

В.Н. Шинкин
Ю.А. Поляков

Сопротивление материалов

Циклические нагрузки и удар
в металлоконструкциях

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

В.Н. Шинкин
Ю.А. Поляков

Сопротивление материалов

Циклические нагрузки и удар
в металлоконструкциях

Учебник

Под редакцией профессора В.Н. Шинкина

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению Металлургия



ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ

Москва 2012

УДК 539.3
Ш62

Рецензенты

д-р техн. наук, проф. *Ю.И. Бурчаков* (зав. кафедрой сопротивления материалов Московского государственного горного университета);
д-р техн. наук, проф. *С.К. Карцов* (профессор кафедры «Строительная механика» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета)

Шинкин, В.Н.

Ш62 Соппротивление материалов : циклические нагрузки и удар в металлоконструкциях : учеб. / В.Н. Шинкин, Ю.А. Поляков ; под ред. В.Н. Шинкина. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. – 172 с.
ISBN 978-5-87623-568-8

В учебнике рассмотрены основные вопросы расчета на прочность при циклически изменяющихся напряжениях и ударных нагрузках элементов металлоконструкций, изучение которых формирует у студентов базисные навыки, необходимые для выполнения расчетов деталей металлургических машин и оборудования. Подробно разобраны решения большого числа задач. Все темы изложены с учетом специфики металлургических процессов.

Приведенные в учебнике домашние задания рекомендуется выполнять с применением современных средств программного обеспечения, в частности системы MathCAD.

Предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 «Металлургия».

УДК 539.3

ISBN 978-5-87623-568-8

© Шинкин В.Н.,
Поляков Ю.А., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Прочность при циклически изменяющихся напряжениях	6
1.1. Общее понятие об усталости материалов	6
1.2. Зарождение многоциклового усталостного трещины и характер ее распространения. Основные признаки многоциклового усталостного излома.....	9
1.3. Цикл напряжений и его характеристики	11
1.4. Классификация циклов напряжений.....	13
1.5. Испытания на усталость при симметричном цикле напряжений в условиях чистого изгиба. Кривая усталости (кривая Вёлера).....	15
1.6. Три типа кривых усталости и их аналитическое описание	19
1.7. Справочные данные о пределах выносливости и эмпирические формулы для их определения.....	26
1.8. Испытания в условиях асимметричных циклов. Диаграмма предельных напряжений (диаграмма Смита).....	28
1.9. Диаграмма предельных амплитуд напряжений (диаграмма Хэя).....	32
1.10. Способы схематизации диаграммы предельных амплитуд напряжений	36
1.11. Основные факторы, влияющие на предел выносливости. Коэффициент снижения предела выносливости	41
1.12. Влияние закона и частоты изменения напряжений на усталостную прочность.....	42
1.13. Влияние концентрации напряжений на предел выносливости	43
1.14. Влияние масштабного эффекта на предел выносливости	60
1.15. Совместное влияние концентрации напряжений и масштабного фактора.....	62
1.16. Влияние качества обработки поверхности на предел выносливости	70
1.17. Влияние коррозии на предел выносливости	73
1.18. Влияние поверхностного упрочнения деталей на предел выносливости	76
1.19. Влияние коэффициента анизотропии на предел выносливости	78
1.20. Коэффициент запаса усталостной прочности при симметричном цикле напряжений	78

1.21. Коэффициент запаса усталостной прочности при асимметричном цикле напряжений	79
1.22. Коэффициент запаса усталостной прочности при двухосном напряженном состоянии	83
1.23. Примеры расчетов на прочность при циклически изменяющихся напряжениях	87
Вопросы для самоконтроля по расчетам на прочность при циклически изменяющихся напряжениях	104
2. Прочность при ударных нагрузках без учета массы упругой системы	112
2.1. Общий метод приближенного вычисления напряжений при ударе	112
2.2. Центральный продольный удар по брусу постоянного сечения	117
2.3. Центральный продольный удар по ступенчатому стержню	122
2.4. Вертикальный удар вследствие внезапной остановки движения	127
2.5. Продольный внецентренный удар	129
2.6. Продольный удар стержня об абсолютно жесткую плиту	136
2.7. Поперечный удар	138
2.8. Скручивающий удар	145
Вопросы для самоконтроля по расчетам на прочность при ударных нагрузках без учета массы упругой системы	149
3. Учет массы упругой системы, испытывающей удар	150
3.1. Понятие о приведенной массе упругой системы. Коэффициент приведения массы к точке удара	150
3.2. Примеры вычисления коэффициента приведения массы к точке удара	152
3.3. Общий метод определения динамического коэффициента при ударе с учетом массы упругой системы	159
Вопросы для самоконтроля по расчетам на прочность при ударных нагрузках с учетом массы упругой системы	164
4. Домашние задания	165
4.1. Проверка элемента детали на усталостную прочность при переменном нагружении	165
4.2. Расчет на прочность балки при действии ударной нагрузки без учета массы упругой балки	167
Библиографический список	169
Приложения	170

Предисловие

В современном металлургическом производстве широко применяются различные механизмы, оборудование, металлоконструкции. Для целого ряда их конструктивных элементов обычных расчетов на прочность недостаточно для обеспечения надежной и безопасной работы в условиях эксплуатации, так как могут произойти циклический износ или ударное разрушение при внешних воздействиях.

В связи с этим на этапе общеинженерной подготовки в процессе изучения раздела «Циклические нагрузки и удар в металлоконструкциях» дисциплины «Сопротивление материалов», следует уделять должное внимание формированию у студентов металлургических специальностей навыков в осуществлении расчетов элементов металлоконструкций, металлургических машин и оборудования, связанных с анализом их способности сопротивляться циклическому износу и выдерживать ударные нагрузки. Это будет способствовать более качественному усвоению таких дисциплин, как «Детали машин и основы конструирования», «Теория механизмов и машин», «Теория обработки металлов давлением».

Разбор примеров, приведенных в учебнике, ориентирует будущего бакалавра на выполнение конструктивных мероприятий с целью предупреждения циклического износа и ударных разрушений и помогает понять специфику задач этой тематики.

Успешное усвоение пройденного материала возможно лишь при своевременном выполнении домашних заданий, варианты которых содержатся в конце данного учебника. Домашние задания рекомендуется выполнять с применением современных средств программного обеспечения, в частности системы MathCAD.

1. ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ

1.1. Общее понятие об усталости материалов

Многие детали машин и механизмов, в частности вращающиеся валы, зубья зубчатых колес, дорожки тел качения подшипников, приводные ремни, пружины, в процессе эксплуатации испытывают напряжения, циклически изменяющиеся во времени.

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению (ГОСТ 23207–78 «Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения»).

Сопротивление усталости (выносливость) – свойство материала противостоять усталости.

Усталостное повреждение – необратимое изменение физико-механических свойств материала объекта под действием переменных напряжений.

Усталостное разрушение – разрушение материала нагружаемого объекта до полной потери его прочности или работоспособности вследствие распространения усталостной трещины.

Различают две разновидности усталости материала.

1) **Малоцикловая усталость** – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упруго-пластическом деформировании.

Она возникает при максимальных напряжениях, превышающих предел текучести материала, и сопровождается знакопеременным упруго-пластическим деформированием объема материала, большого по сравнению с размерами структурных составляющих (зерен, пор, включений). Число циклов до образования заметной трещины (длинной 0,5...1 мм и более) для стальных конструкций не превышает 10^4 циклов и зависит в основном:

- а) от величины пластической деформации детали в каждом цикле;
- б) от способности материала сопротивляться малоцикловому разрушению.

Явление малоцикловой усталости знакомо каждому, кто ломал проволоку, пластически деформируя ее в разные стороны.

2) *Многоцикловая усталость* – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании.

Она имеет место при напряжениях значительно ниже предела текучести ($\sigma_{\max} < 0,6\sigma_T$). В этом случае в макрообъеме материал деформируется упруго (его свойства с вполне удовлетворительной точностью описываются законом Гука $\sigma = E\varepsilon$). Однако большинство реальных материалов имеет сложную многокомпонентную структуру (зерна, поры, межзеренные прослойки, неметаллические включения в стали и т.д.). При упругом деформировании достаточно большого объема в микрообъемах (в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов) происходит локальное знакопеременное пластическое деформирование, которое называют *микрoпластическим*. Его многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приводит к ослаблению сечений и затем к внезапному долому деталей. Продолжительность стадии многоциклового усталости к моменту зарождения магистральной усталостной макротрещины для стальных конструкций превышает $10^5 - 10^6$ циклов.

Граница между малоциклового и многоциклового усталостью является условной. В тех случаях, когда пластическая деформация в макрообъеме отлична от нуля в каждом цикле, но мала по сравнению с упругой, условия зарождения трещины зависят и от упругой, и от пластической деформации. Это переходная зона между малоциклового и многоциклового усталостью. Для высокопластичных сплавов переходная зона смещается в сторону больших долговечностей, для хрупких – в сторону меньших.

В курсе «Сопrotивление материалов» традиционно рассматриваются только вопросы, связанные с изучением многоциклового усталости.

В качестве примера рассмотрим ось (рис. 1.1, а), вращающуюся с угловой скоростью ω . Хотя внешние силы F и являются постоянными величинами, она испытывает циклически изменяющиеся напряжения, поскольку частицы вращающейся оси (за исключением лежащих на оси симметрии) оказываются попеременно то в верхней (растянутой), то в нижней (сжатой) зоне поперечного сечения. Для рассматриваемой оси на рис. 1.1, а показана эпюра изгибающих моментов M_x под действием внешних сил F .

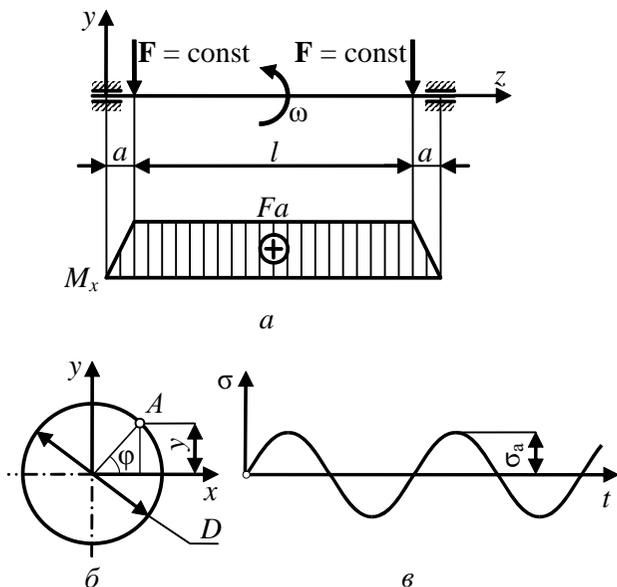


Рис. 1.1

Нормальное напряжение в точке A (рис. 1.1, б) поперечного сечения оси вагона

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_x} y.$$

Расстояние y от точки A до нейтральной линии сечения меняется во времени по закону

$$y = \frac{D}{2} \sin \omega t,$$

где ω – угловая скорость вращения оси.

Тогда

$$\sigma(t) = \frac{F a D}{I_x} \frac{D}{2} \sin \omega t.$$

Таким образом, нормальное напряжение σ в сечениях оси меняется по синусоиде (рис. 1.1, в) с амплитудой

$$\sigma_a = \frac{F a D}{I_x 2}.$$

1.2. Зарождение многоцикловой усталостной трещины и характер ее распространения. Основные признаки многоциклового усталостного излома

Усталостная трещина – частичное разделение материала под действием переменных напряжений (см. ГОСТ 23207–78).

При многоцикловой усталости (см. п. 1.1) в результате многократного нагружения в отдельных ослабленных микрообъемах элемента конструкции развивается локальное знакопеременное неупругое деформирование, приводящее к появлению микротрещин. Их развитие и слияние приводит к появлению макротрещины, размеры которой постоянно увеличиваются с ростом числа нагружений: вначале медленно, затем все быстрее.

Локальные процессы зарождения и первоначального развития трещины не оказывают заметного влияния на деформирование детали в целом, а ускоренное развитие трещины, как правило, непродолжительно. На дне трещины, как в остром надрезе, возникает большая концентрация напряжений. Материал в этом месте испытывает объемное напряженное состояние. Все это способствует дальнейшему росту трещины, увеличение которой в конечном итоге ослабляет сечение детали и приводит к ее внезапному хрупкому разрушению. Когда трещина достигает критической длины, происходит практически мгновенный долом. Часто долом происходит внезапно и становится причиной аварийных ситуаций.

Разрушение при переменных нагрузках носит *местный характер*, не затрагивающий всего материала конструкции в целом. Поэтому при своевременном обнаружении развивающихся трещин при переменных нагрузках во многих случаях нет необходимости ставить вопрос о замене всей конструкции. Достаточно заменить поврежденные части и устранить причины, вызвавшие возникновение трещин.

Усталостный излом – поверхность раздела, возникающая при усталостном разрушении объекта.

Многоцикловой усталостный излом деталей имеет характерный вид, позволяющий отличать его от разрушений при других видах нагружений. В качестве примера рассмотрим усталостный излом вала ведущего колеса автомобиля (рис. 1.2).

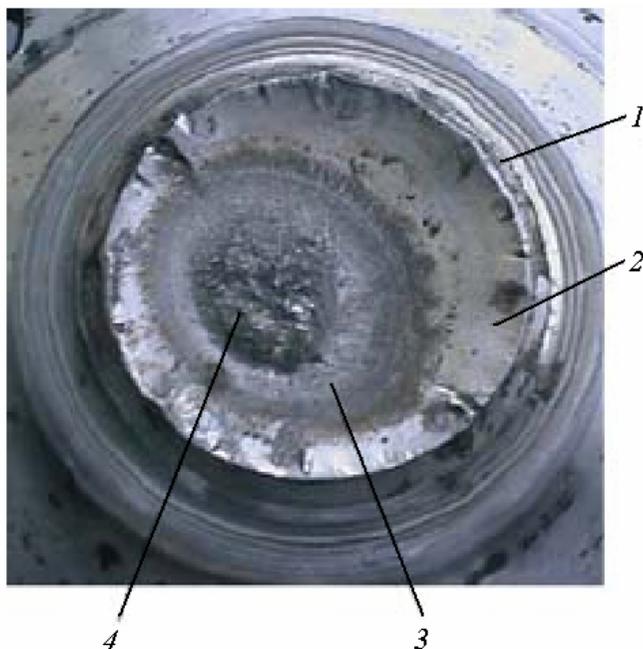


Рис. 1.2

Основные признаки многоциклового усталостного излома (см. рис. 1.2):

1 – очаг зарождения усталостного повреждения (нередко здесь можно заметить небольшой дефект, с которого начинается развитие трещины, – раковину, неметаллическое включение, царапину или забоину);

2 – зона постепенного продвижения трещины, для которой характерна гладкая блестящая поверхность как результат длительного приирания поверхностей трещины;

3 – зона ускоренного развития трещины;

4 – зона долома (имеет зернистую поверхность, характерную для хрупкого разрушения).

Долом – часть усталостного излома, возникающая в завершающей стадии разрушения из-за недостатка прочности сечения по трещине.

Более половины всех разрушений технических устройств связано с разрушением от многоциклового усталости (И.Я. Березин, О.Ф. Чернявский). Поэтому весьма актуальны задачи изучения поведения материалов при таком нагружении и разработки методов расчета, обес-

печивающих предотвращение усталостных разрушений конструкций в эксплуатации.

1.3. Цикл напряжений и его характеристики

Закон нагружения – функция, характеризующая изменение нагрузок во времени.

Периодическое нагружение – нагружение, характеризующееся периодическим изменением нагрузок.

Регулярное нагружение – нагружение, характеризующееся периодическим законом изменения нагрузок с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода при постоянстве параметров цикла напряжений в течение всего времени испытаний или эксплуатации.

Все виды нагружений, не удовлетворяющие этому определению, называют **нерегулярными**.

Ограничимся рассмотрением регулярного нагружения. Рассмотрим случай одноосного напряженного состояния. Пусть напряжения изменяются по гармоническому закону, представленному на рис. 1.3.

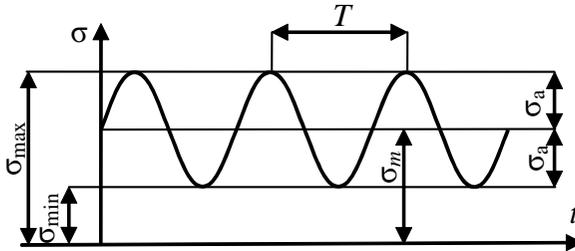


Рис. 1.3

Цикл напряжений – совокупность всех последовательных значений напряжений за один период их изменения при регулярном нагружении.

Период цикла напряжений T – продолжительность одного цикла напряжений.

Частота циклов f – отношение числа циклов напряжений к интервалу времени их действия.

Различают **пять основных параметров цикла напряжений** – величины σ_{max} , σ_{min} , R , σ_m , σ_a . При рассмотрении циклических касательных напряжений выполняют замену в обозначении с σ на τ . Каждый

цикл полностью определяется двумя любыми его параметрами, а остальные легко определить с помощью приведенных далее формул.

1) **Максимальное напряжение цикла** σ_{\max} – наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла.

2) **Минимальное напряжение цикла** σ_{\min} – наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла.

3) **Коэффициент асимметрии цикла** R – отношение минимального напряжения цикла к максимальному:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.$$

Коэффициент асимметрии цикла нормальных напряжений иногда обозначают R_{σ} , а касательных – R_{τ} .

4) **Среднее напряжение цикла** σ_m – постоянная (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений, равная алгебраической полусумме максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}.$$

5) **Амплитуда напряжений цикла** σ_a – наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла напряжений. Амплитуда равна алгебраической полуразности максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}.$$

Размах напряжений цикла – алгебраическая разность максимального и минимального напряжений цикла:

$$2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}.$$

Сложим почленно выражения для среднего напряжения и амплитуды цикла:

$$\sigma_m + \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2},$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a.$$

Вычтем почленно из выражения для среднего напряжения выражение для амплитуды цикла:

$$\sigma_m - \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} - \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2},$$

$$\boxed{\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a}.$$

Тогда для коэффициента асимметрии цикла получаем

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}.$$

При рассмотрении циклических касательных напряжений приведенные соотношения справедливы при замене σ на τ .

1.4. Классификация циклов напряжений

Классификация циклов напряжений представлена на рис. 1.4.

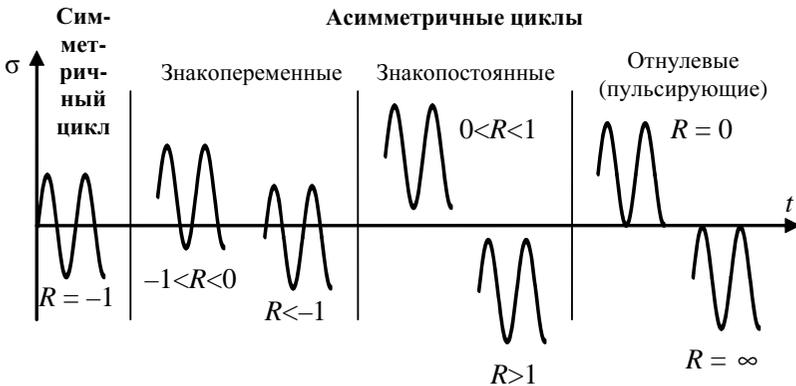


Рис. 1.4

Симметричный цикл напряжений – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку: $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$.

Асимметричный цикл напряжений – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разные абсолютные значения.

Сформулируем более короткое определение. Цикл называется *симметричным*, если $R = -1$ ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$), *асимметричным*, если $R \neq -1$.

Среди асимметричных циклов напряжений различают:

знакопеременный – цикл напряжений, изменяющихся по абсолютному значению и по знаку;

знакопостоянный – цикл напряжений, изменяющихся только по абсолютному значению;

отнулевой – знакопостоянный цикл напряжений, изменяющихся от нуля до максимума ($\sigma_{\min} = 0$) или от нуля до минимума ($\sigma_{\max} = 0$).

Отнулевой цикл иногда называют *пульсирующим*. Для такого цикла $R = 0$ (если $\sigma_{\min} = 0$) или $R = \infty$ (если $\sigma_{\max} = 0$).

Более удачное определение знакопостоянного и знакопеременного циклов сформулировано в учебнике «Сопротивление материалов» под ред. А.Ф. Смирнова. Если знаки максимального и минимального напряжений цикла одинаковы, то он называется *знакопостоянным*, а если они различны, то *знакопеременным*.

Любой асимметричный цикл можно представить как результат суммирования постоянного напряжения σ_m с напряжением, меняющимся по симметричному циклу с амплитудой σ_a . Например, при изменении напряжения по гармоническому закону

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t .$$

Подобные циклы – циклы, у которых коэффициенты асимметрии одинаковы (см. ГОСТ 23207–78); например, циклы 1, 2 на рис. 1.5:

$$R_1 = \frac{\sigma_{\min 1}}{\sigma_{\max 1}} = \frac{\sigma_{\min 2}}{\sigma_{\max 2}} = R_2 .$$

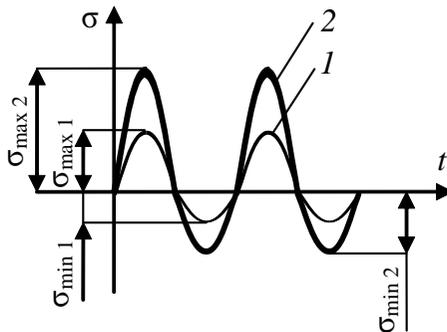


Рис. 1.5

1.5. Испытания на усталость при симметричном цикле напряжений в условиях чистого изгиба. Кривая усталости (кривая Вёлера)

Испытания на усталость – испытания, при которых определяют количественные характеристики сопротивления усталости.

Форма и размеры *образцов для испытаний на усталость* регламентированы ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».

Образец состоит из рабочей части и утолщенных головок, предназначенных для закрепления образцов в захватных приспособлениях испытательной машины. Рабочая часть образца представляет собой стержень круглого ($d = 5 \dots 25$ мм) или прямоугольного сечения с полированной поверхностью, изготовленный по точности не ниже седьмого квалитета. Расстояние между захватами испытательной машины выбирают так, чтобы исключить влияние усилий в захватах на напряженность в рабочей части образца. Наиболее часто используют образцы круглого сечения типа I (рис. 1.6, табл. 1.1) или типа II (рис. 1.7, табл. 1.2).

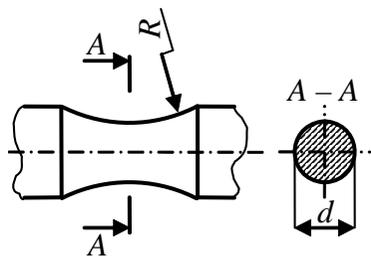


Рис. 1.6

Таблица 1.1

Параметры рабочей части образцов типа I (по ГОСТ 25.502–79)

d, мм	R, мм	d, мм	R, мм
5	$\geq 5d$	15	$\geq 5d$
7,5		20	≥ 90
10		25	
12			

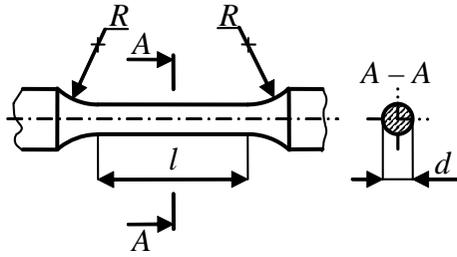


Рис. 1.7

Таблица 1.2

Параметры рабочей части образцов типа II (по ГОСТ 25.502-79)

d , мм	$l = 5d$, мм	R , мм
5	25	5
7,5	37,5	7
10	50	10
12	60	12
15	75	15
20	100	20
25	125	25

Наиболее распространенными являются испытания в условиях симметричного цикла. При этом обычно используют принцип чистого изгиба вращающегося образца (рис. 1.8).

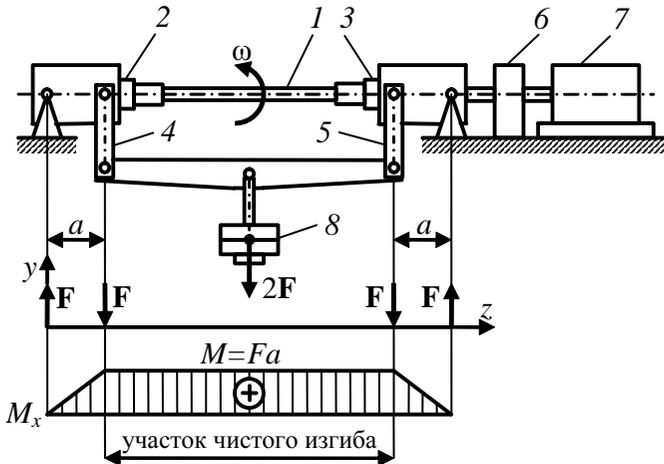


Рис. 1.8