивные требования к продукции, к ее разработке, производству и применению, а также контроль за правильностью использования этой документации.

Стандарт — это нормативно-технический документ, устанавливающий требования к группам однородной продукции и в необходимых случаях требования к конкретной продукции, правила, обеспечивающие ее разработку, производство и применение. Разновидностью стандартизации является комплексная стандартизация, по которой осуществляется целенаправленное установление и применение системы взаимосвязанных требований как к самому объекту стандартизации, так и к его основным элементам. Комплексная стандартизация — это система взаимосвязанных стандартов. Комплексная стандартизация в машиностроении сводится к установлению норм и требований к самому объекту, к его деталям и сборочным единицам, а также к тем видам материалов, комплектующих изделий, технологическим процессам, показатели которых должны отвечать уровню требований, предъявляемых к самому объекту. Сущность комплексной стандартизации — во взаимной увязке всех факторов, обеспечивающих высокий технический уровень и качество продукции.

Основными задачами службы стандартизации на предприятии являются:

- 1) разработка нормативно-технической документации на выпускаемую предприятием новую (модернизируемую) продукцию;
- 2) осуществление нормоконтроля конструкторской и технологической документации;

3) проверка соблюдения в разрабатываемых другими техническими службами предприятия документах норм и требований, установленных стандартами;

4) обеспечение предприятия стандартами и другой нормативно-технической документацией;

5) обеспечение цехов, отделов и других служб предприятия нормативно-технической документацией (по бланкам-заказам);

6) внесение изменений в нормативно-техническую документацию предприятия ежемесячно в соответствии с Информационным указателем стандартов (ИУС);

7) внедрение новых стандартов и проверка соблюдения действующих стандартов на предприятии;

8) разработка нормативно-технической документации на аттестацию выпускаемой продукции предприятием на категорию качества.

Управление стандартизацией в СССР осуществляет Государственный комитет СССР по стандартам (Госстандарт). Организационно-методическое руководство работами по стандартизации в отделах, цехах и лабораториях предприятия и непосредственное выполнение работ по стандартизации выполняет отдел или бюро (лаборатория) стандартизации.

Нормативно-технические документы, определяющие требования к объектам стандартизации, подразделяют на следующие категории:

1) государственные стандарты — ГОСТ;

2) отраслевые стандарты — ОСТ;

3) республиканские стандарты — РСТ;

4) технические условия — ТУ.

Государственные стандарты являются обязательными для всех предприятий и учреждений нашей страны.

Объектами стандартизации являются продукция, правила, обеспечивающие ее разработку, производство и применение, а также иные объекты стандартизации, устанавливаемые Советом Министров СССР.

В стандартах на продукцию устанавливают требования к группам однородной продукции или к конкретной продукции.

Стандарты на правила, обеспечивающие разработку, производство и применение продукции, подразделяют на общетехнические и организационно-методические.

В общетехнических стандартах устанавливают научно-технические термины и определения; условные обозначения; показатели качества продукции; общие требования к разъемным соединениям (резьбовым, шпоночным и т. п.), неразъемным соединениям (сварным, клепаными и т. п.), передачам (зубчатым, ременным и др.) и другие общие требования к продукции; нормы точности измерений, допуски и посадки, шероховатость поверхности, классы точности оборудования, предельно допустимые выбросы и концентрации вредных веществ и другие нормы.

В организационно-технических стандартах устанавливают основные положения по организации работ по стандартизации, метрологическому обеспечению, управлению качеством продукции и др.; порядок разработки и внедрения нормативно-технических документов, организации и управления процессом технологической подготовки производства и др.

Государственные стандарты разрабатывают на продукцию межотраслевого производства и применения.

Республиканские стандарты разрабатывают на продукцию республиканского и местного значения, если на эту продукцию отсутствуют государственные и отраслевые стандарты.

При отсутствии государственных, отраслевых и республиканских стандартов или технических условий министерств, являющихся ведущими по видам выпускаемой продукции, министерства, ведомства могут разрабатывать технические условия на продукцию подведомственных им предприятий.

Технические условия в соответствии с областью их распространения обязательны для предприятий, поставляющих, хранящих, транспортирующих, эксплуатирующих и ремонтирующих продукцию.

Существуют различные виды стандартов в зависимости от объекта стандартизации. Назовем основные виды стандартов на продукцию: общие технические условия; общие технические требования; приемка; марки; сортамент; параметры и размеры; эксплуатация и ремонт; методы контроля (испытаний, анализа, измерений); маркировка и др.

Основные виды общетехнических стандартов: термины и определения; обозначения; общие требования и нормы; методы.

Виды организационно-методических стандартов: основные положения; порядок; построение (изложение, оформление, содержание).

Для установления взаимосвязанных правил и положений по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой предприятиями и организациями СССР, введена Единая система конструкторской документации (ЕСКД), представляющая собой комплекс государственных стандартов. Стандарты ЕСКД устанавливают виды конструкторских документов (чертеж детали, сборочный чертеж, схема, спецификация и др.), стадии разработки конструкторских документов — проектных (техническое предложение, эскизный проект, технический проект) и рабочих (рабочая документация); требования к текстовым документам; общие правила выполнения чертежей, обозначения на чертежах и схемах и правила их нанесения и т. д. ЕСКД сокращает трудоемкость разработки конструкторской документации.

Для установления взаимосвязанных правил и положений по порядку разработки, оформления и обращения технологической документации, разрабатываемой предприятиями и учреждениями

нашей страны, существует комплекс государственных стандартов, составляющих Единую систему технологической документации (ЕСТД).

ЕСТД предусматривает: широкое внедрение типовых технологических процессов, сокращение объема разрабатываемой технологической документации, повышение производительности труда технологов, упорядочение форм документации общего назначения (карты технологического процесса, специализации) и т. д.

Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Термины и определения основных понятий метрологии установлены ГОСТ 16263—70 и рекомендуются для применения в документации всех видов, технической и справочной литературе, а также в учебниках и учебных пособиях. Основные проблемы метрологии следующие:

- общая теория измерений;
- единицы физических величин и их системы;
- методы и средства измерений;
- методы определения точности измерений;
- основы обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений;

- эталоны и образцовые средства измерений;
- методы передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам измерений.

Под единством измерений понимают состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Под единообразием средств измерений понимают состояние средств измерений, которые характеризуются тем, что они проградуированы в узаконенных единицах и их метрологические свойства соответствуют нормам. Единицы физических величин установлены ГОСТ 8.417—81, который предусматривает введение в СССР Международной системы единиц (СИ).

ГОСТ 1.25—76 устанавливает основные положения метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции, научных исследований во всех отраслях народного хозяйства СССР.

Метрологическое обеспечение — это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Организационной основой метрологического обеспечения является метрологическая служба СССР, возглавляемая Госстандартом.

Основной задачей государственной метрологической службы является обеспечение единства и достоверности измерений. Эта задача решается созданием комплекса нормативно-технических документов государственной системы обеспечения единства изме-

рений (ГСИ), разработкой и совершенствованием эталонов образцовых средств измерений, которые обеспечивают воспроизведение размеров единиц физических величин и их передачу рабочим эталонам и исходным образцовым средствам измерений, находящимся в ведении метрологических служб.

Проверка мер и измерительных приборов организуется на предприятии метрологической службой. Положением о метрологической службе предусматривается, что эталоны и образцовые средства измерений, измерительные приборы и оборудование предприятий по установленному перечню должны в обязательном порядке контролироваться в оптимальные, технически обоснованные и устанавливаемые предприятием сроки.

Задачи метрологической службы предприятия следующие:

проверка и метрологическая аттестация средств измерений, применяемых на предприятии;

метрологическая экспертиза проектов конструкторской, технологической и метрологической документации;

контроль за производством, состоянием, применением и ремонтом средств измерений;

анализ причин брака продукции;

аттестация методик выполнения измерений.

9.2. Стандартизация и качество продукции

Качество продукции — это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Под свойством продукции понимают объективную особенность продукции, проявляющуюся при ее создании, эксплуатации или потреблении. Показателем качества продукции является количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления. Термины и определения основных понятий в области управления качеством продукции установлены ГОСТ 15467—79.

Единичный показатель качества продукции — показатель, который характеризует одно из свойств продукции. Комплексный показатель качества — показатель, который характеризует несколько свойств продукции. Интегральный показатель качества продукции — показатель, являющийся отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее изготовление и потребление.

За базовое значение показателя качества продукции принимают значение показателя качества продукции, принятое за основу при сравнительной оценке ее качества. Качество оценивается теоретическим или экспериментальным путем.

Относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой

продукции базовыми значениями соответствующих показателей, называется уровнем качества продукции. Определяющий показатель качества продукции — показатель качества продукции, по которому принимают решение оценивать ее качество.

Станки, машины, инструменты характеризуются следующими основными показателями: работоспособностью, надежностью, долговечностью, безотказностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью.

Под работоспособностью понимают состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Долговечность — свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Основными показателями долговечности являются наработка до отказа и срок службы. Нарботка до отказа — наработка изделия от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. Срок службы — это продолжительность от начала эксплуатации изделия до перехода в предельное состояние.

Под ремонтпригодностью понимают свойство изделия, заключающееся в приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и повреждений путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

По воздействию средств контроля на объект контроль делят на разрушающий и неразрушающий. Для неразрушающего контроля используют следующие методы: радиационный, магнитный, тепловой, капиллярный, акустический, индукционный и др.

Применяют следующие виды испытаний продукции:

контрольные испытания — для контроля качества продукции; исследовательские испытания — для изучения параметров продукции и показателей ее качества;

предварительные испытания — контрольные испытания опытных образцов и опытных партий продукции для определения возможности их предъявления на приемочные испытания;

государственные испытания — испытания важнейших видов продукции, проводимые головной организацией по Государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые Государственной комиссией;

межведомственные испытания — испытания продукции, проводимые комиссией из представителей нескольких министерств (ведомств) для приемки составных частей объекта, разрабатываемого несколькими ведомствами;

ведомственные испытания — испытания продукции, проводимые комиссией из представителей министерства (ведомства);

периодические испытания — контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые в объемах и в сроки, установленные нормативно-технической документацией, для контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска;

приемо-сдаточные испытания — контрольные испытания продукции при приемочном контроле;

типовые испытания — контрольные испытания выпускаемой продукции для оценки эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию, рецептуру или технологический процесс;

аттестационные испытания — испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации по категориям качества;

граничные испытания — испытания, проводимые для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров изделий и режимом эксплуатации.

Проверка соответствия продукции или технологического процесса установленным техническим требованиям называется техническим контролем. Контроль качества продукции на предприятиях осуществляется отделом технического контроля (ОТК).

Основной задачей ОТК является своевременное получение полной и достоверной информации о качестве выпускаемой продукции и соблюдении технологического процесса для предупреждения выпуска продукции, не соответствующей требованиям нормативно-технической документации (ГОСТ, ТУ, чертежей и т. д.).

Отдел технического контроля предприятия выполняет следующие функции:

1) осуществляет окончательную приемку и испытание готовой продукции, оформляет и предъявляет ее к сдаче заказчику;

2) анализирует причины брака продукции по цехам и участкам;

3) участвует в разработке мероприятий по предупреждению и ликвидации брака и контролирует выполнение этих мероприятий;

4) выборочный контроль качества готовой продукции, выполнения отдельных технологических операций, состояния технологического оборудования, инструмента и приборов, условий хранения, упаковки и транспортирования продукции;

5) проводит контроль за сохранением единства мер и состоянием измерительных средств, а также инспекторский контроль за правильностью проверки всех средств измерений в основном производстве;

6) организацию и внедрение прогрессивных методов контроля и оценки качества продукции;

7) входной контроль поступающих на предприятие материалов и полуфабрикатов, комплектующих изделий, а также операционный контроль (контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции);

8) совместно с отделом главного технолога разрабатывает мероприятия по совершенствованию методов и технологии контроля и снижению его трудоемкости.

Управление качеством продукции — это действия, осуществляемые при создании и эксплуатации или потреблении продукции, для установления, обеспечения и поддержания необходимого уровня ее качества.

На предприятиях широко действует комплексная система управления качеством продукции (КС УКП). Система управления качеством продукции — совокупность управляющих органов и объектов управления, взаимодействующих с помощью материально-технических и информационных средств при управлении качеством продукции.

Управление качеством начинается с проектирования нового изделия или станка, установления уровня его качества, который фиксируется в техническом задании. Кроме того, на стадии проектирования предусматриваются мероприятия по достижению этого уровня качества и осуществляется непрерывный контроль за обеспечением параметров качества в разрабатываемой документации и опытных образцах изделия.

9.3. Стандарты на испытания материалов и готовой продукции

ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытания на растяжение.

ГОСТ 25.503—80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.

ГОСТ 25.502—79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

ГОСТ 9012—59. Металлы. Методы испытаний. Измерение твердости по Бринеллю.

ГОСТ 9013—59. Металлы. Методы испытаний. Измерение твердости по Роквеллу.

ГОСТ 9450—76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

ГОСТ 11150—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при пониженных температурах.

ГОСТ 11701—84. Металлы. Методы испытания на растяжение тонких листов и лент.

ГОСТ 9651—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.

ГОСТ 2999—75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

ГОСТ 9454—78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.

ГОСТ 14019—80. Металлы и сплавы. Методы испытаний на изгиб.

ГОСТ 22975—78. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).

ГОСТ 3248—81. Металлы. Метод испытания на ползучесть.
ГОСТ 10145—81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность.

ГОСТ 17367—71. Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы.

ГОСТ 310.2—76. Цементы. Методы определения тонкости помола.

ГОСТ 10180—78. Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение.

ГОСТ 12119—80. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств.

ГОСТ 6032—84. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии.

ГОСТ 10510—80. Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену.

ГОСТ 8817—82. Металлы. Метод испытания на осадку.

ГОСТ 3845—75. Трубы металлические. Метод испытания гидравлическим давлением.

ГОСТ 10447—80. Проволока. Метод испытания на навивание.

ГОСТ 8818—73. Металлы. Метод испытания на расплющивание.

ГОСТ 16504—81. Испытания и контроль качества продукции.

ГОСТ 18353—79. Неразрушающие методы контроля. Классификация видов и методов.

ГОСТ 18442—80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы.

ГОСТ 21105—87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

ГОСТ 23480—79. Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования.

ГОСТ 23483—79. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования.

ГОСТ 26182—84. Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течей.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под стандартом?
2. Каково назначение стандартизации?
3. Назовите основные задачи стандартизации.
4. Назовите категории стандартов.
5. Назовите основные задачи метрологической службы.
6. Какие вопросы решает ОТК на предприятии?
7. Что понимают под управлением качеством продукции?

ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАЗЦАМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

10.1. Пробы и изготовление из них образцов для испытаний

Вырезку заготовок для образцов проводят на металлорежущих станках, ножницах, штампах путем применения кислородной и анодно-механической резки и другими способами, предусматривая припуски на зону металла с измененными свойствами при нагреве и наклепе.

Места вырезки заготовок для образцов, число их, направление продольной оси образцов по отношению к заготовке, величины припусков при вырезке указаны в нормативно-технической документации на правила отбора проб, заготовок и образцов или на металлопродукцию.

Образцы рекомендуются изготавливать на металлорежущих станках. При изготовлении образцов принимают меры (охлаждение, соответствующие режимы обработки), которые исключают возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки.

Глубина резания при последнем проходе не должна превышать 0,3 мм.

Плоские образцы должны сохранять поверхностные слои проката, если не имеется иных указаний в нормативно-технической документации на правила отбора проб, заготовок и образцов или на металлопродукцию.

Стрела прогиба для плоских образцов на длине 200 мм не должна превышать 10 % от толщины образца, но не более 4 мм. При наличии указаний в нормативно-технической документации на металлопродукцию допускается правка заготовок и образцов.

Заусенцы на гранях плоских образцов должны быть удалены механическим способом без повреждения поверхности образца. Кромки в рабочей части образцов допускается шлифовать и зачищать на шлифовальном круге или шлифовальной шкуркой.

Шероховатость обработанных поверхностей R_a рабочей части цилиндрических образцов должна быть не более 1,25 мкм, а шероховатость R_z боковых поверхностей рабочей части плоских образцов не более 20 мкм по ГОСТ 2789—73.

Требования к шероховатости поверхности литых образцов и готовых изделий должны соответствовать требованиям к шеро-

ховатости поверхности литых заготовок и металлопродукции, испытываемой без предварительной механической обработки.

При наличии указаний в нормативно-технической документации на правила отбора проб, заготовок и образцов или на металлопродукцию допускается испытывать сортовой прокат, литые образцы и готовые изделия без предварительной механической обработки с учетом допусков на размеры, предусмотренных для испытываемых изделий.

Испытание проводят на двух образцах, если иное их число не предусмотрено в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

Типы и размеры образцов должны указываться в нормативно-технической документации на каждый вид испытаний.

Образцы маркируют вне рабочей длины образца.

10.2. Статистическая обработка результатов испытаний

При определении характеристик механических свойств металлов и сплавов проводят различные измерения: измеряют размеры образцов, действующие на образец усилия, деформации, температуру образца, электрические и магнитные параметры образца и т. д. При измерениях возможны погрешности, которые не должны превышать величин, указанных в стандартах. Результаты измерений зависят от точности измерительных приборов, от однородности испытываемого материала и квалификации лаборанта-испытателя. В результате испытаний нескольких образцов одного и того же металла получают разные количественные характеристики его механических свойств, поэтому испытываемый металл описывают некоторыми усредненными характеристиками его физико-механических свойств. Установление таких усредненных характеристик, оценка степени разброса результатов испытаний относительно этих усредненных характеристик, определение доверительного интервала отклонения значений характеристик физико-механических свойств требует использования статистических методов обработки, основанных на теории вероятностей.

Теория вероятностей — математическая дисциплина, позволяющая по вероятностям одних случайных событий находить вероятности других, связанных каким-либо образом с первичными.

Случайное событие — событие, которое при многократном воспроизведении одного и того же опыта происходит по-разному. При испытаниях образцов из одного и того же металла стремятся воспроизвести каждый опыт в одинаковых условиях, т. е. изготавливают образцы из одного и того же профиля металла, измеряют одним и тем же инструментом, используют одно и то же испытательное оборудование. Однако получают различные результаты испытаний.

Указанные выше факторы приводят к тому, что результаты испытаний металлов и сплавов оказываются случайными или различными и поэтому применение статистических методов обработки результатов испытаний необходимо.

Под событием в теории вероятностей понимают всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Частотой или вероятностью события является

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (10.1)$$

где $P(A)$ — вероятность события A ; n — общее число проведенных опытов; m — число опытов, в результате которых появилось событие A .

Вероятность события может принимать любые значения от нуля до единицы.

Под случайной величиной в теории вероятностей понимают величину, которая в результате опыта может принять то или иное значение с определенными вероятностями. Случайные величины могут быть дискретными (прерывистыми) или непрерывными.

В качестве примера дискретной величины может быть число шеек перед разрывом образца при его растяжении, а в качестве примера непрерывной случайной величины может быть предел прочности при испытании на разрыв образца.

Случайную величину обозначают X , а возможные значения этой величины x_i , где i принимает все значения от 1 до n . Появление случайной величины есть событие.

События составляют полную группу событий, если в результате опыта появится хотя бы одно из них. События являются несовместными в данном опыте, если никакие два из них не могут появиться вместе.

События могут быть равновероятными, если в силу симметрии событий ни одно из них объективно не является более возможным, чем остальные.

Если случайная дискретная величина X принимает в результате испытаний значения

$$X = x_1; X = x_2 \dots X = x_i \dots X = x_n,$$

а вероятности этих событий соответственно

$$\begin{aligned} P(X = x_1) &= p_1 P(X = x_2) = p_2 \dots P(X = x_i) = \\ &= p_i \dots P(X = x_n) = p_n \end{aligned}$$

и если эти события составляют полную группу и несовместны, то

$$\sum_{i=1}^{i=n} p_i = 1.$$

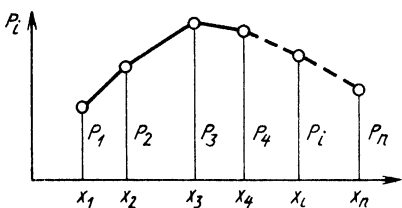


Рис. 10.1. График распределения опытных величин

Распределение вероятностей этих событий представляют в виде ряда распределения случайной величины X :

$$x_1 x_2 \dots x_i \dots x_n;$$

$$p_1 p_2 \dots p_i \dots p_n.$$

Графически ряд распределения представляют в виде многоугольника распределения (рис. 10.1). Законом распределения случайной величины называют соотношение, которое устанавливает связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Ряд распределения и многоугольник распределения являются формами представления закона распределения дискретной случайной величины.

Универсальной характеристикой случайной величины как дискретной, так и непрерывной является функция распределения

$$F(x) = P(X \leq x). \quad (10.2)$$

При многократном повторении испытаний одного вида при одинаковых условиях и на одном и том же оборудовании полу-

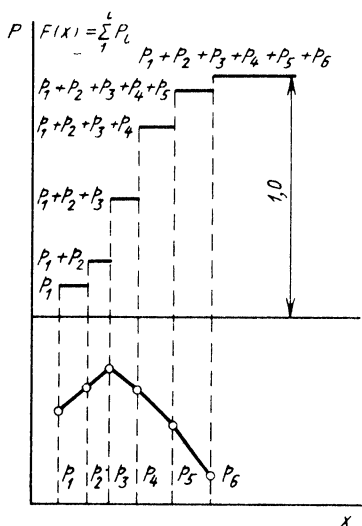


Рис. 10.2. График функции распределения в виде ступенчатой линии

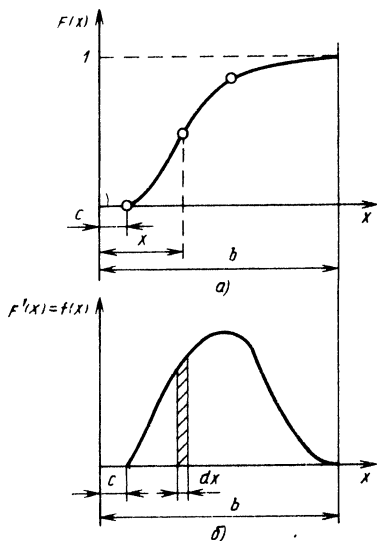


Рис. 10.3. График функции распределения в виде плавной линии (а) и плотность распределения как производная от $F(x)$ (б)

чаем совокупность случайных величин, которые характеризуются для дискретной случайной величины функцией распределения (ступенчатая линия) — рис. 10.2 или рядом распределения (графически — многоугольник распределения), а для непрерывной случайной величины функцией распределения (плавная линия) — рис. 10.3, а или плотностью распределения (графически — кривая распределения) — рис. 10.3, б.

10.3. Оформление результатов испытаний

Заключительным этапом испытаний является оформление результатов испытаний.

Результаты испытаний записывают в протокол, форма которого регламентирована стандартами на методы испытаний.

В протокол записывают исходные данные каждого образца или изделия, назначение испытаний, модель испытательного оборудования, номер образца (изделия), прилагаемые нагрузки и другие параметры, с помощью которых определяют физико-механические свойства материалов.

В протокол записывают результаты испытаний образцов или изделий. К протоколу может прилагаться диаграмма испытаний. Записывают результаты испытаний, обработанные методом математической статистики.

Протокол подписывает лаборант по испытаниям и заведующий лабораторией физико-механических испытаний.

В протоколе указывают дату поступления образцов на испытание, а также название организации, в которой проводились испытания материалов.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные требования к образцам для испытаний.
2. Для чего необходима статистическая обработка результатов испытаний?
3. Какие параметры образца фиксируются в протоколе испытаний?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеев Б. А.** Проверка машин и приборов для механических испытаний материалов. М.: Изд-во стандартов, 1969. 176 с.
2. **Гуляев А. П., Малинина К. А., Саверина С. М.** Инструментальные стали: Справочник. М.: Машгиз, 1961. 208 с.
3. **Давиденков Н. Н.** Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Т. 2. Киев: Наукова думка, 1981. 656 с.
4. **Жуковец И. И.** Механические испытания металлов. М.: Высшая школа, 1986. 200 с.
5. **Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л.** Физические свойства металлов и сплавов. М.: Metallургия, 1980. 320 с.
6. **Практические вопросы испытания металлов:** Пер. с нем./Под ред. О. П. Елютина. М.: Metallургия, 1979. 280 с.
7. **Физические методы исследования и контроля структуры инструментальных сталей/Под ред. В. А. Ланда.** М.: Машгиз, 1963.
8. **Черепин В. Т.** Экспериментальная техника в физическом металловедении. Киев: Техника, 1968. 280 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Техника безопасности, противопожарная безопасность и производственная санитария	3
1.1. Основные сведения по технике безопасности	3
1.2. Противопожарная безопасность	7
1.3. Производственная санитария	8
Глава 2. Основные свойства материалов	10
2.1. Исходные металлические материалы. Основные сведения о производстве металлов и сплавов	10
2.2. Основные свойства металлов и сплавов	23
2.3. Неметаллические материалы, их свойства и области применения	27
Глава 3. Основы теории упругой и пластической деформации и разрушения	32
3.1. Общая характеристика и атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов	32
3.2. Понятие о напряженно-деформированном состоянии	39
3.3. Упругая и пластическая деформации	43
3.4. Влияние температуры на прочность и пластичность металлов и сплавов	50
3.5. Сведения о процессе разрушения	53
Глава 4. Механические испытания металлов и сплавов	56
4.1. Классификация методов испытаний	56
4.2. Статические испытания	56
4.3. Испытания на ударный изгиб	87
4.4. Испытания на усталость	93
4.5. Испытания на длительную прочность и ползучесть	95
4.6. Измерение твердости	98
Глава 5. Оборудование и приборы для проведения механических испытаний	109
5.1. Классификация оборудования и приборов для проведения механических испытаний	109
5.2. Устройство и принцип действия машин для статических испытаний	109
5.3. Устройство и принцип действия машин для ударных испытаний	118
5.4. Устройство и принцип действия машин для повторно-переменных нагрузок (испытания на усталость)	121
5.5. Устройство и принцип действия машин для проведения специальных испытаний	124
5.6. Приборы для измерения твердости	131
5.7. Контрольно-измерительные средства, применяемые при испытаниях	145
Глава 6. Неразрушающие методы контроля. Определение физических свойств металлов и сплавов	153
6.1. Классификация методов неразрушающего контроля	153
6.2. Дефекты металлов и сплавов, причины их возникновения	155
6.3. Тепловые методы обнаружения дефектов	160
6.4. Термический анализ фазовых превращений в металлах и сплавах	167
6.5. Термический анализ при высоких температурах	171
	255

6.6.	Термический анализ при высоких скоростях нагрева и охлаждения	173
6.7.	Калориметрический анализ	177
6.8.	Дилатометрический метод	183
6.9.	Магнитные методы (Т.З.) <i>Ксн.</i>	190
6.10.	Электрические методы	202
6.11.	Параметрический вихретоковый метод	204
6.12.	Акустические методы	205
6.13.	Методы капиллярного контроля	214
6.14.	Методы течеискания	217
6.15.	Радиографический и радиоскопический методы	221
Глава 7.	Испытания неметаллических материалов	224
7.1.	Испытания строительных материалов и изделий	224
7.2.	Испытания текстильных материалов	227
7.3.	Испытания пластических масс	228
Глава 8.	Специальные виды испытаний	234
8.1.	Испытания на обрабатываемость металлов резанием	234
8.2.	Технологические испытания	236
8.3.	Испытания слесарного инструмента	237
Глава 9.	Основные сведения о стандартизации, метрологии и контроле качества продукции	240
9.1.	Государственные стандарты и метрология	240
9.2.	Стандартизация и качество продукции	244
9.3.	Стандарты на испытания материалов и готовой продукции	247
Глава 10.	Требования к образцам для испытаний и методы обработки результатов испытаний	249
10.1.	Пробы и изготовление из них образцов для испытаний	249
10.2.	Статистическая обработка результатов испытаний	250
10.3.	Оформление результатов испытаний	253
Список литературы		254

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Костин Петр Петрович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ, СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Н. П. Ошерова
 Переплет художника В. Д. Епанешникова
 Художественный редактор В. В. Лебедев
 Технический редактор И. Н. Раченкова
 Корректоры О. Ю. Садыкова, Л. А. Ягупьева

ИБ № 6141

Сдано в набор 20.09.89. Подписано в печать 05.01.90. Т-02103. Формат 60×90^{1/16}.
 Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0.
 Усл. кр.-отт. 16,0. Уч.-изд. л. 17,40. Тираж 14400 экз. Заказ 857. Цена 70 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва,
 Стромьинский пер., 4

Типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение»
 при Государственном комитете СССР по печати
 193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10