

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. Н. ШАРЫГИН Л. Е. КАТКОВА

ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие



Владимир 2021

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.3я73

Ш25

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
К. В. Татмышевский

Кандидат педагогических наук, доцент
директор МАОУ «Промышленно-коммерческий лицей» (г. Владимир)
В. Е. Емельянов

Шарыгин, Л. Н. Испытания конструкционных материалов :
Ш25 учеб. пособие / Л. Н. Шарыгин, Л. Е. Каткова ; Владим. гос. ун-т
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Из-во ВлГУ, 2021. –
160 с. – ISBN 978-5-9984-1239-4.

Систематизирована информация по методам и средствам механических испытаний конструкционных материалов. Отражена тенденция развития испытательного оборудования. Используются разработки кафедры технологического и экономического образования Владимирского государственного университета. Представленный материал соответствует программе дисциплины «Основы материаловедения».

Может быть полезно студентам, обучающимся по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование», профиль «Технологическое и экономическое образование» и изучающим дисциплины технического творчества.

Табл. 1. Ил. 77. Библиогр.: 22 назв.

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.3я73

ISBN 978-5-9984-1239-4

© ВлГУ, 2021
© Шарыгин Л. Н.,
Каткова Л. Е., 2021

ВВЕДЕНИЕ

При создании материала разработчик проектирует требуемые свойства материала – механические, оптические, электрические магнитные и т. п. Механические свойства материалов характеризуют такие показатели, как прочность, упругость, твёрдость, хрупкость, вязкость, изнашиваемость, износостойкость, выносливость, ползучесть.

Прочность – сопротивление материала деформации и разрушению.

Упругость – свойство материала восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки.

Твёрдость – способность материала оказывать сопротивление деформации при проникновении в его поверхностный слой более твёрдого тела.

Хрупкость – свойство материала разрушаться без заметного поглощения механической энергии в необратимой форме.

Вязкость – способность сопротивляться ударным нагрузкам. Свойство материала, обратное хрупкости, без разрушения поглощать в заметных количествах механическую энергию в необратимой форме.

Изнашивание – процесс постепенного изменения размеров, формы, состояния поверхности вследствие поверхностного разрушения или повреждения под действием внешнего трения.

Износ – результат изнашивания, определяемый количественным методом.

Износостойкость – способность материалов деталей машин и других трущихся изделий сопротивляться изнашиванию.

Выносливость – свойство материала выдерживать, не разрушаясь, большое число повторнопеременных напряжений.

Ползучесть – способность материала медленно и непрерывно деформироваться при постоянном напряжении и повышенной температуре.

Количественные (числовые) характеристики прочностных параметров определяются стандартными испытаниями. К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований. Температурно-силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к служебным условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Вместе с тем методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества металлургической продукции. Поскольку необходимо иметь возможность сопоставления качества разных конструкционных материалов, методы испытаний механических свойств должны быть строго регламентированы стандартами.

Результаты определения механических свойств используют в расчётной конструкторской практике при проектировании машин и конструкций. Наибольшее распространение имеют следующие виды механических испытаний:

1. Статические кратковременные испытания однократным нагружением на одноосное растяжение – сжатие, твёрдость, изгиб и кручение.

2. Динамические испытания с определением ударной вязкости и её составляющих – удельной работы зарождения и развития трещины.

3. Испытания переменной циклической нагрузкой с определением предела выносливости материала.
4. Испытания на термическую усталость.
5. Испытания на ползучесть и длительную прочность.
6. Испытания на сопротивление развитию трещины с определением параметров вязкости разрушения.
7. Испытания материалов в условиях сложнапряжённого состояния, а также натурные испытания деталей, узлов и готовых конструкций.

В учебном пособии систематизирована информация по методам и средствам механических испытаний образцов материалов из известных источников [1 – 8]. Используются разработки кафедры технологического и экономического образования Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Глава 1

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Во многих случаях материалы, например металлические материалы, в конструкциях работают под статическими нагрузками. Поэтому для оценки механических свойств широко используются статические испытания, которые проводятся с применением разных схем напряжённого состояния в образце.

1.1. Испытания на растяжение

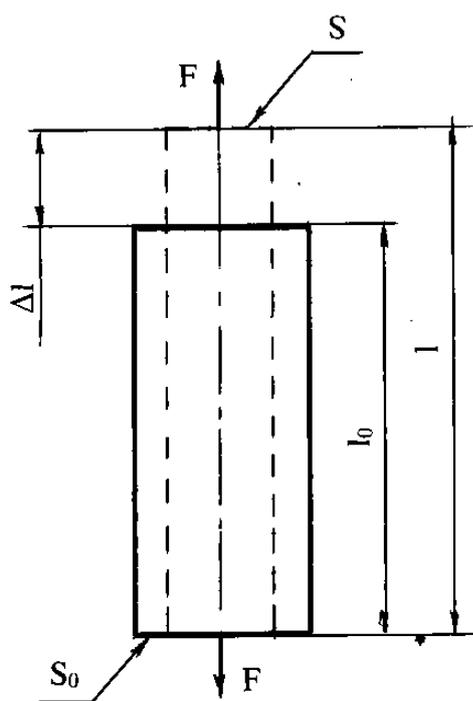


Рис. 1.1. Деформация растяжения

Испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84) позволяют определить прочность материала и его склонность к упругим и пластическим деформациям. Испытания проводят на специальных разрывных машинах с использованием стандартных образцов материала. Часто применяют образец круглого сечения, например, диаметром 5 мм и расчётной длиной 25 мм.

Усилие F разрывной машины (рис. 1.1) приводит к увеличению исходной длины рабочего (расчётного)

участка l_0 образца до значения l . Абсолютное приращение длины

$$\Delta l = l - l_0. \quad (1.1)$$

По результатам опыта выявляют диаграмму растяжения. На рис. 1.2 диаграмма растяжения построена в координатах: усилие F – абсолютное удлинение ΔL .

Характерные точки диаграммы растяжения:

OP – участок упругой деформации;

P – точка, указывающая начало пластической деформации образца;

E – точка, соответствующая удлинению образца на 0,05 %;

S_1, S_2 – площадка текучести;

B – точка наибольшей нагрузки;

K – точка, соответствующая разрушению образца.

Часто диаграмму растяжения (рис. 1.2) строят в координатах: нормальное напряжение $\sigma = F/S$, где S – сечение образца, относительное удлинение $\delta = \Delta L/L$. Напряжения в характерных точках:

$\sigma_{\text{пл}}$ – предел упругости (P);

$\sigma_{0,05}$ – напряжение, при кото-

ром остаточное удлинение образца достигает 0,05 % его расчётной длины l_0 (E);

σ_T – предел текучести (S_1, S_2);

σ_B – временное сопротивление (B);

$\sigma_{\text{разр}}$ – истинное сопротивление разрыву (K).

При расчётах нормального напряжения σ и расчётах относительной деформации δ принимают $l = l_0$ и $S = S_0$.

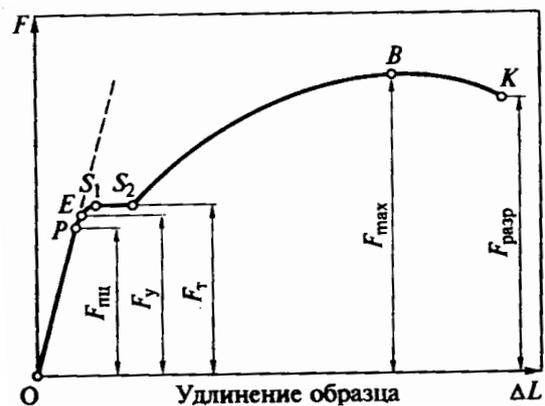


Рис. 1.2. Диаграмма растяжения

Начальный участок ОР диаграммы растяжения линейен, что соответствует элементарному закону Гука – для изотропного тела в направлении приложения внешней силы упругая деформация линейно связана с напряжением

$$\sigma = E\delta, \quad (1.2)$$

где E – модуль Юнга (модуль упругости 1-го рода).

Кроме деформации δ в направлении растяжения происходит деформация в поперечном направлении $\delta_{\text{п}}$. Для упругого участка характеристики отношения поперечной деформации к продольной постоянно

$$\delta_{\text{п}} = \varepsilon\delta \quad (1.3)$$

где ε – коэффициент Пуассона.

1.2. Испытания на сдвиг

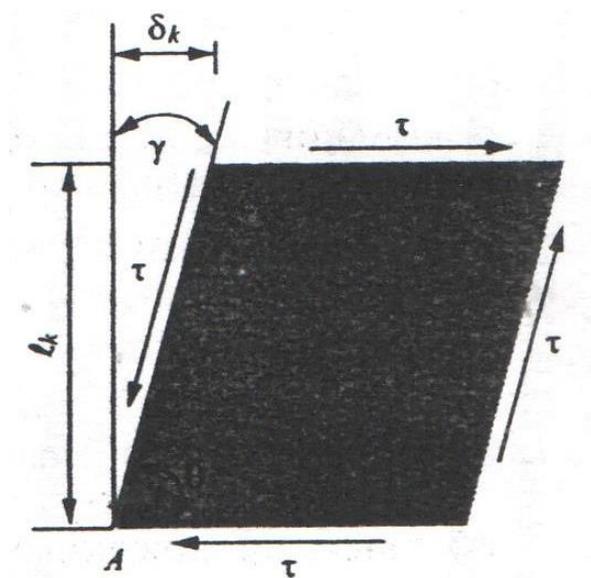


Рис. 1.3. Деформация сдвига

Схема испытаний на сдвиг показана на рис. 1.3. Под действием внешней силы прямоугольное сечение образца приобретает форму параллелограмма, при этом возникают касательные напряжения τ .

При деформации сдвига в результате действия касательного напряжения τ начальный угол образца становится острым углом Θ . Де-

формация сдвига γ в точке A определяется как

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \Theta, \quad (1.4)$$

где $\pi/2$ и Θ – углы в точке A до деформации и после, соответственно.

Так как деформация сдвига, подобно деформации при растяжении, обычно мала, то можно использовать аппроксимацию $\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$. В этом случае деформация сдвига γ определяется по формуле

$$\gamma = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \Theta\right) = \delta_k / l_k, \quad (1.5)$$

δ_k, l_k – см. рис. 1.3.

Элементарный закон Гука для сдвиговой деформации имеет вид

$$\tau = G \operatorname{tg} \gamma, \quad (1.6)$$

где G – модуль сдвига (модуль упругости 2-го рода). Обычно в формуле (1.6) принимают $\operatorname{tg} \gamma = \gamma$.

1.3. Испытания на сжатие

Испытания на сжатие применяют для сравнительно хрупких материалов – чугуны, строительные материалы. Схема испытаний на сжатие показана на рис. 1.4. Образец цилиндрической формы диаметром d_0 и высотой h_0 сжимается осевой силой P .

По мере сжатия на торцовых поверхностях образца возникают силы трения, направленные по радиусам к его центру и препятствующие деформации в горизонтальном направлении. В результате образец приобретает характерную бочкообразную форму, а схема напряженного состояния усложняется и становится различной в разных точках образца. В точках 1 и 2, например, возникает схема объемного сжатия, а в точке 3 – равноименное плоское напряженное состояние. Неоднородность

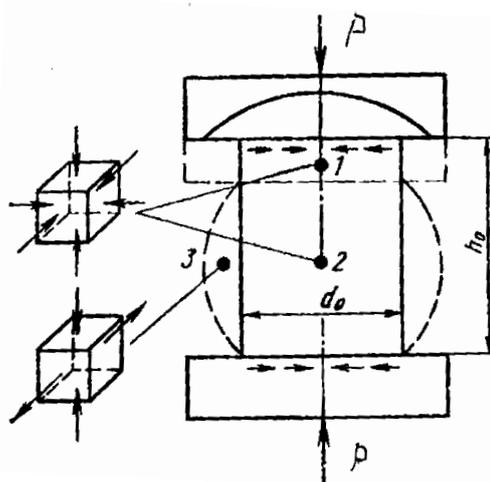


Рис. 1.4. Схема испытаний на сжатие

напряженного состояния образца в практике не учитывают, рассчитывая прочностные характеристики при сжатии по тем же формулам, что и при растяжении. Это придает дополнительную условность определяемым свойствам. Поэтому стараются уменьшить силы трения на опорных поверхностях образца.

Но полностью устранить контактные силы трения и обеспечить в течение всего испытания линейное напряженное состояние в образце не удастся. Это принципиальный недостаток испытаний на сжатие.

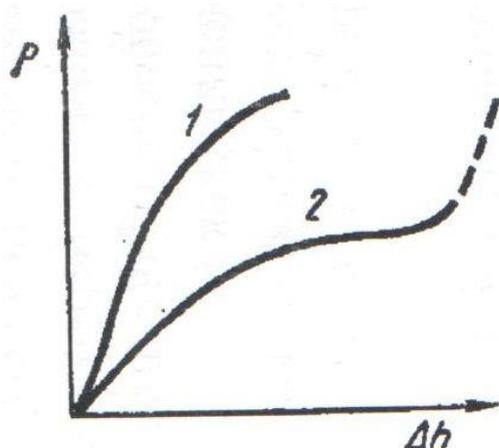


Рис. 1.5. Диаграмма сжатия:
1 – разрушающихся образцов
2 – не разрушающихся образцов

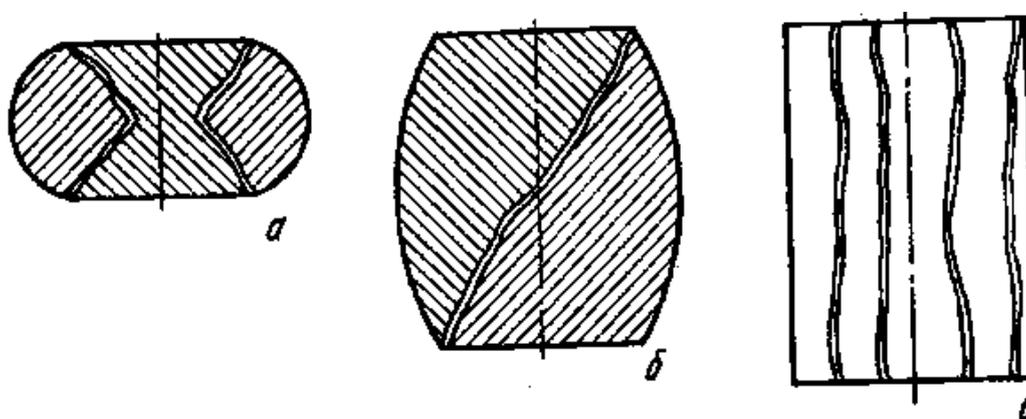
Чем меньше отношение высоты образца к диаметру, тем сильнее контактное трение влияет на результаты испытаний. С этих позиций следовало бы проводить испытания на возможно более длинных образцах. Но при сжатии длинных образцов трудно избежать их продольного изгиба. Как показывает опыт, оптимальной для цилиндрического образца является величина отношения h_0/d_0 в пределах 1-3.

Для определения модуля нормальной упругости при сжатии, пределов упругости и пропорциональности иногда используют плоские образцы в виде пластин толщиной 2-5 мм, длиной 100 и шириной 20 мм.

При испытании на сжатие машина может зафиксировать первичную диаграмму сжатия – зависимость усилия P от уменьшения высоты образца (абсолютной деформации) Δh . Вид диаграммы сжатия различен для материалов, разрушающихся и не разрушающихся (см. рис. 1.5) в результате испытания. В отличие от испытаний на растяжение

при сжатии удается разрушить далеко не любой материал. Достаточно пластичные металлы и сплавы при сжатии расплющиваются в тонкие пластины и не разрушаются при максимально возможных усилиях испытательной машины.

По диаграмме сжатия определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности. Понятно, что условный предел прочности материалов, не разрушающихся при сжатии, определить нельзя. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия полностью аналогична методике для растяжения.



**Рис. 1.6. Схемы разрушения образцов при испытаниях на сжатие:
а, б – путем среза; в – путем отрыва**

Характер разрушения сжимаемых образцов зависит от величины контактных сил трения. Если они велики, то обычно наблюдается разрушение путем среза (рис. 1.6, а, б); если же они незначительны, то фиксируется разрушение отрывом (рис. 1.6, в).

1.4. Испытания на изгиб

Применение испытаний на изгиб обусловлено широкой распространенностью этой схемы нагружения в реальных условиях эксплуатации и большей ее мягкостью по сравнению с растяжением, что дает

возможность оценивать свойства материалов, хрупко разрушающихся при растяжении. Испытания на изгиб удобны для оценки температур перехода из хрупкого состояния в пластичное (например, у хладноломких о. ц. к. металлов и интерметаллидов).

При испытаниях на изгиб применяют две схемы нагружения образца, лежащего на неподвижных опорах – рис. 1.7:

- нагрузка прикладывается сосредоточенной силой на середине расстояния между опорами;
- нагрузка прикладывается в двух точках на одинаковом расстоянии от опор.

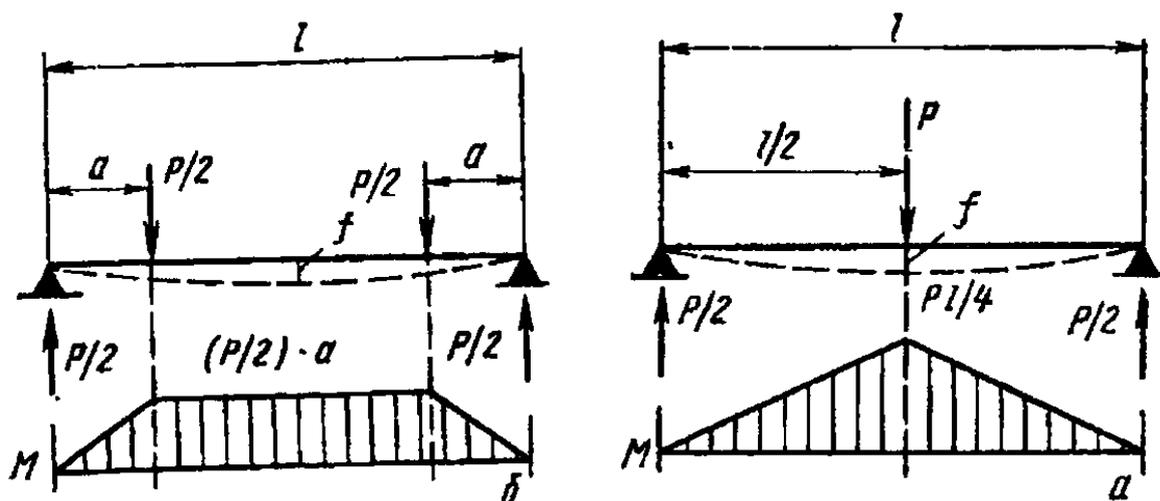


Рис. 1.7. Схемы нагружения при испытаниях на изгиб:

а – с сосредоточенной силой; б – с двумя симметричными нагрузками

Экспериментально первую схему реализовать гораздо проще, поэтому она и нашла наибольшее распространение. Следует учитывать, что вторая схема «чистого изгиба» во многих случаях обеспечивает более надежные результаты, поскольку здесь максимальный изгибающий момент возникает на определенном участке длины образца, а не в одном сечении, как при использовании первой схемы.

В изгибаемом образце создается неоднородное напряженное состояние, зависящее от геометрии образца и способа нагружения. При чистом изгибе узких образцов с прямоугольным сечением напряженное состояние в каждой точке можно считать линейным. В широких образках (с отношением ширины к высоте сечения более трех) при обеих схемах изгиба создается двухосное напряженное состояние из-за затруднения поперечной деформации. Нижняя часть образца оказывается растянутой, верхняя – сжатой. К тому же напряжения, связанные с величиной изгибающего момента, различны по длине и сечению образца. Максимальные напряжения возникают вблизи поверхности. Все это затрудняет оценку средних истинных напряжений и деформаций, строго характеризующих механические свойства при изгибе.

Образцы для испытаний на изгиб не имеют головок. Это еще одно преимущество по сравнению с растяжением, так как изготовление образцов с головками, особенно из хрупких материалов, значительно сложнее. На изгиб испытывают прямоугольные и цилиндрические стержни.

На рис. 1.8 приведена диаграмма изгиба в координатах: нагрузка P – стрела прогиба f . Если материал хрупкий, то кривая обрывается в точке b . Знание величины нагрузок $P_{пл}$, $P_{упр}$, P_T , P_b позволяет определять пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности при изгибе. Напряжения на стадии упругой деформации рассчитывают по обычным формулам сопротивления материалов.

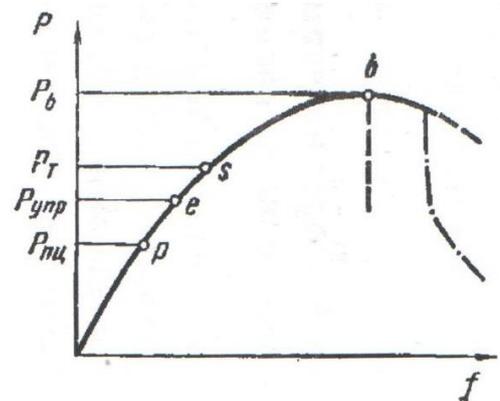


Рис. 1.8. Диаграмма изгиба

Условное нормальное напряжение в крайнем растянутом волокне $\sigma = M/W$, где M – изгибающий момент, а W – момент сопротивления сечения. В случае нагружения сосредоточенной силой (см. рис. 1.7, а) $M = Pt/4$. Для прямоугольного образца $W = bh^2/6$, а для цилиндрического $W = \pi d_0^3/32$.

Следовательно, рабочей формулой для расчета упругих напряжений при изгибе образцов прямоугольного сечения является

$$\sigma = 3Pl/2bh^2, \quad (1.7)$$

а для цилиндрических образцов

$$\sigma = 8Pl/\pi d_0^3. \quad (1.8)$$

По формулам (1.7) и (1.8) часто рассчитывают все прочностные характеристики при изгибе. Но достаточно точные результаты получаются только при определении пределов пропорциональности и упругости.

Из-за неравномерности распределения напряжений по сечению изгибаемого образца определяют два предела текучести – номинальный и реальный. Номинальный предел текучести при изгибе рассчитывают по формулам (1.7) и (1.8), предполагая, что напряжения линейно возрастают от оси образца до его поверхности, где и достигается заданный допуск на удлинение. Реальный предел текучести определяют с учетом действительного распределения напряжений по сечению как истинное напряжение, при котором в поверхностных волокнах возникает остаточная деформация заданной величины.

На практике чаще находят номинальный предел текучести, используемый в инженерных расчетах. Для большинства металлических

материалов он на $\sim 20\%$ выше условного предела текучести при основном растяжении.

Предел прочности при изгибе можно рассчитать по формулам (1.7) и (1.8) только в случае хрупкого разрушения. При значительных пластических деформациях эти формулы, строго говоря, неприменимы.

1.5. Испытания на кручение

Кручение осуществляется двумя разными по величине и противоположно направленными крутящими моментами, которые прикладываются к концам образца в плоскостях, нормальных его продольной оси. В рабочей части образца возникает разноименное плоское напряженное состояние с коэффициентом мягкости $a \approx 0,8$, т. е. большим, чем при растяжении. В то же время в отличие от сжатия и изгиба при испытании на кручение до разрушения можно довести любой материал.

Максимальные касательные напряжения при кручении действуют в плоскостях, перпендикулярных оси образца, наибольшие же нормальные напряжения – под углом 45° , причём $S_{\max} = t_{\max}$. После разрушения срезом и отрывом получают характерные формы излома (рис. 1.9), по которым можно однозначно определить тип разрушения.

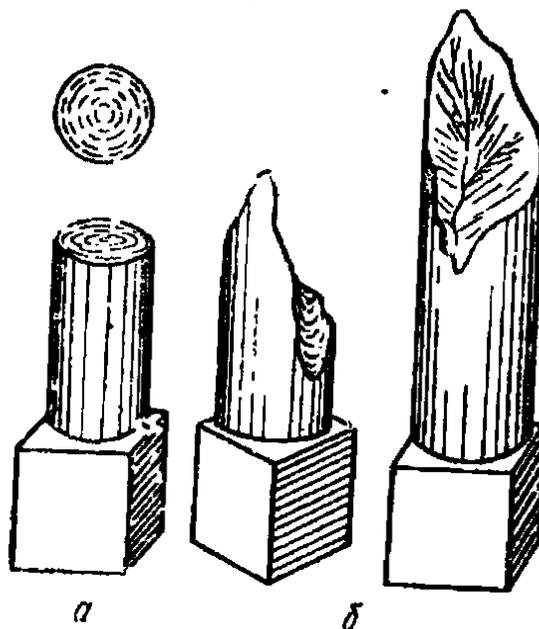


Рис. 1.9. Виды образцов, разрушающихся при кручении:
а – путем среза; б – путем отрыва

Методика испытаний образцов из любых материалов диаметром не менее 5 мм стандартизована (ГОСТ 3565-80). Образцы должны иметь цилиндрическую рабочую часть и квадратные головки. Образец с диаметром рабочей части 10 и расчётной длиной 100 или 50 мм принят за нормальный.

В качестве меры деформации в процессе испытания фиксируется угол закручивания φ .

Во время испытания каждый захват машины поворачивается на определенный угол (большой у активного захвата). Угол закручивания образца равен разности этих углов. Однако он включает паразитные деформации зажимов и головок образца. Для их исключения угол закручивания определяют на расчетной длине l_0 .

Расчетный угол закручивания φ равен

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (1.9)$$

В результате испытаний получают диаграмму кручения в координатах $M_{кр} - \varphi$ (рис. 1.10). Эта диаграмма состоит из участка упругой ($O\rho$) и пластической деформации ρk . Из-за отсутствия значительного местного сужения ниспадающего участка на диаграмме кручения не бывает, хотя после образования первых трещин деформация становится неравномерной, сосредотачиваясь вблизи излома.

По аналогии с другими статическими испытаниями при кручении определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, а также истинный предел прочности. Но не все эти свойства выражают не через нормальные, а через касательные напряжения. В области упругой деформации кручения цилиндрического образца

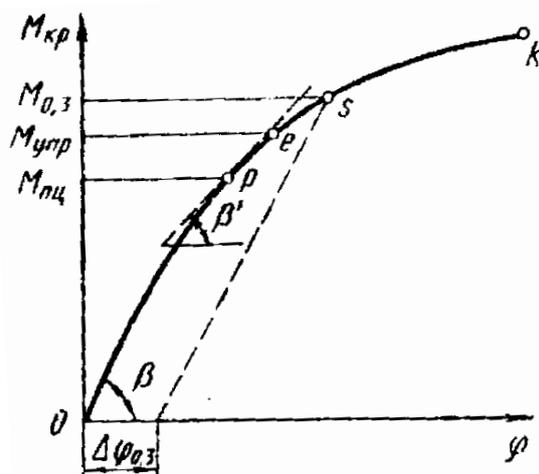


Рис. 1.10. Диаграмма кручения

$$\tau_{\max} = M_{кр}/W = M_{кр}d/2J_p = 16M_{кр}/\pi d^3, \quad (1.10)$$

где d – диаметр рабочей части образца;

W – момент сопротивления;

J_p – полярный момент инерции сечения для круглого образца;

$$J_p = \pi d^4/32.$$

Формула (1.10) дает хорошие результаты и в области малых пластических деформаций, но после значительного пластического течения она уже непригодна. По ней рассчитывают все перечисленные выше прочностные свойства при кручении, кроме истинного предела прочности. Последний определяют по формуле, учитывающей поправку на пластическую деформацию

$$t_k = \frac{4}{\pi d^3} (3M_{кр} + \Theta \frac{dM_{кр}}{d\theta}), \quad (1.11)$$

где $M_{кр}$ – наибольший крутящий момент, предшествующий разрушению образца;

Θ - удельный угол закручивания перед разрушением (в радианах на 1 мм), который равен

$$\Theta = (\varphi_1 - \varphi_2)/l_0. \quad (1.12)$$

Предел пропорциональности при кручении $\tau_{пл}$ – это условное касательное напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между напряжениями и деформациями достигает такой величины, когда тангенс угла (см. рис. 1.10, β), образуемого касательной к диаграмме кручения и осью деформаций, превышает первоначальное значение ($\text{tg } \beta$) на 50 %.

Методика определения $\tau_{пл}$ аналогична описанной на примере предела пропорциональности при растяжении.

Расчет ведут с использованием формулы (1.11) принимая значение крутящего момента равным $M_{кр.пл}$.

Предел упругости при кручении $\tau_{упр}$ – условное касательное напряжение, при котором образец подвергается остаточной сдвиговой деформации на заданную величину. Допуск на остаточную деформацию задается по величине относительного сдвига

$$g = [(\varphi_1 - \varphi_2)d/2l_0] \cdot 100 \%, \quad (1.13)$$

который должен быть равен 0,0045; 0,0075 или 0,016 %.

Методика определения предела упругости аналогична рассмотренной для $\tau_{пл}$. За предел упругости $\tau_{упр}$ принимают напряжение, при котором относительный сдвиг становится равным сумме сдвига в момент достижения $\tau_{пл}$ и заданного допуска.

На стадии упругой деформации по результатам испытания на кручение может быть определен модуль сдвига:

$$G = M_{кр}l/[(\varphi_1 - \varphi_2) J_p]. \quad (1.14)$$

Основной характеристикой пластичности при кручении является относительный сдвиг g , определяемый по формуле (1.13) в момент разрушения. Величина g при этом включает как упругую, так и остаточную деформацию. Для пластичных материалов, у которых вклад упругой деформации по сравнению с пластической относительно мал, общий сдвиг можно без большой погрешности принять за остаточный. Для малопластичных металлов и сплавов при расчете остаточного относительного сдвига необходимо вычесть из общего γ , определяемого по формуле (1.13), упругий сдвиг $g_{упр} = (\tau_{пл}/G) \cdot 100 \%$.

1.6. Твердость материалов

Под твердостью понимается свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размера. Эта формулировка пригодна не для всех существующих методов оценки твердости. Разнообразие этих методов и разный физический смысл чисел твердости затрудняют выработку общего определения твердости как механического свойства. В разных методах и при различных условиях проведения испытания числа твердости могут характеризовать упругие свойства, сопротивление малым или большим пластическим деформациям, сопротивление материала разрушению.

По широте применения испытания на твердость, особенно при комнатной температуре, конкурируют с наиболее распространенными испытаниями на статическое растяжение. Это объясняется простотой,

высокой производительностью, отсутствием разрушения образца, возможностью оценки свойств отдельных структурных составляющих и тонких слоев на малой площади, легко устанавливаемой связью результатов определения твердости с данным других испытаний. При измерении твердости в поверхностном слое образца под индентором возникает сложное напряженное состояние, близкое к объемному сжатию, которое характеризуется наибольшим коэффициентом мягкости по сравнению с другими видами механических испытаний. Поэтому возможны получение «пластических» состояний, исключение разрушения и оценка твердости практически любых, в том числе и хрупких металлических материалов.

1.6.1. Метод Бринелля

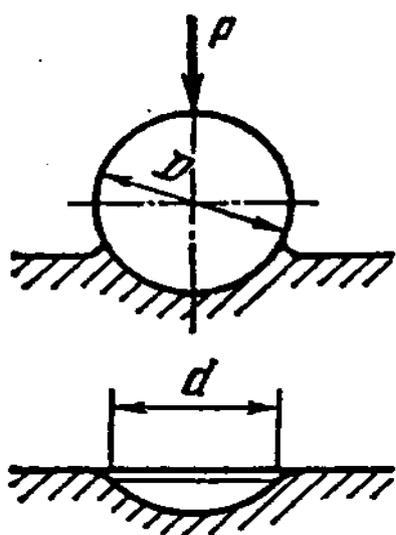


Рис. 1.11. Схема измерения твердости по Бринеллю

Испытание по методу Бринелля (рис. 1.11) состоит во вдавливании в испытуемое тело стального шарика диаметром D под действием постоянной нагрузки P и измерении диаметра отпечатка d . Число твердости по Бринеллю $HВ$ определяется величиной нагрузки P , деленной на сферическую поверхность отпечатка. Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость металла. На практике твердость определяют не по формулам, а по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка d .

Диаметр отпечатка получается тем меньше, чем выше сопротивление материала образца деформации, производимой индентором.

Число твердости по Бринеллю (НВ) есть отношение нагрузки P , действующей на шаровой индентор диаметром D , к площади F шаровой поверхности отпечатка

$$\text{НВ} = P/F = P / \left[\frac{\pi D}{2} (D - (\sqrt{D^2 - d^2})) \right]. \quad (1.15)$$

Размерность площади дается в мм^2 , а силы – в кгс (1 кгс = 9,8 Н). Диаметр D применяемого шара и величина прикладываемой силы F , связанные соотношением F/D^2 , дают значение 1, 5, 10 или 30; диаметры шаров бывают 1, 2, 5 или 10 мм. В принципе равным значение F/D^2 будут соответствовать равные значения твердости независимо от диаметра применяемого шара.

Полученное значение твердости иногда дополняют цифрами, указывающими диаметр использованного шарика, мм, нагрузку, кгс, и продолжительность выдержки, с. Например, НВ 5/750/30/–350 – это число твердости по Бринеллю (350), полученное при вдавливании шарика с $D = 5$ мм нагрузкой $P = 750$ кгс (7500 Н) в течение $\tau = 30$ с.

Испытание Бринелля не может применяться к очень мягким или очень твердым материалам. В первом случае размер углубления будет равен диаметру шара, а во втором – углубления либо не будет, либо оно будет настолько малым, что невозможно будет провести на нем измерения. Если измерения не были эффективны при толщине испытуемого образца, то толщина материалов, подвергающихся испытанию, должна быть по крайней мере в десять раз больше углубления. Методом Бринелля можно испытывать материалы с твердостью от НВ 8 до НВ 450.

1.6.2. Метод Виккерса

Этот метод второй по распространенности после метода Бринелля. При стандартном измерении твердости по Виккерсу в поверхность образца вдавливают алмазный индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha \approx 136^\circ$. После удаления нагрузки $P = 10 \div 1000$ Н, действовавшей определенное время (10 – 15 с), измеряют диагональ отпечатка d , оставшегося на поверхности образца. Число твердости HV (записываемое без единиц измерения, например 230 HV) определяют делением нагрузки в килограммах на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка $F = (d^2/2) (1/\sin \alpha/2)$, мм².

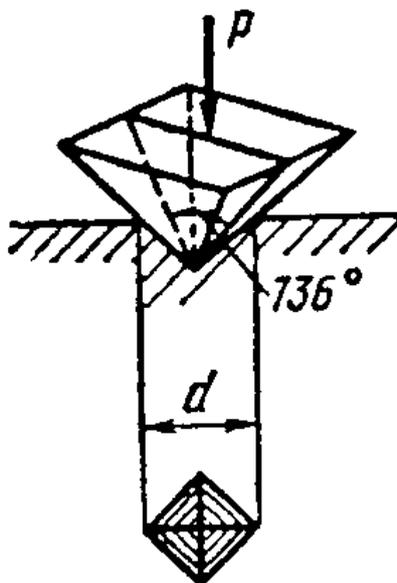


Рис. 1.12. Схема измерения твердости по Виккерсу

боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка $F = (d^2/2) (1/\sin \alpha/2)$, мм²

$$HV = (2P \sin \alpha/2)/d^2 = 1,854P/d^2. \quad (1.16)$$

Если число твердости выражают в МПа, то после него указывают единицу измерения (например, HV = 3200 МПа).

Измерив диагональ d восстановленного отпечатка и зная использованную нагрузку P , можно найти число твердости по специальным таблицам, составленным с использованием формулы (1.16).

Относительно небольшие нагрузки и малая глубина вдавливания индентора обуславливают необходимость более тщательной подготовки поверхности, чем при измерении твердости по Бринеллю. Образцы для замера твердости HV, как правило, отполированы и их поверхность свободна от наклепа.

Испытание Виккерса более точно по сравнению с испытанием Бринелля, так как диагонали квадрата измеряются с меньшей ошибкой,

чем диаметр круга. С другой стороны, его применение имеет некоторые ограничения по сравнению с испытанием Бринелля.

1.6.3. Метод Роквелла

При измерении твердости по Роквеллу индентор – алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм или стальной шарик диаметром 1,5875 мм ($1/16$ дюйма) – вдавливаются в образец под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок: предварительной P_0 и общей $P = P_0 + P_1$, где P_1 – основная нагрузка.

Число твердости по Роквеллу измеряют в условных единицах, оно является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой.

Схема определения твердости по Роквеллу при вдавливании алмазного конуса приведена на рис. 1.13. Сначала индентор вдавливается в поверхность образца под предварительной нагрузкой $P_0 = 100$ Н, которая не снимается до конца испытания. Это обеспечивает повышенную точность испытания, так как исключает влияние вибраций и тонкого поверхностного слоя. Под нагрузкой P_0 индентор погружается в образец на глубину h_0 . Затем на образец подается полная нагрузка $P = P_0 + P_1$ и увеличивается глубина вдавливания. Последняя после снятия основной нагрузки P_1 (когда на индентор вновь действует только предварительная нагрузка P_0) определяет число твердости по Роквеллу (HR). Чем больше глубина вдавливания h , тем меньше число твердости HR.

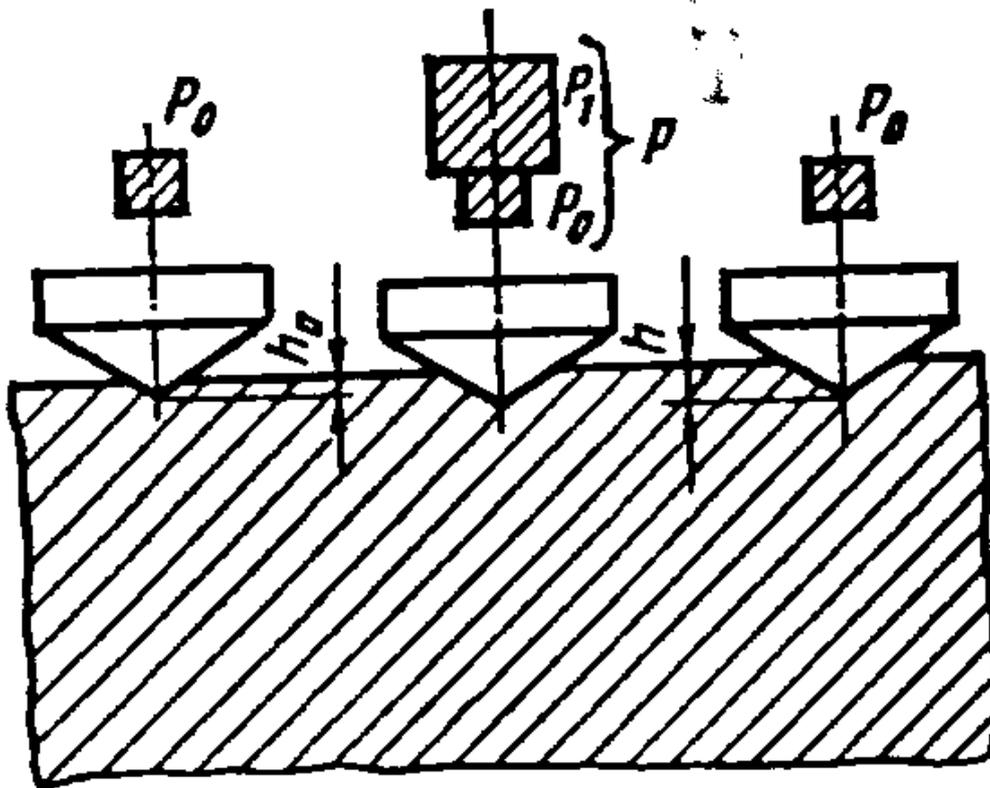


Рис. 1.13. Схема измерения твердости по Роквеллу

Число твердости по Роквеллу получают по формуле

$$\text{твердость} = E - e, \quad (1.17)$$

где E – константа, определяемая по форме индентора. Для конусного алмазного индентора $E = 100$, для стального шара $E = 130$;

e – остаточное проникновение индентора обусловлено дополнительной силой.

Шкалы Роквелла даются для определенного индентора и прикладываемой дополнительной силы. В табл. 1.1 приведены шкалы и типы используемых материалов, с которыми проводится испытание Роквелла. Что касается результатов испытания Роквелла, обозначаемых как HR, то шкала помечает их буквами при оценке. Шкалы В и С, как правило, применяются для металлов.

Шкалы Роквелла и типичные применения

| Шкала | Индентор | Сила [кН] | Типичные применения |
|-------|----------------|-----------|--|
| A | Алмаз | 0.59 | Тонкая сталь и поверхностно цементированная сталь |
| B | Шар Ø 1.588 мм | 0.98 | Медные сплавы, алюминиевые сплавы, мягкие стали |
| C | Алмаз | 1.47 | Сталь, твердые литейные чугуны, глубоко цементированная сталь |
| D | Алмаз | 0.98 | Тонкая сталь и среднецементированная сталь |
| E | Шар Ø 3.175 мм | 0.98 | Литейный чугун, алюминиевые, магниевые и подшипниковые сплавы |
| F | Шар Ø 1.588 мм | 0.59 | Отожженные медные сплавы, мягкие тонколистовые металлы, латунь |
| G | Шар Ø 1.588 мм | 1.47 | Ковкие чугуны, пушечные бронзы, бронзы, медно-никелевые сплавы |
| H | Шар Ø 3.175 мм | 0.59 | Алюминий, свинец, цинк |
| K | Шар Ø 3.175 мм | 1.47 | Алюминий и магниевые сплавы |
| L | Шар Ø 6.350 мм | 0.59 | Пластмассы |
| M | Шар Ø 6.350 мм | 0.98 | То же |
| P | Шар Ø 6.350 мм | 1.47 | - |
| R | Шар Ø 12.70 мм | 0.59 | Пластмассы |
| S | Шар Ø 12.70 мм | 0.98 | - |
| V | Шар Ø 12.70 мм | 1.47 | - |

Для большинства обычных инденторов в испытании Роквелла размер проникновения лучше иметь малым. Это локализует изменение

структуры, так как состав может влиять на результаты испытания. Однако в отличие от испытаний Бринелля и Виккерса здесь не требуются полированные поверхности для точных измерений.

Испытания Бринелля, Виккерса и Роквелла могут применяться к полимерным материалам. Испытание Роквелла предпочтительнее, так как измерение проникновения в глубь материала удобнее, чем проникновения по площади поверхности, и оно употребляется более широко. Шкала R является наиболее часто используемой шкалой.

1.6.4. Другие методы

Дюрометр Шора для измерения твердости полимеров и эластомеров дает значения твердости по числовой шкале Шора. Для шкалы А усеченный конус индентора придавливается к поверхности материала при нагрузке 0.8 Н. Измеряется глубина проникновения индентора. Это может быть сделано немедленно при приложенной нагрузке, а затем при нагрузке, изменяющейся во времени. Для шкалы D применяется индентор с круглым кончиком конуса, нагрузка 44.5 Н.

В испытании Мооса твердость оценивается по сопротивлению материала царапанию. За эталоны шкалы Мооса приняты 10 сортов минералов: каждый может царапать предшествующий ему шкале материал, но не будет царапать следующий за ним.

Материалы: 1 – тальк; 2 – гипс; 3 – кальциевый шпат; 4 – флюорит; 5 – апатит; 6 – полевой шпат; 7 – кварц; 8 – топаз; 9 – корунд; 10 – алмаз.

Твердость материала по Моосу при испытании на единицу меньше номера того минерала, который царапал его.

На рис. 1.14 показан основной диапазон значений твердости по Виккерсу, Бринеллю, Роквеллу и Моосу. Это приблизительная связь

между значениями твердости и пределами прочности на растяжение в МПа ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$) примерно равен 3.54 значения твердости по Бринеллю, а для закаленных и отпущенных сталей – 3.24. Для латуни коэффициент примерно равен 5.6, а для алюминиевых сплавов около 4.2.

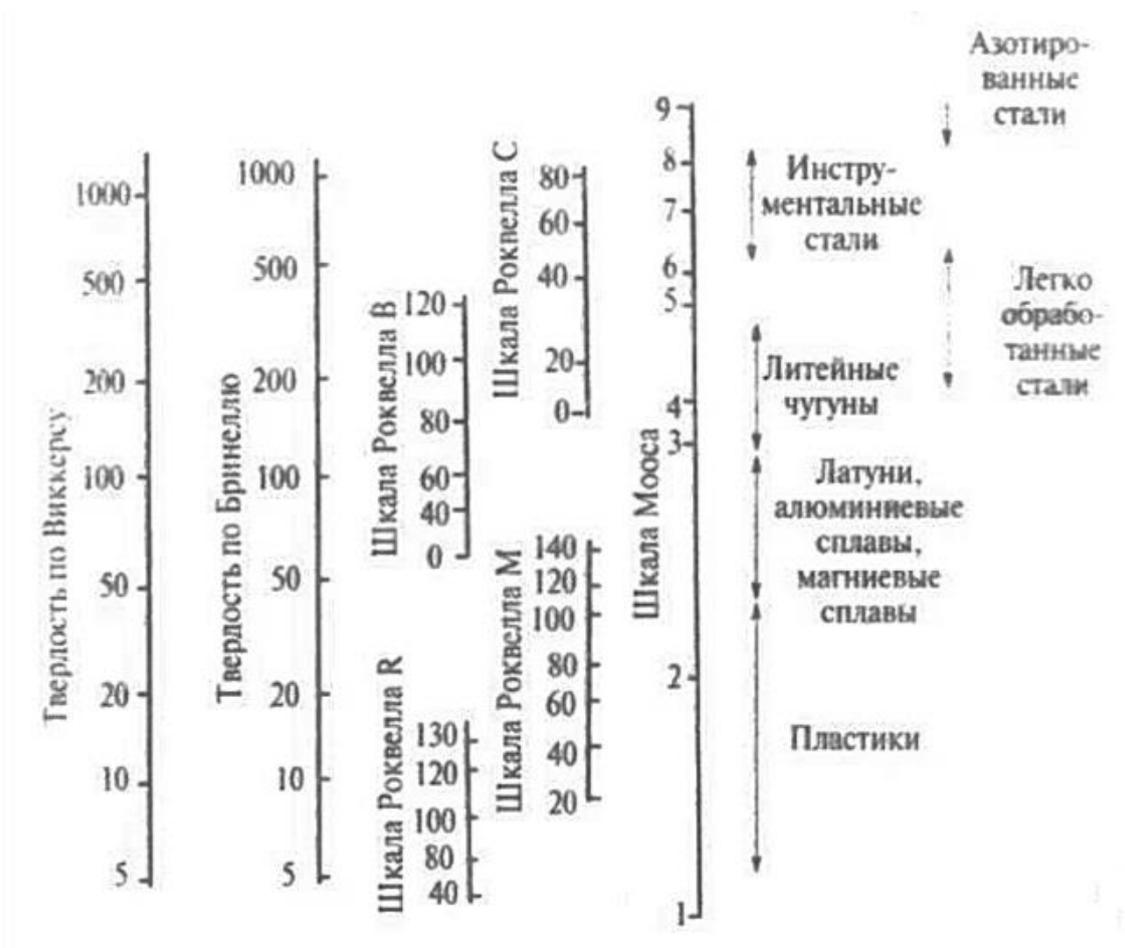


Рис. 1.14. Шкалы твердости и ее типичные значения

1.7. Испытания на ползучесть

Многие детали должны работать под нагрузкой в течение длительного времени при определенной температуре. При этом происходит медленная пластическая деформация металла под действием постоянной нагрузки, создающей в детали напряжения, превышающие предел упругости, но меньшие, чем предел текучести материала детали при данной температуре. Такая деформация называется ползучестью.

Различают ползучесть при высоких и низких температурах. Более подробно изучена высокотемпературная ползучесть. При деформации нагретого металла в нем развиваются два противоположных процесса: упрочнение за счет наклепа при пластической деформации и разупрочнение в результате нагрева. Если второй процесс преобладает, то в металле начинают развиваться диффузионные разупрочняющие процессы – отдых, коагуляция фаз, рекристаллизация, способствующие ползучести. Если при высоких температурах ползучесть происходит в результате диффузионных процессов, то при низких температурах она осуществляется за счет движения и размножения дислокаций, имеет

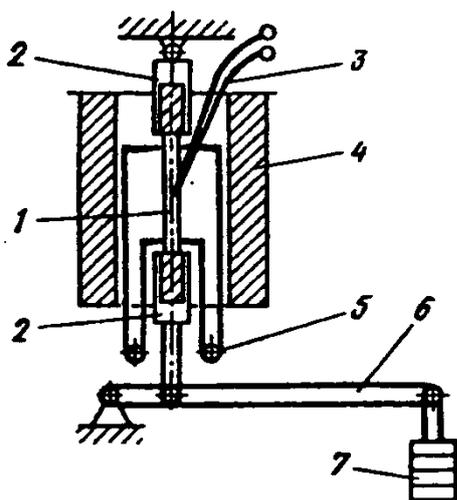


Рис. 1.15. Схема установки для испытания на ползучесть: 1 – образец; 2 – захват машины; 3 – термопара; 4 – печь; 5 – зеркальный индикатор для измерения деформации; 6 – рычаг; 7 – груз

кающую в образце деформацию измеряют и по результатам испытаний серии образцов строят кривые длительной прочности и ползучести (рис. 1.16).

термоактивизированную природу и зависит от ряда факторов, из которых наибольшую роль играют температура испытаний и структура металла.

Основными критериями жаропрочности металлов являются предел длительной прочности и предел ползучести.

Испытания на ползучесть проводят по ГОСТ 3248-81. Схема установки приведена на рис. 1.15.

Образец помещают в электрическую печь, нагревают до заданной температуры и прикладывают к нему определенную постоянную нагрузку. Возникающую в образце деформацию измеряют и по результатам испытаний

Пределом длительной прочности называют напряжение, которое приводит к разрушению образца при заданной температуре за определенное время, соответствующее условиям эксплуатации изделий. Предел длительной прочности обозначают σ_{τ}^t , где индексы t и τ обозначают температуру и время испытаний: например, $\sigma_{200}^{700} = 300$ МПа означает, что длительная прочность металла при испытании в течение 200 ч при 700°C составляет 300 МПа.

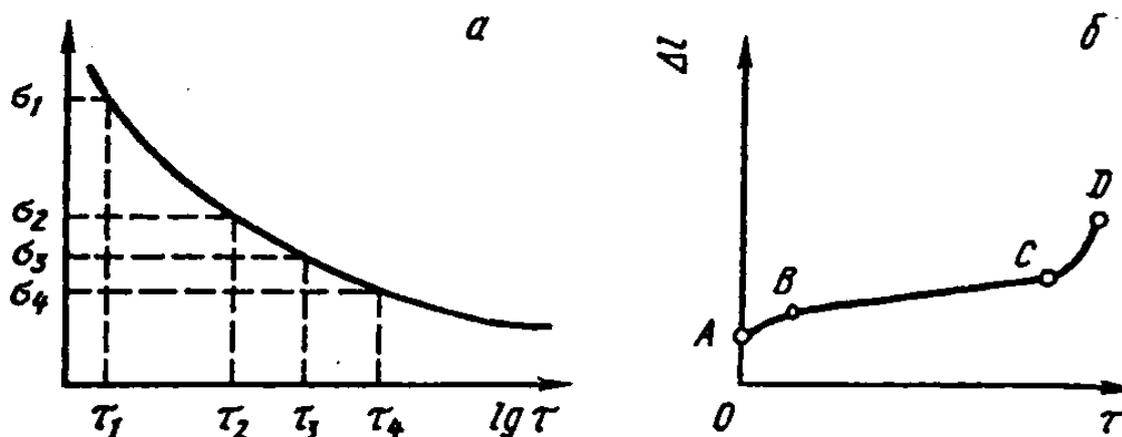


Рис. 1.16. Кривые длительной прочности (а) и ползучести (б)

Кривая ползучести состоит из четырех участков (рис. 1.16). Участок OA соответствует упругой и пластической деформации, возникшей в момент приложения нагрузки. Участок AB характеризует неустановившуюся ползучесть, где металл деформируется с неравномерной скоростью, участок BC – установившуюся ползучесть и участок CD – ускоренное разрушение, связанное с образованием шейки.

Пределом ползучести называют напряжение, вызывающее заданную суммарную деформацию за определенное время при данной температуре. Предел ползучести обозначают $\sigma_{\delta/\tau}^t$, где t – температура, δ – суммарное удлинение, τ – время. Например, $\sigma_{1/1000}^{400} = 350$ МПа означает, что предел ползучести металла при 1 %-й деформации за 1000 ч при температуре 400 °C составляет 350 МПа. Для деталей, длительное

время работающих при повышенных температурах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например 0,1 % за 10^4 ч или за 10^5 ч.

Условия эксплуатации многих изделий, работающих при низких температурах, предусматривают их длительную безаварийную работу (более 10 лет) под нагрузкой. В таких изделиях, как резервуары и емкости для хранения и транспортировки криогенных жидкостей, обладающих повышенным запасом упругой энергии в системе, деформация, обусловленная ползучестью, может способствовать значительному росту напряжений в отдельных зонах конструкции. При этом, учитывая действие низких температур эксплуатации, существенно усиливается опасность хрупкого разрушения.

При низкотемпературных испытаниях ползучести необходимая температура создается за счет того, что образец находится в среде охлаждающей жидкости, а постоянное нагружение передается на образец через верхний или нижний захват испытательной машины.

Глава 2

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТНИЯ

При эксплуатации различные детали и конструкции часто подвергаются ударным нагрузкам. В качестве примера можно привести переезд автомобиля через выбоину на дороге, взлет и посадку самолетов, высокоскоростную обработку металла давлением (при ковке и штамповке) и др. Для оценки способности металлических материалов переносить ударные нагрузки используют динамические испытания, которые широко применяются также для выявления склонности металлов к хрупкому разрушению. Стандартизованы и наиболее распространены ударные испытания на изгиб образцов с надрезом. Помимо них используются методы динамического растяжения, сжатия и кручения.

Скорости деформирования и деформации при динамических испытаниях на несколько порядков больше, чем при статических. Так, в стандартных испытаниях на динамический изгиб скорость деформирования составляет 3-5 м/с, а скорость деформации порядка 10^2 с^{-1} , в то время как при статических испытаниях эти величины 10^{-5} — 10^{-2} м/с и 10^{-4} — 10^{-1} с^{-1} соответственно.

2.1. Испытания на ударный изгиб

Основным динамическим испытанием является метод испытания на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78) с определением ударной вязкости металла. Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра (рис. 2.1).

Ударная вязкость KC , Дж/см², определяется как отношение работы разрушения K , затраченной на деформацию и разрушение ударным изгибом надрезанного образца, к начальной площади поперечного сечения образца в месте надреза S_0 по формуле $KC = K / S_0$.

В зависимости от вида концентратора напряжений различают образцы трех типов: с радиусом дна надреза 1,0 мм (тип U); 0,25 мм (тип V) и инициированной трещиной (тип T) (рис. 2.2).

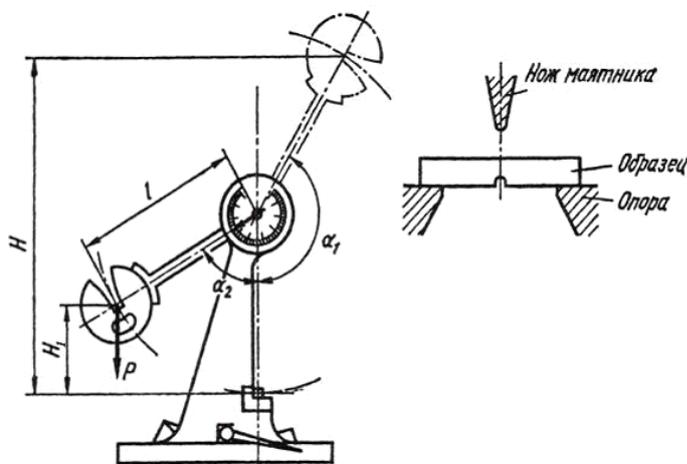


Рис. 2.1. Схема испытаний на ударную вязкость

V) и инициированной трещиной (тип T) (рис. 2.2).

Образец устанавливают на опорах копра и наносят удар по стороне образца, противоположной надрезу. Работа, затраченная на разрушение образца, определяется так.

$$K = P g (H - h) = P g l (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1),$$

где P - масса маятника;

g - ускорение силы тяжести;

H, h - высота подъема маятника до удара и после разрушения образца;

l - длина маятника;

α_2, α_1 - углы подъема маятника до удара и после разрушения образца.

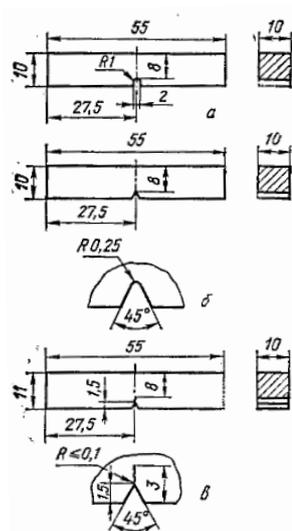


Рис. 2.2. Основные виды образцов для испытания на ударную вязкость: a – I тип (тип Менаже); b – II тип (тип Шарпи); $в$ – тип 15 (с инициированной трещиной)

Величины P, H, l, α_1 - постоянны, поэтому при испытаниях значение работы разрушения определяют с помощью специальных таблиц по значению α_2 (h).

Введение ударных испытаний образцов с трещинами является следствием того, что работоспособность материала определяется не столько сопротивлением зарождению трещины, сколько сопротивлением ее распространению. Обычные образцы имеют сечение 10×10 мм, но для особо ответственных случаев и для оценки работоспособности крупных деталей применяют образцы сечением 25×25 мм с иницированной трещиной. Чем острее надрез, тем более жестким испытаниям подвергается металл. Вид надреза входит в обозначение работы удара и ударной вязкости.

Работу удара обозначают двумя буквами KU, KV, KT, а ударную вязкость — тремя буквами KCU, KCV, KCT. В этих обозначениях последние буквы являются символами концентраторов напряжений.

Испытания ударной вязкости широко применяют для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах. Преимуществами этого метода являются простота эксперимента, учет влияния скорости нагружения и концентраций. Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах. Кривые зависимости ударной вязкости от температуры называют *серийными кривыми хладноломкости* (рис. 2.3).

С помощью этих кривых определяют температурный порог хладноломкости. При температуре эксплуатации ниже порога хладноломкости металл применять не следует.

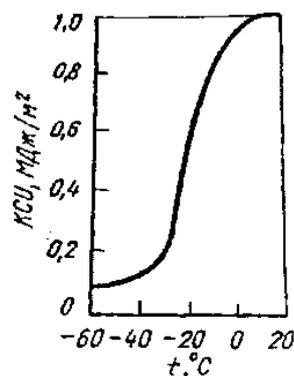


Рис. 2.3. Изменение ударной вязкости стали СТ 3 по понижению температуры

Техническими условиями на поставку металлопродукции ответственного назначения обычно оговаривают минимально допустимое значение ударной вязкости при заданной температуре.

Оценку хладноломкости можно также проводить по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой составляющей в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки.

Обычно за критическую температуру принимают такую, при которой доля волокнистой составляющей структуры равна 50 %.

В ряде случаев целесообразно определять не только общую работу разрушения при ударном изгибе KC , но и ее составляющие — работу зарождения KC_z и работу развития трещины KC_p , при этом $KC = KC_z + KC_p$. Работа зарождения трещины зависит от радиуса надреза. Чем острее надрез, тем меньшая работа нужна для зарождения трещины. Работа развития трещины мало зависит от геометрии надреза и лучше характеризует склонность металла к хрупкому разрушению. Для ее определения обычно используют образцы с заранее инициированной трещиной.

Однако следует иметь в виду, что при испытании пластичных материалов работа разрушения образца с трещиной превышает истинную работу развития трещины на величину работы пластической деформации, расходуемой на изгибную и поперечную макродеформации.

Для обозначения ударной вязкости при пониженной или повышенной температурах используется цифровой индекс, соответствующий температуре испытания. Например, KCT^{60} — ударная вязкость,

определенная на образце с Т-образным концентратором при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ГОСТ 9454-78 рекомендуется при обозначении ударной вязкости указывать также максимальную энергию удара маятника, Дж, глубину концентратора, мм, в испытанном образце и его ширину, мм. Например, $KCU^{+100} 150/3/7,5$ – ударная вязкость, определенная на образце с U-образным концентратором при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ на копре с максимальной энергией удара маятника 150 Дж при глубине концентратора 3 мм и ширине образца 7,5 мм. Если используется копер с максимальной энергией удара маятника 300 Дж и образец шириной 10 мм с глубиной концентратора 2 мм, то эти данные в обозначение ударной вязкости не вводятся (пишется просто KCU^{+100}).

Итак, при динамических испытаниях характеристики прочности, особенно сопротивление малым деформациям, повышаются по сравнению со статическими. Пластичность неоднозначно зависит от скорости деформации. В большинстве случаев при ударных испытаниях образцов с надрезом характеристики пластичности оказываются ниже, чем при аналогичных статических испытаниях. В определенных условиях при высокоскоростной деформации некоторые металлы могут проявлять повышенную пластичность. Так, например, получается при штамповке взрывом (динамическое сжатие) металлов с гексагональной решеткой.

Характер изменения пластичности и вязкости (работы деформации) с увеличением скорости деформации зависит от типа разрушения – среза или отрыва. Если при заданной схеме нагружения и температуре материал разрушается путем отрыва, то сопротивление разрушению мало меняется при переходе от статической к динамической деформации. В этом случае пластичность с увеличением скорости уменьшается. Если же разрушение происходит путем среза, то сопротивление

разрушению существенно возрастает с ускорением деформации, а пластичность может не меняться или тоже повышаться.

2.2. Трибологические испытания

При трибологических испытаниях (испытаниях на износ, износостойкость) основными понятиями являются изнашивание, износ и износостойкость.

Изнашиванием называется процесс постепенного изменения размеров, формы или состояния поверхности образца или детали вследствие разрушения поверхностного слоя в процессе трения.

Износ — результат изнашивания, определяемый с помощью количественной оценки процесса изнашивания.

Износостойкость (wear resistance) — способность материалов или деталей сопротивляться изнашиванию в условиях внешнего трения.

Износ конкретных деталей и узлов определяется природой контактирующих материалов и условиями трения.

Большое число факторов, влияющих на процесс изнашивания деталей машин, обуславливают использование следующих этапов испытаний:

- 1) обычные лабораторные испытания физических и механических свойств материалов;
- 2) испытание материалов на трение и износ на лабораторных установках;
- 3) стендовые испытания узлов трения;
- 4) натурные (эксплуатационные) испытания деталей машин и механизмов.

Наиболее надежной проверкой правильности выбора материала или способов его обработки применительно к конкретной детали являются испытания этой детали в изделии в реальных условиях эксплуатации этого изделия (натурные испытания). Эти испытания, как правило, являются обязательными при оценке работоспособности деталей или узлов, изготовленных из новых материалов или по новой технологии, но так как они дорогостоящие и связаны с практическими трудностями (длительность испытаний, необходимость разборки узлов изделия для определения износа детали, трудность точного определения величины износа), а также с невозможностью проведения многовариантных испытаний, то этому виду испытания всегда предшествуют какие-то из первых трех видов, а иногда и все три.

При изучении на первом этапе физических и механических свойств материалов и прогнозировании на их базе износостойкости этих материалов обычно основываются на том, что между износостойкостью и твердостью, износостойкостью и модулем упругости или коэффициентом жесткости существует близкая к линейной зависимость.

На втором этапе испытаний обычно производится оценка влияния уровня заданных физико-механических свойств материалов в сочетании с выбранными режимами трения на износостойкость этих материалов.

Для правильного выбора методики и условий испытаний на лабораторной установке следует подробно ознакомиться с условиями работы исследуемой детали или узла трения, т. е. выявить характер смазки трущихся поверхностей, скорость скольжения, давление в зоне контакта, температуру в поверхностном слое трущихся деталей и другие характеристики, а также определить основной механизм изнашивания пары.

При проведении испытаний на лабораторных установках требуется воспроизведение всей совокупности основных условий на поверхности трения, которые имеют место при реальной эксплуатации деталей и узлов с обязательным сохранением основного механизма изнашивания пары.

Выявить основной механизм изнашивания возможно только при детальном изучении повреждений поверхности слоев деталей, а также при выявлении структурных изменений, происходящих в активных слоях деталей в процессе трения.

В тех случаях, когда прямое воспроизведение эксплуатационных условий трения на лабораторных установках затруднено, используются следующие принципы правильности выбора условий испытаний.

1. Принцип В. А. Кислика — обеспечение одинаковой формы разрушения материала при испытании на лабораторной установке и при эксплуатации детали;

2. Принцип Б. И. Костецкого — обеспечение одинакового характера повреждений поверхности, структурных изменений и изменений микротвердости поверхностного слоя материала, испытанного на лабораторных установках и в условиях реальной эксплуатации.

Лабораторные машины для испытания на изнашивание подразделяются на следующие группы:

- машины, воспроизводящие определенный заданный вид изнашивания;
- машины, воспроизводящие определенное заданное сочетание условий трения;
- машины универсального типа;
- машины для испытания в частных условиях трения (отличных от первых двух групп).

Всего существует восемь типов лабораторных установок, позволяющих воспроизводить условия трения и изнашивания, возникающие при эксплуатации машин и механизмов.

Так как наиболее распространенным является абразивный вид изнашивания, то среди лабораторных установок, предназначенных для испытания материалов на изнашивание можно выделить машину Х4-Б, на которой производятся испытания на абразивное изнашивание при трении об абразивное полотно или бумагу (изнашивание закрепленным абразивом).

На результат испытания большое влияние оказывает отношение твердости абразива к твердости испытуемого материала H_a / H_m . При $H_a < H_m$, износ образца очень мал или вообще отсутствует, при $H_a / H_m \geq 1,4 \dots 1,6$ износ сохраняет постоянные значения, т. е. уже не зависит от твердости абразива. В этом случае основным механизмом изнашивания материала закрепленным абразивом является микрорезание.

Из машин универсального типа можно выделить машину для испытания на изнашивание типа МИ, аналогичную по конструкции широко применяемой машине Амслера. На этой машине можно вести испытания при трении скольжения, при трении качения, при трении качения с проскальзыванием, как при смазке, так и без нее. Виды образцов для испытания на изнашивание на машине МИ показаны на рис. 2.4.

При проведении стендовых испытаний производится оценка фактического износа самих деталей или узлов в условиях, близких к тем, в которых они эксплуатируются. Для этих целей конструируются специальные стенды, позволяющие имитировать реальные условия нагружения и износа деталей и узлов.

При испытании деталей машин и узлов на изнашивание в условиях эксплуатации (натурные испытания) определяют ресурс работы деталей и узлов и делают окончательные выводы о правильности выбора материалов для изучаемой пары трения.

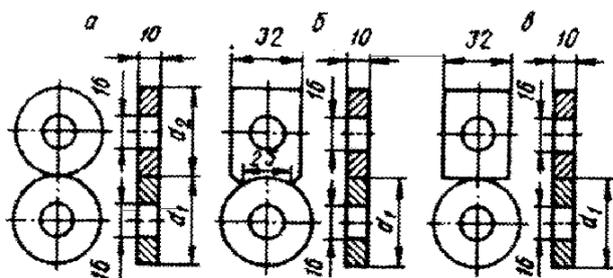


Рис. 2.4. Форма и размеры образцов для испытания на изнашивание на машине типа Амслера: а – при чистом качении (верхний образец свободен на оси) и при качении с проскальзыванием (верхний образец вращается с осью); б – при скольжении, схема испытания «врезанием»; в – при скольжении

Изменение выходных параметров детали и узла дает лишь косвенное представление о величине износа. Наиболее полную информацию о величине износа и его распределении по поверхности трения дают дифференциальные методы измерения износа: микрометрирование, метод искусственных баз, метод поверхностной активации.

Метод микрометрирования основан на измерении деталей до и после испытаний с помощью инструментальных микроскопов, микрометров, индикаторов и других приборов. Для определения малых величин износа и характера распределения его по рабочей поверхности деталей применяют метод профилографирования поверхности с помощью профилографов различных типов. Вертикальное увеличение профилографов составляет 400-200 000, что позволяет с большой точностью определять износ. О величине износа судят на основании сопоставления профилограмм, снятых с рабочей поверхности деталей до и после испытаний.

Метод искусственных баз состоит в том, что на рабочую поверхность деталей наносят углубления строго определенной геометрической формы (конус, пирамида, сфера и др.). При изнашивании поверхности и слоя детали происходит уменьшение глубины и других размеров углубления, по которым судят о величине линейного износа данного участка поверхности.

Метод искусственных баз предназначен для оценки местного или локального линейного износа деталей. Система углублений позволяет оценивать характер разрушения износа на рабочей поверхности деталей. Использование отпечатков, наносимых с помощью прибора ПМТ-3 (для определения микротвердости), позволяет оценивать величину изнашивания отдельных структурных составляющих материала (например, карбидной фазы).

2.3. Определение параметров трения

При проектировании механических цепей изделий на эскизном этапе выбирают кинематическую схему и производят необходимые расчеты. В этих расчетах учитываются действующие силы и моменты. Среди этих сил присутствуют силы трения.

Поясним значимость параметров трения при расчетах механизмов на наглядном примере. Предположим проектируется часовой механизм типа наручных или карманных часов. Шкалу времени в этих механизмах задает колебательная система баланс-спираль, т.е. сопряженные инерционное тело (баланс) и спиральная пружина (спираль).

Период колебаний T системы

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{c}}, \quad (2.1)$$

где f – собственная частота колебаний;

J – момент инерции баланса;

c – жесткость спирали.

Последующая кинематическая цепь фактически суммирует значения периода (2.1). Точность воспроизведения шкалы времени будет определяться стабильностью частоты колебаний, которую для практических целей оценивают по величине добротности Q

$$\delta f = \frac{10^{-3}}{Q}. \quad (2.2)$$

Добротность колебательного звена, в свою очередь, определяется отношением колебательной энергии $W_{\text{кол}}$ и энергии потерь $W_{\text{пот}}$ за период колебаний

$$Q = \frac{W_{\text{кол}}}{W_{\text{пот}}}. \quad (2.3)$$

Таким образом, на этапе эскизного проектирования работа сил трения является более значимой, чем износ. В рассмотренном примере интегральный коэффициент трения h определяет основной параметр механизма – точность воспроизведения шкалы времени. Отметим, что проблема износа существенно снижена в слабонагруженных механизмах изделий приборостроения, в том числе в механических часах, за счет применения кинематических пар трения в составе закаленной цапфы вала со втулкой из искусственного рубина.

При наличии смазки в опорах вала баланса трение можно принять вязким, зависящим от первой степени скорости. В этом случае используют интегральный коэффициент трения h , который может быть найден экспериментально, например по функции выбега. При таком подходе

$$W_{\text{пот}} = \frac{\pi h c \phi^2}{\sqrt{Jc}}, \quad (2.4)$$

где ϕ – амплитуда колебаний.

Колебательная энергия равна

$$W_{\text{кол}} = \frac{1}{2} c \phi^2 . \quad (2.5)$$

Обратимся к методам определения параметров трения.

2.3.1. Трение в поступательной кинематической паре

В качестве математической модели при постоянном (Кулоновом) трении принимают зависимость

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N , \quad (2.6)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения;

N – сила нормального давления;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент постоянного трения.

Силу трения определяет ряд факторов. Отметим основные:

- межмолекулярное взаимодействие элементов трущихся материалов;
- шероховатость поверхностей;
- относительная скорость перемещения;
- площадь контакта;
- наличие смазки.

Поэтому под коэффициентом трения следует понимать функцию этих параметров.

Конструкция установки [9] для выявления параметрических функций трения приведена на рис. 2.5. Основные элементы установки монтируются на основании в виде стола 1 с горизонтальной столешницей. Винтами 2 с потайной головкой на каретке 3 закреплен подвижный элемент 4 исследуемой кинематической пары трения. Неподвижный элемент пары трения представлен пластиной 5, которая закреплена винтами 6 на основании.

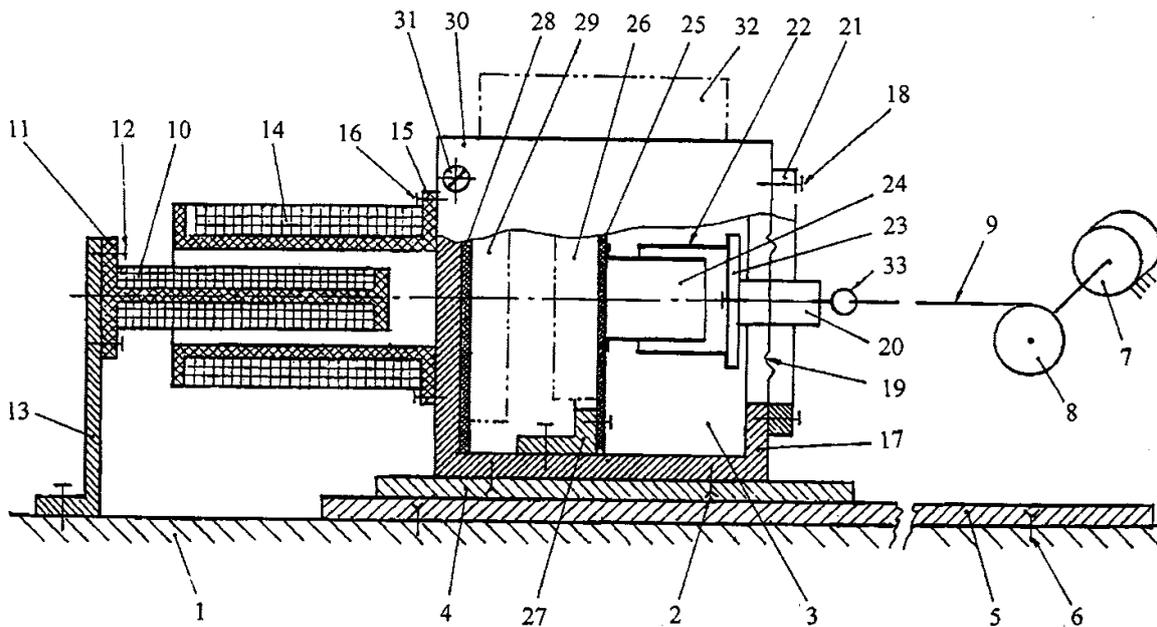


Рис. 2.5. Конструктивная схема установки

Привод каретки представлен электродвигателем постоянного тока с параллельным возбуждением 7, на валу которого закреплен шкив 8. Связь шкива с кареткой осуществляется гибким тросом 9, при этом участок троса от каретки до цилиндрической части шкива располагается горизонтально.

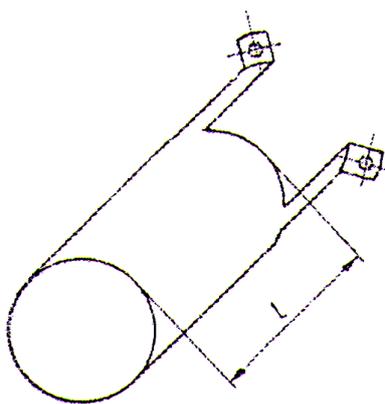


Рис. 2.6. Форма обкладки цил.конт.

Средства связи образованы линейным трансформатором, имеющем две неподвижные обмотки 10 –а, 10-б, намотанные на каркас 11, который винтами 12 закреплен на кронштейне 13, а последний винтами соединен с основанием установки. Имеются подвижные обмотки трансформатора 14-а, 14-б, которые намотаны на каркас 15, присоединенный винтами 16 к корпусу 17 каретки.

Осевая длина обмоток 10, 14 выбрана таким образом, что магнитный поток трансформатора остается на достаточном уровне при перемещении каретки в процессе эксперимента.

Средства измерения первичных параметров размещены на каретке и образованы последовательно соединенными преобразователями: преобразователем силы в перемещение, преобразователем перемещения в электрическую емкость и преобразователем электрической емкости в частотный сигнал. Преобразователь силы в перемещение конструктивно оформлен в виде мембранного блока, закрепленного на корпусе 17 каретки винтами 18. Мембрана 19 (может быть плоской или гофрированной) имеет жесткий центр 20 и кольцо 21. Крепление мембраны с этими элементами типовое – завальцовкой. В этом преобразователе под действием приложенной к жесткому центру мембраны силы, жесткий центр будет смещаться пропорционально силе.

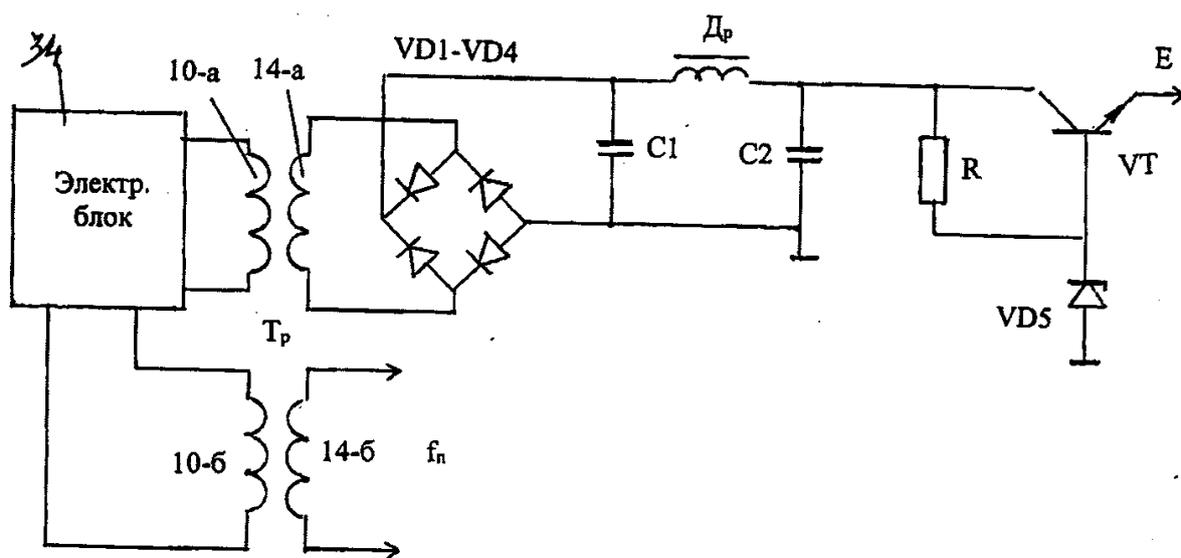


Рис. 2.7. Схема подключения трансформатора связи

Преобразователь перемещения в электрическую емкость представлен цилиндрическим конденсатором. Имеется подвижная обкладка 22, которая через электроизоляционный диск 23 закреплена на жестком центре 20 мембраны. Неподвижная обкладка 24 установлена соосно подвижной и закреплена на плате 25 каретки. Таким образом,

если к жесткому центру мембраны со стороны привода каретки будет приложена сила, то это приведет к смещению подвижной обкладки и электрическая емкость цилиндрического конденсатора будет уменьшаться. Преобразователь электрической емкости в частотный сигнал выполнен по схеме индуктивной трехточки и схемотехнически является автогенератором.

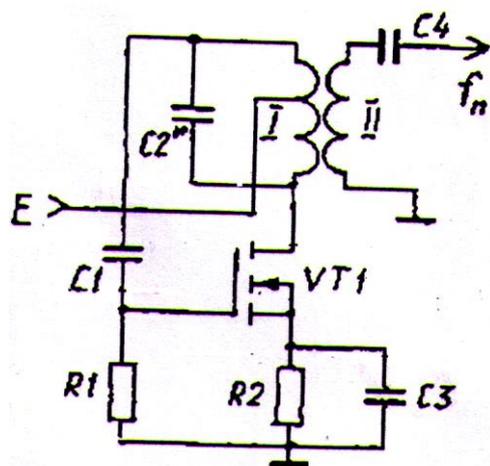


Рис. 2.8. Элементарная принципиальная схема автогенератора

Усилительным элементом является полевой транзистор VT1 с каналом n-типа. Первичная обмотка трансформатора нагрузки соединена параллельно цилиндрическому конденсатору C2*. Один конец первичной обмотки соединен со стоком транзистора, а второй через конденсатор обратной связи C1 с затвором транзистора, при этом затвор через резистор R1 связан с общей шиной. Средний вывод первичной обмотки соединен с шиной питания E. Исток транзистора через термостабилизирующую цепь в составе параллельно соединенных резистора R2 и конденсатора C3 подключен к общей шине. Выходной сигнал в форме синусоидального напряжения частоты f_n транслируется вторичной обмоткой трансформатора через разделительный конденсатор C4. Рассматриваемый преобразователь конструктивно выполнен отдельной сборочной единицей – на плате 25 смонтирована электронная схема 26, плата установлена на кронштейне 27, который закреплен на корпусе каретки. Для питания автогенератора на каретке смонтирован источник вторичного электропитания 27 (рис. 2.7).

Напряжение промышленной частоты (50 Гц) поступает от блока питания электронного блока установки через трансформатор Tr

средств связи – обмотки. 10-а - 10-б на выпрямитель на диодах VD1 - VD4, далее расположен фильтр в составе дросселя Др и двух конденсаторов C1 - C2, затем следует стабилизатор на биполярном транзисторе VT со стабилитроном VD5 в цепи базы, ток которого задан резистором R. В целом каретка выполнена отдельной сборочной единицей, ее внутренний объём закрыт кожухом 30 П-образной формы, который закреплен на корпусе 17 каретки винтами 31. Верхняя горизонтальная поверхность кожуха предназначена для установки груза 32, задающего силу нормального давления исследуемой пары трения. Для соединения каретки с приводом предусмотрен винт 33, в форме рым-болта, вкручиваемый в жесткий центр 20 мембраны.

В исходном положении электродвигатель 7 привода отключен, каретка неподвижна, соответственно мембрана 19 недеформирована, осевая длина перекрытия обкладок цилиндрического конденсатора максимальна. Электрическая емкость конденсатора равна

$$C^* = \frac{2\pi\varepsilon_a l}{\ln \frac{r_{24}}{r_{25}}}, \quad (2.7)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость промежутка;

r_{24}, r_{25} - соответственно внутренний радиус обкладки 24 и внешний радиус обкладки 25.

Этому значению емкости соответствует частота автогенератора

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C^*}}, \quad (2.8)$$

где L_1 – индуктивность первичной обмотки автогенератора.

Если включить электродвигатель привода, то при скольжении подвижного элемента 4 по неподвижному элементу 5 исследуемой пары трения появится сила трения, которая приведет к прогибу мембраны 19.

На линейном участке характеристики справедливо соотношение для прогиба δ

$$\delta = \frac{F_{\text{тр}} R_{\text{ср}}^2}{16D}, \quad (2.9)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила, приложенная к жесткому центру мембраны, т.е. сила трения;

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{20} + R_{21}}{2} - \text{средний радиус мембраны};$$

R_{20}, R_{21} – соответственно внутренний и внешний радиус мембраны (радиусы завальцовки);

$$D = \frac{E_m h_m^3}{12(1-\mu^2)} - \text{цилиндрическая жесткость мембраны};$$

E_m, μ, h_m – соответственно модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона и толщина мембраны.

Формулы (2.8), (2.9) показывают, что емкость C^* линейно зависит от силы трения $F_{\text{тр}}$

$$C^* = K_1 F_{\text{тр}}, \quad (2.10)$$

где константа установки равна

$$K_1 = \frac{\pi E_a R_{\text{ср}}^2}{8D \ln \frac{r_{24}}{r_{20}}}. \quad (2.11)$$

Подставляя значение емкости (2.10) в формулу (2.8) получим передаточную функцию преобразователя силы

$$f_n = \frac{K_2}{F_{\text{тр}}}, \quad (2.12)$$

где константа K_2 установки через первичные параметры равна

$$K_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8D \ln \frac{r_{24}}{r_{20}}}{4\pi E_a R_{\text{ср}}^2}}. \quad (2.13)$$

Таким образом сила трения однозначно определяется частотой автогенератора. Электрический сигнал этой частоты выводится из подвижной каретки через средства связи – обмотки 10-б, 14-б.

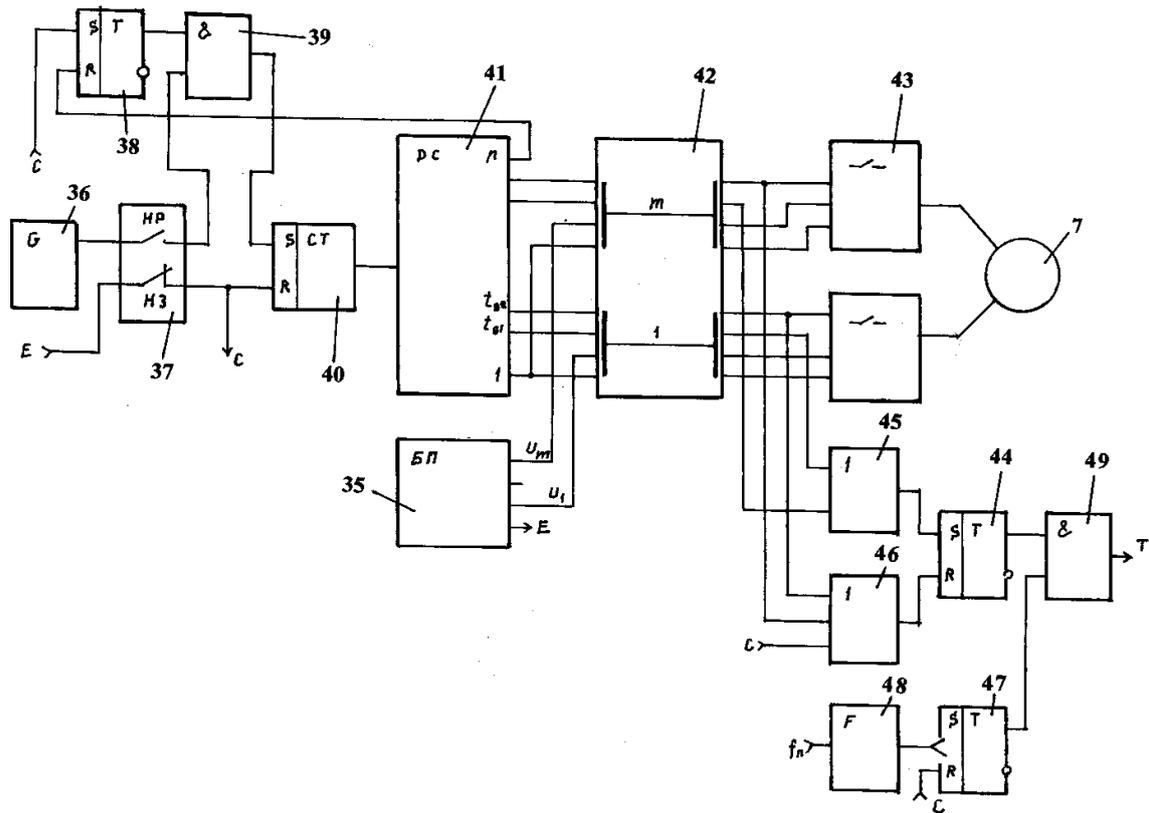


Рис. 2.9. Функциональная схема электронного блока

Установка комплектуется электронным блоком 34, для обработки первичной информации. Функционально его можно разделить на: блок питания, канал времени, канал управления и информационный канал.

Блок питания формирует m постоянных напряжений (по числу режимов испытаний) питания электродвигателя привода и напряжение питания функциональных элементов электронного блока.

Канал времени задает временную шкалу и длительность цикла испытаний. Канал составляют: генератор импульсов 36, тумблер 37, имеющий один нормально разомкнутый контакт НР и один нормально замкнутый контакт НЗ. Исходное положение тумблера «сброс», рабочее положение «измерение». Имеется RS – триггер 38 цикла, конъюнктор 39 счетчика 40 и дешифратор 41, имеющий n выходных шин пози-

ционного кода. В исходном положении шина сброса «с» держит логическую единицу (напряжение питания Е микросхем) через нормально-замкнутый контакт тумблера, при этом счетчик 40 находится в нулевом состоянии, а на выходе дешифратора 41 возбуждена шина нуль (0). При перебросе тумблера 37 в положение «измерение» импульсы генератора 36 начинают заполнять счетчик 40 и на выходе дешифратора 41 последовательно появляются логические единицы. Для заполненного счетчика возбуждается шина n дешифратора, потенциал которой опрокидывает триггер 38 цикла и его выход закрывает конъюнктор 39, поступление импульсов генератора на счетчик прекращается.

Канал управления предназначен для переключения режима испытаний (скорость движения подвижного элемента, нормальная сила давления) и формирования интервала движения, на котором скорость постоянна. Канал содержит пакетный переключатель 42 на m положений (по количеству режимов испытаний). Входные контакты каждой группы переключателя соединены с шинами дешифратора 41, которые получают логическую единицу в момент времени t_{S1} прохождения первого участка движения каретки – S1, в момент t_{S2} прохождения второго участка S2, и с соответствующим выходом напряжения питания электродвигателя привода на блоке питания. Выходные контакты переключателя 42 передают названные сигналы на электронные ключи 43, которые запитывают электродвигатель привода в интервале от момента включения (шина 1 дешифратора) до момента t_{S2} (окончания прохода кареткой всего пути движения S1+S2.) Триггер 44 интервала формирует импульс длительность равной времени прохождения кареткой интервала S2. Комплектация подключения входных контактов переключателя производится исходя из следующих соотношений:

На первом участке S1 движения каретки имеет место равноускоренное движение, а второй участок S2 каретка проходит с постоянной скоростью V_{S2}

$$V_{S2} = \omega_7 R_8, \quad (2.14)$$

где, ω_7 – частота вращения вала электродвигателя 7,

R_8 – радиус шкива 8 электродвигателя.

В качестве электродвигателя привода принят электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, который имеет линейные скоростную и механическую характеристики с малым наклоном, поэтому ω_7 определяется только магнитным потоком двигателя, т.е. напряжением питания

$$\omega_7 = f(U). \quad (2.15)$$

Характеристики двигателя обеспечивают постоянство частоты вращения в функции нагрузки (величины силы трения), т.е. ω_7 не зависит от общей массы каретки, а определяется только напряжением питания.

Скорость каретки на первом участке

$$V_{S1} = \frac{1}{2} V_{S2}, \quad (2.16)$$

С учетом характеристик двигателя можно принять

$$S1 = 0,1 * S2. \quad (2.17)$$

Поскольку длины участков S1, S2 постоянны, то необходимо выдержать постоянство произведений скорости на время

$$\begin{aligned} S1 &= V_{S1} * t_{S1}, \\ S2 &= V_{S2} (t_{S2} - t_{S1}). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для наглядности на рис. 2.9 для одного положения переключателя выходные шины дешифратора поименованы вышепринятыми обозначениями.

Информационный канал предназначен для формирования прямоугольного импульса длительностью, равной периоду T сигнала f_{Π} автогенератора

$$T = \frac{1}{f_{\Pi}}, \quad (2.19)$$

где f_{Π} – выражается формулой (2.12).

Функцию формирования длительности (2.19) выполняет счетный триггер 47, который устанавливается в исходное состояние шиной сброса «С» электронного блока. Управляющий сигнал этого триггера создается формирователем 48, на вход которого поступает сигнал автогенератора f_{Π} . Схемотехнически формирователь построен на основе триггера Шмидта, а выходной сигнал соответствует фронту импульсов триггера Шмидта. Конечным элементом информационного канала является конъюнктор 49. Выходной сигнал конъюнктора 49 представляет собой прямоугольный импульс длительностью T – формула (2.19), - который присутствует в интервале движения каретки $t_{S2} - t_{S1}$, где скорость каретки постоянна.

Сила трения будет найдена по формулам (2.17), (2.19), а коэффициент трения для принятого режима испытаний равен

$$f_{\text{ТР}} = \frac{F_{\text{ТР}}}{N}, \quad (2.20)$$

где сила нормального давления N равна сила веса P каретки совместно с грузом 32.

Установка для определения коэффициента трения работает следующим образом. Предварительно выбирают режим испытаний:

- скорость перемещения подвижного элемента исследуемой пары трения устанавливают пакетным переключателем 42 (m вариантов);
- сила N нормального давления складывается из паспортного значения веса каретки и веса добавочного груза 32.

После переброса тумблера в положение «измерение» импульсы генератора 36 через конъюнктор 39 начинают заполнять счетчик 40, дешифратор 41 переводит двоичный код счетчика в позиционный. В процессе накопления импульсов в счётчике последовательно появляется логическая единица на выходных шинах дешифратора. Потенциал шины 1 через электронный ключ 43 обеспечит включение электродвигателя 7 привода каретки, и каретка начнет движение. В конце первого участка S1 логическая единица шины t_{S1} через дизъюнктор 45 переведет триггер 44 интервала в единичное состояние. При дальнейшем движении каретки будут накапливаться импульсы генератора на счетчике и получит логическую единицу шина t_{S2} дешифратора. Потенциал этой шины через электронный ключ 43 отключит электропитание двигателя 7, одновременно через дизъюнктор 46 триггер 44 вернется в исходное состояние. Процесс работы счетчика 40 прекратится при его заполнении, при этом потенциал шины n дешифратора опрокинет триггер 38 цикла, который закроет конъюнктор 39.

На участке S2 – от момента времени t_{S1} до t_{S2} – скорость движения каретки постоянна, поэтому сила трения $F_{\text{тр}}$ также постоянна. Этой силе соответствует постоянное значение перемещения жесткого центра 20 мембраны 19, следовательно будет постоянным и перемещение подвижной обкладки 22 цилиндрического конденсатора и постоянное значение частоты $f_{\text{п}}$ автогенератора. Период T этого сигнала будет сформирован триггером 47 и поступит на выход конъюнктора 49.

Искомый коэффициент трения определится по формуле (2.20).

Таким образом, установка для определения коэффициента трения позволяет находить коэффициент трения при различных комбинациях площади, силы нормального давления и скорости движения подвиж-

ного элемента исследуемой пары трения. Получаемая информация достоверна за счет исключения влияющих факторов. В конструкции установки применен принцип агрегатности, что повышает ее технологичность, электронный блок выполнен на типовых элементах электроники.

2.3.2. Трение во вращательной кинематической паре

Различают три основных кинематических пар трения (подшипников):

- пары скольжения, представляющие собой сопряжение вал – втулка;
- пары качения, когда между валом и втулкой размещены тела качения (шарики, ролики);
- газовые пары, в которых поверхности вала и втулки разделены слоем газа (чаще воздухом).

Подшипники 1-го и 2-го типов испытывают однотипно. Обратимся к установке для приемных испытаний [10].

Предварительно рассмотрим принцип выявления момента трения в подшипнике. Принцип заключается в том, что выявляют временную диаграмму аналогового сигнала работающего подшипника, преобразуют её в цифровые данные, при этом временную диаграмму получают в виде функций выбега, выбирают на временной диаграмме два одинаковых сопряжённых временных интервала, подсчитывают количество пройденных фазовых частей угла поворота на каждом временном интервале и определяют момент трения в подшипнике по формуле

$$M_{\text{тр}} = J \frac{\varphi_{\text{ш}}}{(\Delta t)^2} (n_1 - n_2), \quad (2.21)$$

где J – момент инерции вращающихся частей;

Δt – временной интервал;

$\varphi_{ш}$ – фазовая часть;

n_1, n_2 – количество фазовых частей, соответственно, в первом и втором временных интервалах.

Для заданных условий эксперимента (частота вращения, основная нагрузка, температура, внешние электрические, магнитные и радиационные поля и т.п.) обеспечивают вращение одного кольца подшипника относительно другого.

Рассмотрим свободное вращение, начиная с некоторого значения частоты вращения $\dot{\varphi}_{max}$. Этот процесс отражается функцией выбега

$$\dot{\varphi} = f(t), \quad (2.22)$$

где $\dot{\varphi}$ – мгновенное значение частоты вращения.

Функция выбега (2.22) нелинейная, на ограниченном участке 1-2

(см. рис. 2.10) эту функцию можно аппроксимировать отрезком прямой. Тогда момент трения $M_{тр}$ в подшипнике определится

$$M_{тр} = \frac{W_{12}}{\varphi_{12}}, \quad (2.23)$$

где W_{12} – расход энергии на трение;

φ_{12} – приращение фазы (угла поворота).

Расход энергии на преодоление трения может быть найден через кинетическую энергию

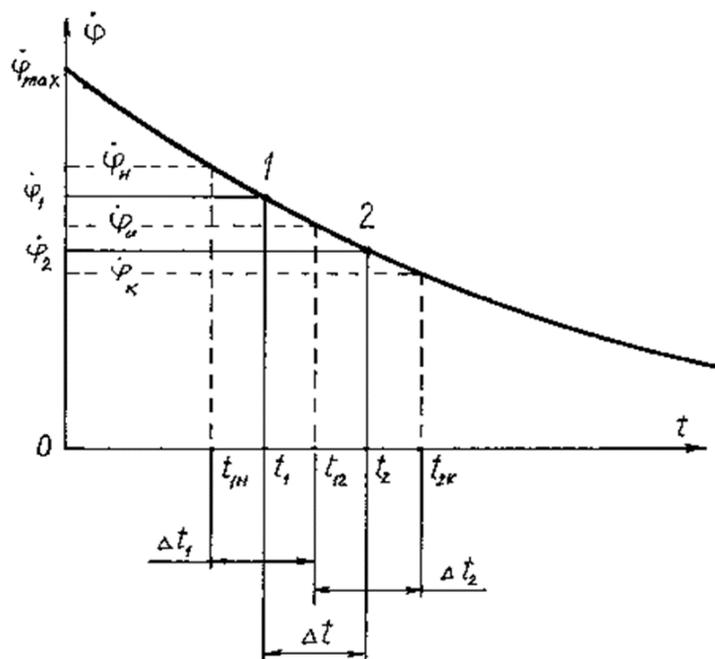


Рис. 2.10. Схема обозначений

$$W_{12} = \frac{1}{2}J(\dot{\varphi}_1^2 - \dot{\varphi}_2^2), \quad (2.24)$$

где J – момент инерции вращающихся частей;

$\dot{\varphi}_1^2, \dot{\varphi}_2^2$ – мгновенное значение частоты вращения, соответственно, в моменты времени t_1 и t_2 .

Для нахождения мгновенных значений частот вращения $\dot{\varphi}_1$ и $\dot{\varphi}_2$ обратимся к дискретному методу. Заметим, что дискретный метод преобразования позволяет получить более высокую точность и надёжность по сравнению с аналоговым методом. Для реализации дискретного метода разделим полный угол поворота (2π) на N равных фазовых частей (шагов) – $\varphi_{\text{ш}}$

$$\varphi_{\text{ш}} = \frac{2\pi}{N}. \quad (2.25)$$

В окрестностях момента времени t_1 выберем симметричный интервал Δt_1 от момента времени $t_{1Н}$ до момента времени t_{12} . Аналогично для момента времени t_2 – интервал Δt_2 от момента t_{12} до $t_{2К}$. Таким образом, границы интервалов Δt_1 и Δt_2 совмещены. Дополнительно примем условие

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t. \quad (2.26)$$

Поскольку угол поворота за время Δt равен количеству пройденных фазовых частей, то получим

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\varphi_{\text{ш}}n_1}{\Delta t}, \quad (2.27)$$

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{\varphi_{\text{ш}}n_2}{\Delta t},$$

где n_1, n_2 – количество фазовых частей, соответственно, за время Δt_1 и Δt_2 .

С учетом формул (2.24), (2.27) получим

$$W_{12} = \frac{1}{2}J\left(\frac{\varphi_{\text{ш}}}{\Delta t}\right)^2(n_1^2 - n_2^2). \quad (2.28)$$

Приращение фазы на временном участке $t_{1-2} = \Delta t$ с учетом линейной аппроксимации и условия (2.26) составит

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{2} \varphi_{\text{ш}}(n_1 + n_2). \quad (2.29)$$

На основании формул (2.28), (2.29) формула (2.23) примет вид

$$M_{\text{тр}} = J \frac{\varphi_{\text{ш}}}{\Delta t^2} (n_1 - n_2). \quad (2.30)$$

Величина $K = J \frac{\varphi_{\text{ш}}}{\Delta t^2}$ является константой испытательной установки, реализующей предлагаемый способ определения момента трения в подшипниках.

Перейдем к конструкции.

В корпусе 1 электромеханической части закреплены кронштейн 2 испытуемого подшипника 3, электродвигатель 4, имеющий на консольной шпоночной части вала фрикционную муфту 5. В качестве электродвигателя целесообразно использовать электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением. В этом случае его частота вращения пропорциональна питающему напряжению, что приводит к линейной шкале органа управления частотой вращения на блоке питания. Электродвигатель может снабжаться тахометром. Муфта имеет привод в составе поворотного рычага 6 с осью вращения 7 и электромагнита 8. Исходное

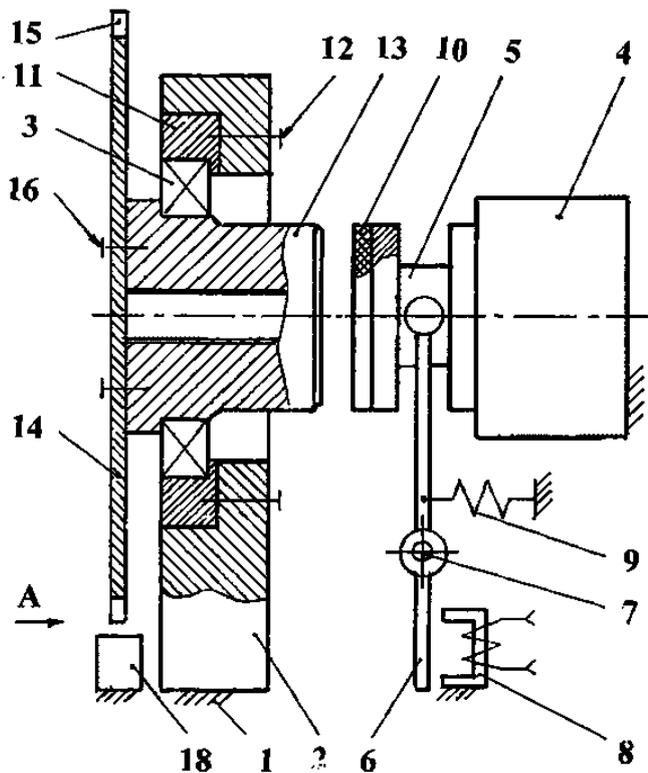


Рис. 2.11. Конструктивная схема электромеханической части

исходное положение рычага 6 с осью вращения 7 и электромагнита 8. Исходное

положение рычага реализуется пружиной 9. Муфта на рабочей торцовой поверхности имеет фрикционную накладку 10 в форме кольца.

Испытываемый подшипник устанавливается по его наружному кольцу в кронштейне 2 посредством втулки 11, которая фиксируется винтами 12 с накатной головкой. Сопряжение наружного кольца подшипника со втулкой осуществляется с некоторым натягом, а сопряжение втулки с кронштейном – с зазором. Внутреннее кольцо испытываемого подшипника соединено с натягом с центральной втулкой 13, имеющей осевое резьбовое отверстие для взаимодействия со съёмником. Правая торцовая поверхность центральной втулки (ориентация чертежа) предназначена для взаимодействия с муфтой, а левая – для крепления датчика фазы.

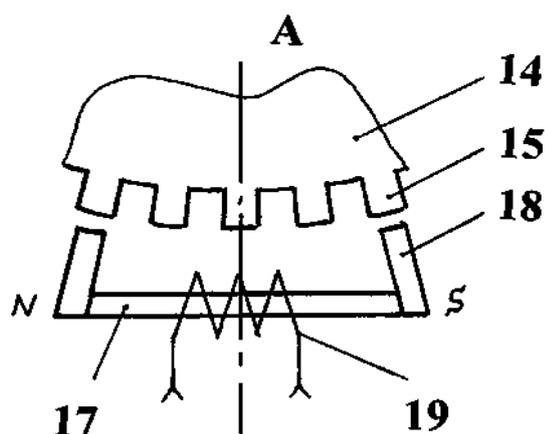


Рис. 2.12. Вид А по рис. 2.11

Датчик фазы представлен диском 14 из магнитопроводного материала с зубцовой зоной 15. Диск датчика фазы крепится на центральной втулке 13 посредством винтов 16 с накатной головкой. Преобразование фазового положения диска 14 в электрический сигнал осуществляется магнитоэлектрическим преобразователем, который составлен из постоянного магнита 17, двух полюсных наконечников 18 и электрической катушки 19.

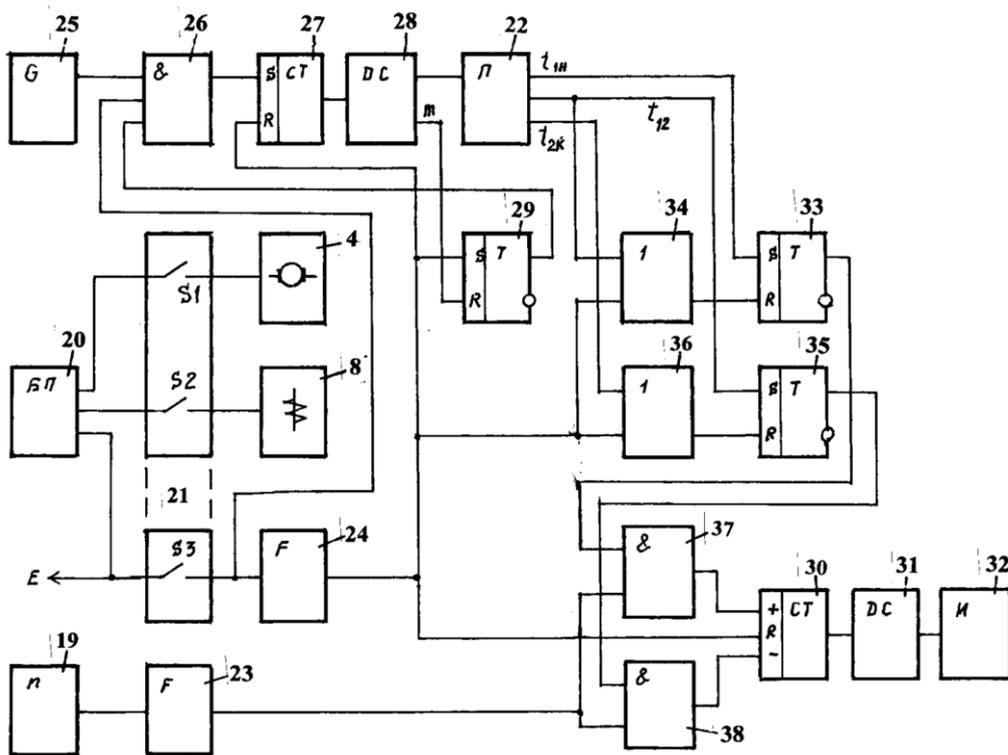


Рис. 2.13. Функциональная схема электронного блока

Представленная конструкция электромеханической части позволяет за счёт комплекта двух втулок (11, 13) простейшей формы перекрыть диапазон типоразмеров подшипников потребителя.

Электронный блок предназначен для управления процессом испытаний и выявления искомого параметра по сигналам датчика фазы. Управляющими элементами являются:

- блок питания 20, обеспечивающий напряжение E питания микросхем, напряжение питания электромагнита 8 и регулируемое напряжение питания электродвигателя 4. Блок питания содержит тумблер включения «Сеть»;

- тумблер управления 21 на два положения: положение «Режим» с контактами S1, S2 и положение «Измерение» с контактом S3;

- пакетный переключатель режима 22, который устанавливает номинальное значение частоты вращения $\dot{\varphi}_u$ ($\dot{\varphi}_u = (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2/2)$).

В составе электронного блока имеются два формирователя:

- формирователь 23 переводит импульсы электрической катушки 19 датчика фазы в прямоугольную форму;

- формирователь 24, создающий короткий импульс по фронту включения напряжения E контактом $S3$ – импульс сброса.

Цепь, задающая шкалу времени, представлена генератором опорной частоты 25, трехходовым конъюнктом 26, счетчиком импульсов 27 и дешифратором 28. Управляющим элементом цепи времени является триггер 29, который устанавливается в единичное состояние импульсом сброса с выхода формирователя 24. В положении тумблера управления «Режим» конъюнктор 26 пропускает импульсы генератора 25 на вход счетчика 27, соответственно, на выходе дешифратора 28 последовательно возбуждаются выходные шины. Переключателем 22 транслируются шины соответствующие моментам времени t_{1H} , t_{12} и t_{2K} . Импульс старшей шины m дешифратора переводит управляющий триггер 29 в нулевое состояние и конъюнктор 26 закрывает поступление импульсов генератора 25 на вход счетчика 27. Применение пакетного переключателя 22 обусловлено нелинейностью функции выбега $\dot{\varphi} = f(t)$, значит зависимостью момента трения от частоты вращения. Шкала пакетного переключателя градуируется в номинальных значениях частоты вращения φ_u , а подключение выходных шин дешифратора осуществляется с соблюдением условия (2.26).

Для нахождения разности количества фазовых частей прошедших за время Δt_1 и Δt_2 используется реверсивный счетчик 30, состояние которого переводится в десятичный код дешифратором 31 и отражается индикатором 32. Интервал времени Δt_1 формируется триггером 33, который устанавливается в единичное состояние импульсом с вы-

хода переключателя 22, соответствующим моменту времени t_{1H} , а возврат в нулевое состояние – импульсом t_{12} через дизъюнктор 34. Аналогично, триггер 35 формирует временной интервал Δt_2 импульсом установки t_{12} и импульсом сброса t_{2K} через дизъюнктор 36. Триггер 33 открывает конъюнктор 37 записи реверсивного счетчика 30, а триггер 35 – конъюнктор 38 вычитания.

Работа установки для приемных испытаний подшипников. Пользователь монтирует испытываемый подшипник 3: запрессовывает подшипник по наружному кольцу во втулку 11 кронштейна; запрессовывает подшипник по внутреннему кольцу на центральную втулку 13; закрепляет полученную сборочную единицу винтами 12 в кронштейне 2. Далее производят измерение.

Задают условия испытаний. Регулятором напряжение питания электродвигателя 4 на блоке питания 20 устанавливают максимальное значение частоты вращения $\dot{\varphi}_{max}$. Пакетным переключателем 22 задают номинальное значение частоты вращения $\dot{\varphi}_u$.

Включают установку тумблером «Сеть» на блоке питания 20. Переводят тумблер управления 21 в положение «Режим». При этом контактом S1 включается электродвигатель, а контактом S2 – электромагнит 8, который рычагом 6 соединяет фрикционную муфту 5 с центральной втулкой 13. После набора частоты вращения $\dot{\varphi}_{max}$ (определяют либо по тахометру, либо по времени – это единицы секунд) переводят тумблер управления 21 в положение «Измерение». Переброс тумблера управления обеспечит отключение электродвигателя и фрикционной муфты, а замыкание контакта S3 приведет к созданию формирователем 24 короткого импульса сброса. Этим импульсом все элементы памяти – триггеры 29, 33, 35 и счетчики 27, 30 – установятся в исходное поло-

жение. Одновременно контактом S3 открывается конъюктор 26, и импульсы генератора опорной частоты 25 начинают поступать на счетчик 27.

В процессе свободного вращения продолжается заполнение счетчика 27 цепи времени. При достижении момента времени t_{1H} появляется импульс на соответствующей шине дешифратора 28, который через переключатель 22 по входу S устанавливает триггер 33 в единичное состояние. Переброс этого триггера приводит к открытию конъюктора 37, и импульсы датчика фазы через формирователь 23 начинают по суммирующему входу (+) заполнять реверсивный счетчик 30. Этот процесс закончится появлением на выходе переключателя импульса дешифратора 28, соответствующего моменту времени t_{12} . Указанный импульс через дизъюнктор 34 возвратит триггер 33 в исходное состояние.

В этот же момент времени t_{12} срабатывает триггер 35, который открывает конъюктор 38, что приводит к поступлению импульсов датчика фазы на вычитающий вход (-) реверсивного счетчика 30. Вычитание заканчивается в момент времени t_{2K} , когда сбрасывается через дизъюнктор 36 триггер 35. Таким образом, на реверсивном счетчике 30 будет записана разность количеств импульсов датчика фазы, прошедших за время Δt_1 и Δt_2 . Эта величина будет отражена на индикаторе 32. Искомый параметр определяется по формуле (2.30). Работа электронного блока завершается появлением импульса на старшей шине m дешифратора 28 цепи времени. Этот импульс возвратит триггер 29 в исходное состояние, что приведет к закрытию конъюктора 26.

Заметим, что часть функций электронного блока и вычисление по формуле (2.30) может быть возложены на компьютер.

2.3.3. Внутреннее (гистерезисное) трение в материале

При приложении внешней силы к детали механизма (образцу материала) возникает фазовый сдвиг, т.е. деформация отстает от механических напряжений. Если внешняя сила меняет знак, например, изменяется по закону синуса, то зависимость механических напряжений от деформации образует замкнутую линию, которую называют петлей гистерезиса. При теоретических исследованиях петлю гистерезиса аппроксимируют функцией эллипса. Площадь петли гистерезиса пропорциональна величине диссипативных потерь. Эти потери учитывают при энергетических расчетах механизмов.

На рис. 2.14 – 2.17 изображена конструкция установки для экспериментального нахождения величины диссипативных потерь энергии в образце материала [11].

Установка состоит из устройства нагружения и электронного блока (на прилагаемых чертежах не показан). Устройство нагружения содержит датчик скорости и измеритель амплитуды. Электронный блок предназначен для электропитания измерителя амплитуды и обработки первичной информации.

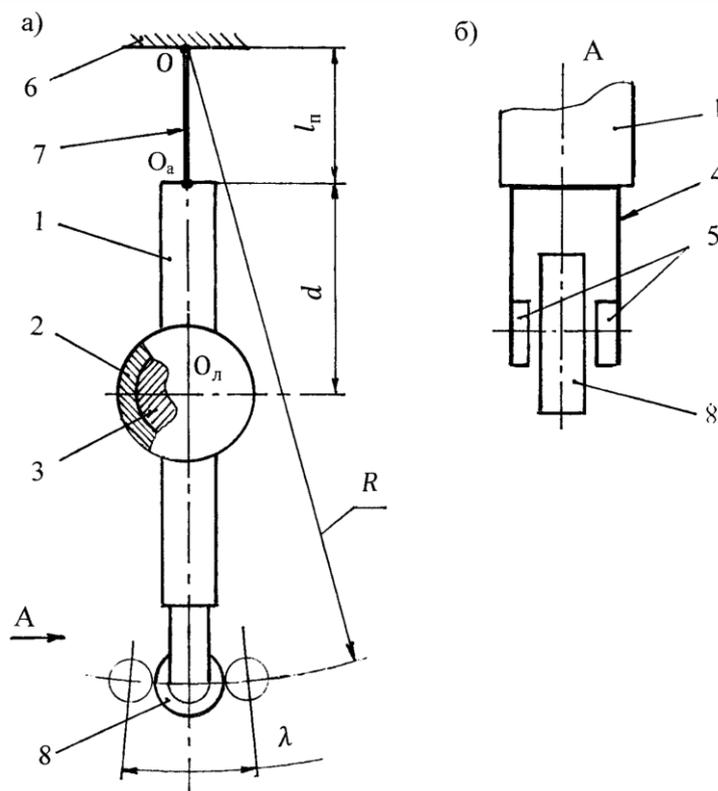


Рис. 2.14. Конструктивная схема установки

Устройство нагружения выполнено в виде массивного маятника, содержащего жесткую часть, составленную из стержня 1 и линзы 2.

Линза представляет собой закрываемый объем, в котором помещаются добавочные грузы 3 массой $m_{доб}$, без нарушения внешней поверхности. На конце стержня 1 закреплена магнитная система датчика скорости, составленная из магнитопровода 4 и двух постоянных магнитов 5 осевой намагниченности с образованием магнитного зазора в плоскости колебаний маятника. Жесткая часть маятника выполнена таким образом, что ее центр масс находится в центре O_L линзы. Дополнительные грузы имеют форму дисков или шайб и их установка в линзу не изменяет положения центра масс жесткой части маятника.

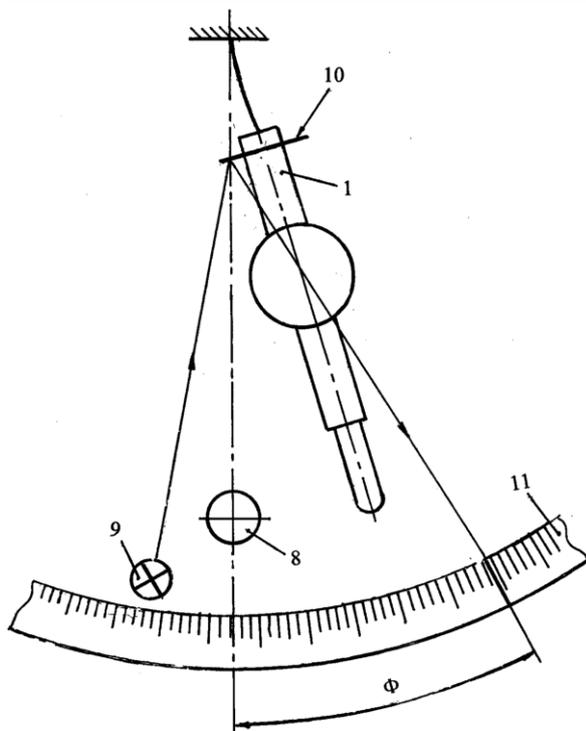


Рис. 2.15. Устройство измерителя амплитуды

с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока. При колебаниях маятника индукционная ЭДС возникает в интервале угла поворота λ от одного касательного положения магнитного зазора до другого. Электронный блок формирует

В точке 0 основания 6 установки помещен пассивный захват. Активный захват установлен в точке O_a в верхней части стержня 1. В захваты устанавливается либо технологический подвес 7, либо образец материала. В зазоре магнитной системы установлена в положении равновесия маятника неподвижная электрическая катушка 8. Катушка совместно с магнитной системой образует датчик скорости, поскольку индукционная ЭДС в соответствии

прямоугольный импульс длительностью t_u , соответствующей времени движения на угле λ .

Имеется измеритель амплитуды колебаний маятника оптического типа. В состав измерителя амплитуды входит неподвижный осветитель 9, который формирует луч света с оптической риской. На стержне маятника закреплено плоское зеркало 10. Отраженный от зеркала луч осветителя попадает на неподвижную шкалу 11. Пользователь будет наблюдать на шкале световое пятно с оптической риской. В амплитудном положении скорость перемещения светового пятна по шкале равна нулю, поэтому сопоставить положение оптической риски с делениями шкалы не представляет труда.

Обратимся к принципу определения внутреннего трения в материале. Будем рассматривать общий случай – образцы материала имеют разные типоразмеры. Воспользуемся методом моделей [22].

Принимаем 1-ю физическую модель маятника в виде консервативной системы с технологическим подвесом, удовлетворяющим условию

$$m_{7-1} \ll m_0 + m_{\text{доб1}} \quad (2.31)$$

где m_{7-1} – масса технологического подвеса;

m_0 – масса жесткой части маятника.

Положим также, что технологический подвес изготовлен с малой изгибной жесткостью D_{7-1} . Тогда восстанавливающий момент от силы тяжести окажется существенно больше от восстанавливающего момента от сил упругости технологического подвеса

$$g(m_0 + m_{\text{доб1}})\varphi \gg D_{7-1}\varphi \quad (2.32)$$

Конструктивно технологический подвес, удовлетворяющий условиям (2.31) и (2.32) может быть изготовлен из материала с высоким значением предела пропорциональности и малым сечением, удовлетворяющим условию прочности, например из сплава Н41ХТА.

Для 1-й физической модели консервативной системы, удовлетворяющей условиям (2.31) и (2.32), воспользовавшись методом Лагранжа при малых отклонениях φ маятника получим математическую модель в форме периода колебаний

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{(m_0 + m_{\text{доб1}})(d + l_{\text{п}})^2}{(m_0 + m_{\text{доб1}})g(d + l_{\text{п}})}} = 2\pi \sqrt{\frac{d + l_{\text{п}}}{g}}, \quad (2.33)$$

где g – ускорение силы тяжести;

$d, l_{\text{п}}$ – обозначены на рис. 2.14.

Примем 2-ю физическую модель маятника в виде консервативной системы, в которой в качестве подвеса применен образец материала, имеющий статическую изгибную жесткость D_{7-2} . По аналогии для 2-й модели период колебаний будет равен

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{(m_0 + m_{\text{доб2}})(d + l_{\text{п}})^2}{(m_0 + m_{\text{доб2}})g(d + l_{\text{п}}) + 2D_{7-2}}}. \quad (2.34)$$

Для определенности заметим, что жесткость D_{7-2} это параметр закона Гука – см. функцию γ - γ на рис. 2.16. $D_{7-2} = \text{tg } \alpha$ в размерностях координат и определяется при статическом нагружении.

Однако реальные системы являются нелинейными и диссипативными. В 1-й модели следует учесть потери энергии при колебаниях на вязкое трение (трение о воздух) с моментом

$$M_{\text{в}} = h\dot{\varphi}, \quad (2.35)$$

где h – коэффициент вязкого трения;

$\dot{\varphi}$ – угловая скорость.

Потерями энергии на образование сигнала датчика скорости можно пренебречь, т.к. потребляемый формирователем t_u электронного блока ток катушки 8 пренебрежимо мал.

По вышеприведенному условию грузы $m_{доб}$ не изменяют форму маятника, поэтому для 2-й модели момент вязкого трения будет определяться по этой же формуле.

Но в диссипативной модели 2-й системы добавляется к моменту M_B момент M_H на внутреннее трение в образце материала

$$M_H = f(\varphi) \quad (2.36)$$

Вид функции (2.36) приведен на рис. 2.16.

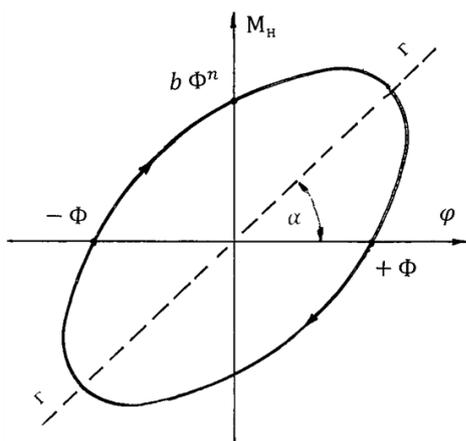


Рис. 2.16. Форма петли механического гистерезиса

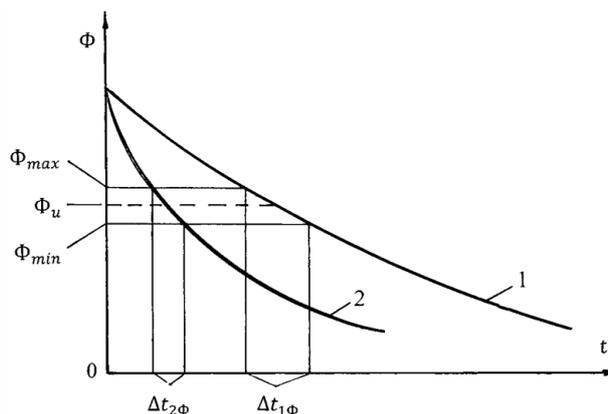


Рис. 2.17. Огибающие амплитуд свободных колебаний: 1 – соответствует технологическому подвесу; 2 – соответствует образцу материала

Интегральным показателем внутреннего трения в материале является площадь петли механического гистерезиса

$$W_H = \int_{-\phi}^{+\phi} M_H d\varphi \quad (2.37)$$

Принцип выявления параметра (2.37) удобно пояснить по рис. 2.17, где показаны огибающие амплитуд с технологическим подвесом – график 1 и с подвесом в виде образца материала – график 2 при условии

$$T_1 = T_2. \quad (2.38)$$

Графики наглядно показывают, что время движения $\Delta t_{2\phi}$ маятника при наличии суммарного (вязкого и внутреннего) трения на участке амплитуд $\phi_{max} - \phi_{min}$ меньше, чем время движения $\Delta t_{1\phi}$ на том же участке при наличии только вязкого трения. Амплитудные графики рис. 2.17 отражают потери энергии при колебаниях маятника в потенциальной форме.

Переходя к кинетическим энергиям получим для фиксированной амплитуды измерения ϕ_u за один период колебания

$$W_H = W_{K2} - W_{K1} = \frac{1}{2} I_2 \dot{\phi}_2^2 - \frac{1}{2} I_1 \dot{\phi}_1^2, \quad (2.39)$$

где I_1, I_2 – соответственно моменты инерции маятника с технологическим подвесом и с подвесом из образца материала.

Значения угловых скоростей $\dot{\phi}$ определяются временем движения t_u на угле λ

$$\dot{\phi} = \frac{\lambda}{R t_u}. \quad (2.40)$$

С учетом формул (2.39), (2.40) получим

$$W_H = \frac{\lambda^2}{2R^2} \left(\frac{I_2}{t_{u2}^2} - \frac{I_1}{t_{u1}^2} \right). \quad (2.41)$$

Формула (2.41) позволяет проектировать установки для разных типоразмеров образцов. В частном случае рабочая длина l_{Π} одного типоразмера образцов постоянна. Тогда геометрические параметры установки: l_{Π}, d, λ, R и момент инерции маятника I_1

$$I_1 = m_0(d + l_{\text{п}})^2$$

являются константами установки и могут быть записаны во флеш-память электронного блока.

Заметим, что коэффициент вязкого трения h зависит от формы маятника (постоянная величина) и плотности воздуха, которая является функцией барометрического давления и влажности.

Пользуются установкой для определения внутреннего трения в материале следующим образом.

1. Устанавливают в захваты технологический подвес. Этому подвесу соответствует период колебания маятника T_1 . На измерительной амплитуде ϕ_u (20-30°) фиксируют в электронном блоке значение t_{u1} .

2. Устанавливают в захваты образец материала. Подбором добавочного груза $m_{\text{доб}}$ добиваются значения периода колебаний $T_1 = T_2$. По причине незахронности колебаний это равенство предпочтительно реализовывать при небольших амплитудах (несколько градусов).

3. Заносят значения $m_{\text{доб}}$ во флеш-память электронного блока.

4. Фиксируют в электронном блоке первичный параметр t_u на амплитуде измерения ϕ_u .

5. Переводят электронный блок в режим вычисления по формуле (2.41), где

$$I_2 = I_1 + m_{\text{доб}}(d + l_{\text{п}})^2.$$

Результат измерения потерь энергии на внутреннее трение за один цикл (период) нагружения образца материала получают на индикаторе электронного блока.

Таким образом, установка для определения внутреннего трения в материале позволяет непосредственно выявить искомый параметр в единицах измеряемой величины, что обеспечивает необходимую точность определения внутреннего трения в материале. Установка конструктивно проста и не требует высокой квалификации оператора при проведении испытаний.

Глава 3

ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ

Подавляющее большинство деталей машин в процессе службы претерпевают воздействие циклически изменяющихся нагрузок. Около 90% повреждений деталей связано с возникновением и развитием усталостных трещин. Трещины усталости создают предпосылки для хрупкого разрушения и в этом одна из главных причин их опасности. Ни при каких других видах разрушения характеристики прочности не зависят от такого большого цикла факторов, как при усталостном разрушении. Основными из них являются: особенности материала и технологии изготовления; конструкция деталей; режим нагружения; среда, контактирующая с деталью.

Процесс создания новой техники предполагает применение прогрессивных конструкторских решений и технологических процессов, при этом необходима глубокая и комплексная оценка свойств материалов, в том числе прочности их при циклической нагрузке.

Предельная прочность при циклических нагрузках достигается значительно раньше, чем при статических. Усталостное разрушение может возникнуть при напряжениях ниже предела текучести. Особенность цикловой усталости – макродеформация объема металла, как правило, отсутствует. Деталь в целом деформируется упруго, но происходит местная повторная упруго-пластическая деформация отдельных наиболее неблагоприятно ориентированных по отношению к силовому полю кристаллов, сопровождающаяся циклическим наклепом. После достижения критической степени искажения решетки происходит разрыв межатомных связей.

Зарождение трещин связано с возникновением больших растягивающих напряжений в результате скопления дислокаций, образующихся у препятствий или расположенных вдоль полос скольжения, коагуляции вакансий, возникновения экструзий и энтузий (выдавливания тонких лепестков металла толщиной менее 1 мкм) в полосах скольжения. Известны основные схемы роста усталостных трещин: первая заключается в повторном раскрытии и закрытии трещины, вторая – в слиянии микротрещин или пор с магистральной трещиной.

Характеристики переменного нагружения:

Цикл напряжений — совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения.

Период цикла T , с — время одного цикла напряжений.

Максимальное напряжение цикла σ_{max} , МН/м² (кгс/мм²), – наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла, равно алгебраической сумме среднего напряжения цикла и амплитуды.

Минимальное напряжение цикла σ_{min} , МН/м² (кгс/мм²), – наименьшее по алгебраической величине напряжение цикла, равно алгебраической разности среднего напряжения цикла и амплитуды.

Среднее напряжение цикла σ_m , МН/м² (кгс/мм²), – статическая (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений; равна алгебраической полусумме максимального и минимального напряжения цикла.

Амплитуда напряжения цикла σ_a , МН/м² (кгс/мм²), – наибольшее (положительное) значение переменной составляющей цикла напряжений, равна алгебраической полуразности максимального и минимального напряжений цикла.

Размах напряжений цикла $2\sigma_a$, МН/м^2 (кгс/мм^2), – алгебраическая разность максимального и минимального напряжений цикла, равен удвоенной амплитуде.

Коэффициент асимметрии цикла R_σ – характеристика степени асимметрии цикла, равен отношению минимального напряжения к максимальному (со знаком).

Симметричный цикл напряжений – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по величине, но противоположны по знаку.

Асимметричный цикл – цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разную абсолютную величину.

Знакопеременный цикл – цикл напряжений, изменяющихся по величине и знаку.

Знакопостоянный цикл – цикл напряжений, изменяющихся только по величине.

Нулевой (пульсирующий) цикл – знакопостоянный цикл напряжений, изменяющихся от нуля до максимума или от нуля до минимума.

База испытаний (базовое число циклов) N_B – предварительно заданное число циклов напряжений, до которого образцы испытывают на усталость.

Подобные циклы $\frac{\sigma'_{max}}{\sigma''_{max}} = \frac{\sigma'_m}{\sigma''_m} = \frac{\sigma'_a}{\sigma''_a}$ – циклы, у которых отношение максимальных напряжений равно отношению соответствующих средних и амплитуд напряжений цикла.

Частота нагружения f , Гц ; мин^{-1} – число смен циклов напряжений в единицу времени.

Номинальные напряжения σ_n , MH/m^2 ($кгс/мм^2$), – напряжения, вычисленные по формулам сопротивления материалов без учета концентрации напряжений, остаточных напряжений и перераспределения напряжений в процессе деформирования (при изгибе $\sigma = M_n/W_{oc}$, при кручении $\tau = M_k/W_p$, при растяжении-сжатии $\sigma = P/F$).

Коэффициент динамики $\delta_\sigma = \sigma_a/\sigma_m$ – характеристика превышения амплитудных значений напряжений над средними (статической составляющей цикл).

Коэффициент интенсивности напряжения K , $MП/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$) – характеристика напряженного состояния в вершине трещины.

Максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений K_{max} , $Mн/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – наибольшее значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом изменении нагрузок.

Минимальное значение коэффициента интенсивности напряжений K_{min} , $MН/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – наименьшее значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом изменении нагрузок.

Размах интенсивности напряжений цикла $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – разность между максимальным и минимальным значениями коэффициентов интенсивности напряжений.

Эффективное значение размаха интенсивности напряжений $\Delta K_{эфф}$, $MП/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – размах интенсивности напряжений, подсчитанный по результатам анализа излома.

Вязкость разрушения: K_c , $MН/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – вязкость разрушения при плосконапряженном состоянии.

K_{Ic} , $MН/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – вязкость разрушения при плоскодеформированном состоянии.

K_{Isc} , $MН/м^{3/2}$ ($кгс/мм^{3/2}$), – вязкость разрушения при коррозионном растрескивании.

Жесткость напряженного состояния – отношение величин касательных и нормальных растягивающих напряжений (чем больше, тем «напряженное состояние мягче»).

Градиент напряжения G , $1/\text{мм}^2$, – характеристика степени неоднородности напряженного состояния (по сечению, по длине).

Схемы нагружения выбирают из того, чтобы воспроизвести в образцах напряженное состояние, характерное для эксплуатационных условий работы детали, и воспроизвести в образце или детали излом эксплуатационного вида.

К основным типам нагружения относятся:

- чистый изгиб при вращении;
- чистый изгиб при вращении в одной плоскости;
- поперечный изгиб при вращении консольных круглых образцов;
- поперечный изгиб при вращении консольных в одной плоскости круглых и некруглых образцов;
- поперечный изгиб консольных круглых и некруглых образцов при вращении силовой плоскости;
- растяжение-сжатие;
- переменное кручение круглых образцов.

Испытания также проводят при комбинированных видах нагружения с получением сложнонапряженного состояния, включающего различные простые напряженные состояния, и (или) при контактных напряжениях.

Рассмотрим конструкции и технологические возможности некоторых установок.

3.1. Испытания на растяжение-сжатие

Известен ряд установок для испытаний на растяжение-сжатие, в частности машины типа ГРМ-1 и ГРМ-2. Ниже приводится конструкция установки [13] – см. рис. 3.1.

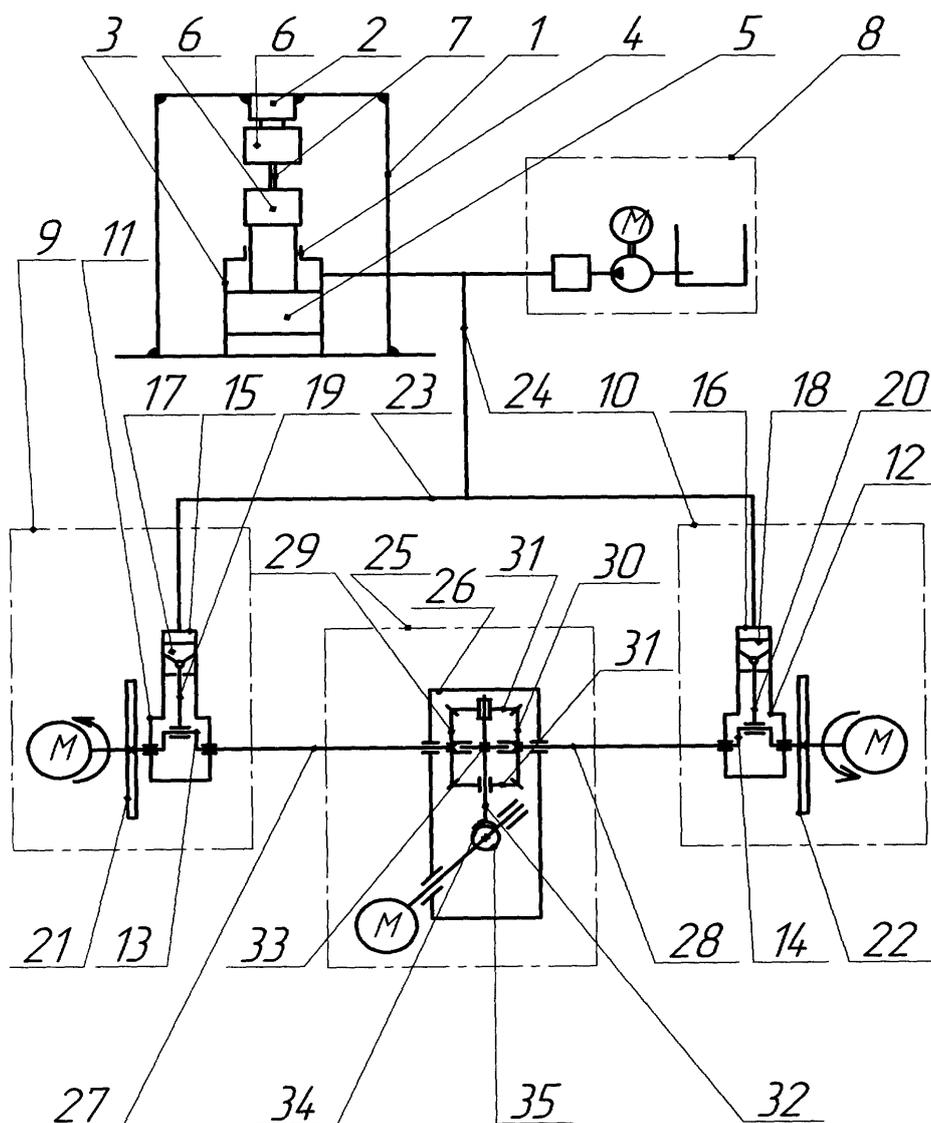


Рис. 3.1. Установка для испытаний на растяжение-сжатие

Основными составными частями являются: силовая рама 1, датчик силы 2, гидравлический силовой цилиндр 3 со втулкой 4 и со што-

ком 5, захваты 6, установленные на штоке 5 и датчике силы 2, для закрепления испытываемых изделий или образцов 7, насосная установка 8 с регулятором подачи рабочей жидкости в гидросистему машины, два гидропульсатора 9 и 10 циклической подачи рабочей жидкости в силовой гидроцилиндр 3, имеющих корпус 11 (12), кривошипный вал 13 (14), гидроцилиндр 15 (16) с плунжером 17 (18), опирающимся через шатуны 19 (20) на кривошипы 13 (14), маховик со шкивом 21 (22) привода вращения кривошипов 13 (14), гидравлический коллектор 23, соединяющий гидроцилиндры 15 (16) двух пульсаторов 9 (10) и соединенный трубопроводом 24 с насосной установкой 8 и с силовым гидроцилиндром 3, и специальная муфта 25.

Специальная муфта 25 представляет собой неподвижный корпус 26, в котором на подшипниках установлены полумуфты 27 и 28, жестко соединенные с кривошипными валами 13 (14) пульсаторов 9 и 10 и снабженные (полумуфты 27 и 28) зубчатыми шестернями 29 и 30, сопряженными с коническими шестернями-сателлитами 31, установленными на подшипниках на оси 32, перпендикулярной оси полумуфт 27 и 28. Ось 32 сателлитов 31 имеет цапфы 33, опирающиеся на подшипники соосно с полумуфтами 27 и 28. На оси 32 закреплен сектор червячного колеса 34, сопряженный с червяком 35, установленным в корпусе 26, обеспечивающим поворот сектора 34 с осью 32 на угол не менее 90° и фиксацию в любом положении в пределах угла поворота.

Описанная машина работает следующим образом. Включается насосная установка 8, рабочая жидкость под минимальным рабочим давлением, по трубопроводу 24 подается в силовой гидроцилиндр 3 и коллектор 23 пульсаторов 9 и 10. Испытываемое изделие (или образец) закрепляется в захватах 6. Посредством специальной муфты 25 криво-

шипные валы 13 и 14 устанавливаются во взаимное положение сдвинутыми по фазе на 180° . Включаются приводы вращения маховиков 21 и 22 с кривошипными валами 13 и 14; вращающиеся кривошипы через шатуны 19 и 20 вызывают возвратно-поступательное движение плунжеров 17 и 18, сдвинутое по фазе на 180° (движутся в противофазе), в результате чего в коллекторе 23 возбуждается возвратно-поступательный поток рабочей жидкости, не попадающей в трубопровод 24 и соответственно в силовой гидроцилиндр 3. При нулевом сдвиге фаз между кривошипами (синфазном движении плунжеров) в коллектор подается и отсасывается из него суммарный циклический объем подачи жидкости двух пульсаторов, и из коллектора 23 по трубопроводу 24 рабочая жидкость подается в гидроцилиндр 3, вызывая возвратно-поступательное движение штока 5 с захватом 6, деформируя испытуемое изделие (или образец) 7. При промежуточных значениях угла сдвига фаз кривошипов между 0° и 180° циклический объем подачи жидкости изменяется от нуля до максимального.

Специальная муфта 25 синхронизирует скорость вращения кривошипных валов 13 и 14 пульсаторов благодаря наличию на полумуфтах 27 и 28 конических шестерен 29 и 30, сопряженных с коническими шестернями-сателлитами 31, установленными на неподвижной оси 32 (при этом аналогично дифференциалу автомобильного дифференциального редуктора), шестерни 29 и 30 вращаются в противоположных направлениях. При повороте червяка 35 сектор червячного колеса 34 поворачивается вместе с осью 32 относительно оси полумуфт 27 и 28, вызывая изменение угла сдвига фаз двух полумуфт и соответственно - кривошипов 13 и 14.

Достаточно простая установка [14] приведена на рис. 3.2.

Установка для механических испытаний образцов при циклическом нагружении содержит основание 1, установленные на нем захваты 2, 3 образца 4, колесо 5 с приводом вращения 6, ролик 7, кинематически связанный с колесом 5, рамку 8, в которой размещен ролик 7, направляющую 9 для перемещения рамки 8, толкатель 10, соединенный с рамкой 8 и связанный с одним из захватов 3.

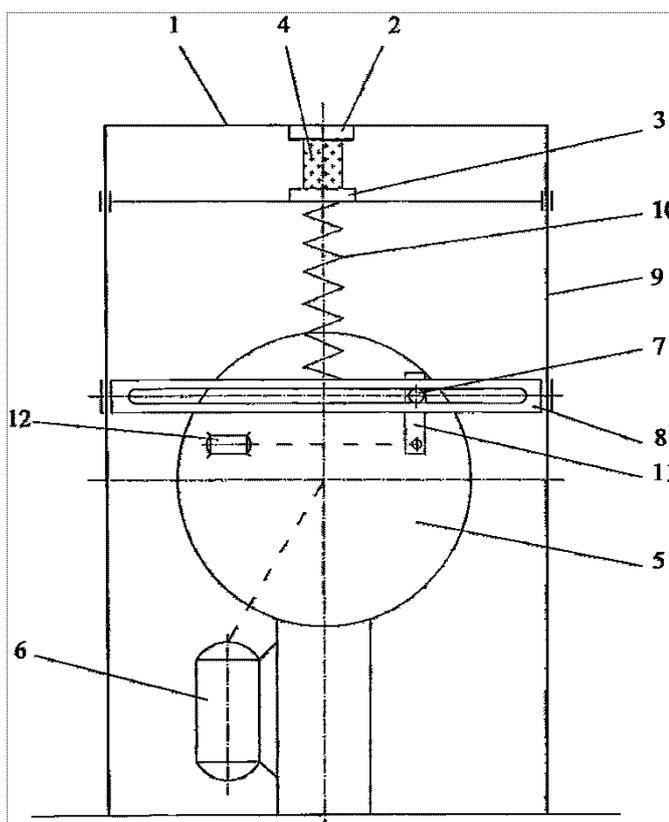


Рис. 3.2. Установка для испытаний на растяжение-сжатие

Установка снабжена рычагом 11 и приводом 12 вращения рычага, размещенными на колесе 5. Ролик 7 установлен эксцентрично на рычаге 11.

Установка работает следующим образом.

Для испытаний при одночастотном нагружении включают привод 6 или привод 12, в результате чего ролик 7 совершает круговые движения, перемещает рамку 8 и через толкатель 10 и захват 3 нагружает образец 1. Для испытаний при двухцикловом нагружении включают оба привода 6 и 12. Частота циклов регулируется скоростью вращения колеса 5 и рычага 11 соответствующими приводами 6 и 12.

Установка обеспечивает испытания как при одноцикловых, так и при двухцикловых нагружениях образца с независимым регулированием частот нагружения, что существенно расширяет объем информации при исследованиях свойств материалов и изделий.

3.2. Испытания на изгиб

Установка [15] позволяет проводить испытания образцов при консольном нагружении вращающегося образца, а также реализует чистый изгиб в режиме автоколебаний. Обеспечивается оптический доступ к первичной микротрещине.

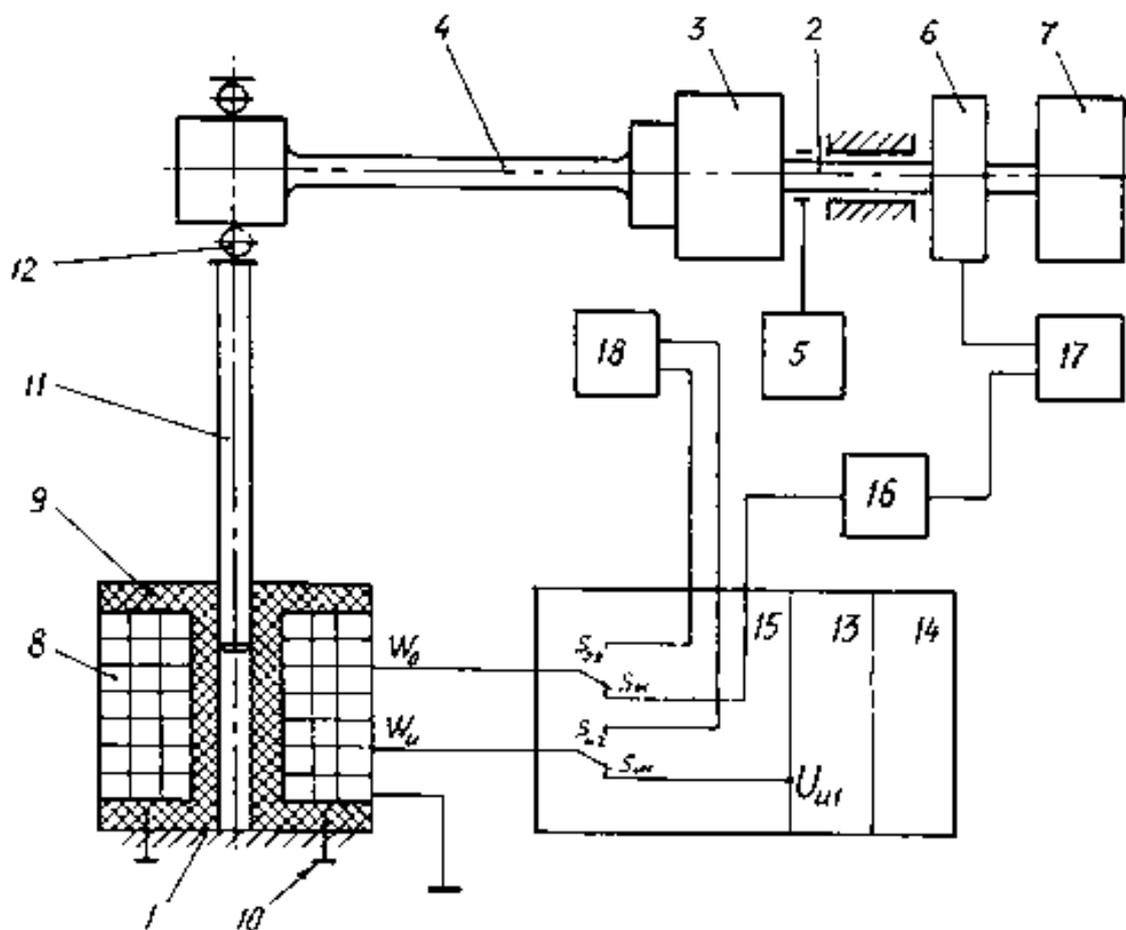


Рис. 3.3. Конструктивная схема установки

Установка содержит основание 1, на котором смонтирован шпиндель 2. На одном конце шпинделя закреплен пассивный захват 3 образца материала 4. Шпиндель снабжен фиксатором положения 5 с ручным управлением. На другом конце шпинделя последовательно размещены датчик фазового положения 6 шпинделя и электродвигатель 7. Элементы 2, 5, 6, 7 образуют привод пассивного захвата.

Устройство нагружения представлено двумя соленоидными катушками (W_0 и W_u) 8. Конструктивно катушки выполнены в виде единого блока (намотаны бифилярно – в два провода) на каркасе 9, который закреплен на основании установки винтами 10. Активный захват выполнен в виде магнитопроводного стержня 11, который с помощью подшипника 12 закреплен на консольном конце образца материала. Магнитопроводный стержень активного захвата входит нижним концом в центральное отверстие каркаса соленоидных катушек. Общая осевая линия магнитопроводного стержня и каркаса соленоидных катушек является направлением деформации образца материала.

Имеется источник тока 13 с несколькими выходами разных напряжений, который снабжен переключателем 14 режимов испытаний, в состав последнего входит коммутатор 15 катушек освобождения W_0 и привода W_u соленоида 8. Имеется измеритель перемещений 16 активного захвата, вход которого соединен с катушкой освобождения W_0 , а выход подключен к первому входу фазоопределителя 17. Второй вход фазоопределителя соединен с датчиком фазового положения шпинделя. Режим автоколебательного нагружения образца материала реализуется с помощью схемы формирования импульсов привода 18.

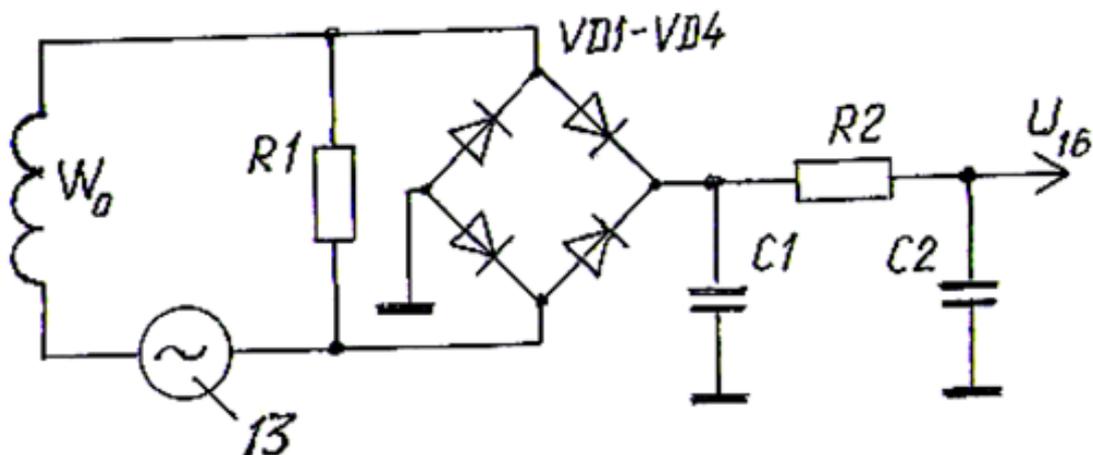


Рис. 3.4. Электрическая принципиальная схема измерителя перемещений активного захвата

Измеритель перемещений активного захвата выполнен по электрической принципиальной схеме фиг. 3.6. Его работа основана на измерении индуктивности L_0 катушки W_0 . Индуктивность катушки тем выше, чем большая часть магнитопроводного стержня 11 охватывается полем катушки. Имеется контур тока в составе катушки W_0 , резистора $R1$ и источника высокой частоты (десятки кГц) – один из выходов источника тока 13. Ток в этом контуре равен

$$I = \frac{U_{17}}{\sqrt{R1^2 + (\omega L_0)^2}} \quad (3.1)$$

где ω – круговая частота напряжения U_{17} ;

$R1$ – сопротивление резистора $R1$.

По закону Ома падение напряжения на резисторе $R1$ пропорционально току I . Далее это высокочастотное напряжение выпрямляется диодным мостом $VD1 - VD4$ и фильтруется П-образным фильтром нижних частот, составленным из резистора $R2$ и двух конденсаторов $C1, C2$.

В результате чем больше прогиб образца материала, тем ниже оказывается магнитопроводный стержень (ориентация чертежа рис.

3.3), соответственно больше индуктивность L_0 и меньше выходное напряжение U_{16} измерителя перемещений активного захвата.

Датчик фазового положения шпинделя (рис. 3.5) генераторного типа. На валу шпинделя 2 соосно закреплена плоская звездочка 19 из магнитомягкого материала. Количество зубьев звездочки определяется требуемой точностью, прием для примера равным 16. Один из зубьев 20 имеет увеличенную ширину. Траектория концов зубьев проходит через зазор магнитной системы 21. Магнитная система

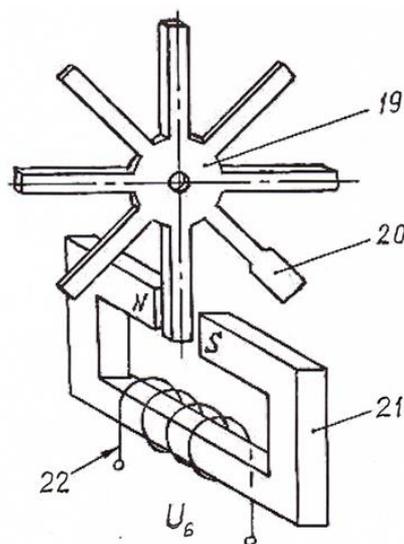


Рис. 3.5. Конструктивная схема датчика фазового положения шпинделя

может быть выполнена литьем из магнитотвердого материала, либо составлена из постоянного магнита простой формы с полюсными наконечниками. На магнитной системе размещена обмотка 22. При вхождении зуба звездочки в зазор магнитной системы магнитная проводимость зазора начинает возрастать, а при выходе уменьшаться. В соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотке датчика будет вырабатываться (индуцироваться) ЭДС. При вращении звездочки ЭДС будет представлять собой последовательность двуполярных импульсов, один из которых имеет увеличенную длительность (при прохождении зуба 20).

Фазоопределитель (рис. 3.6) предназначен для определения фазового (углового) направления минимальной жесткости образца материала. Он построен на типовых функциональных элементах электроники. Входными информационными сигналами фазоопределителя являются

напряжение U_{16} измерителя перемещений активного захвата и последовательность импульсов U_6 датчика фазового положения шпинделя. Выходная информация отражается на индикаторе, который представляет собой линейку светодиодов по количеству зубьев звездочки датчика фазового положения шпинделя – в принятом выше примере $n=16$.

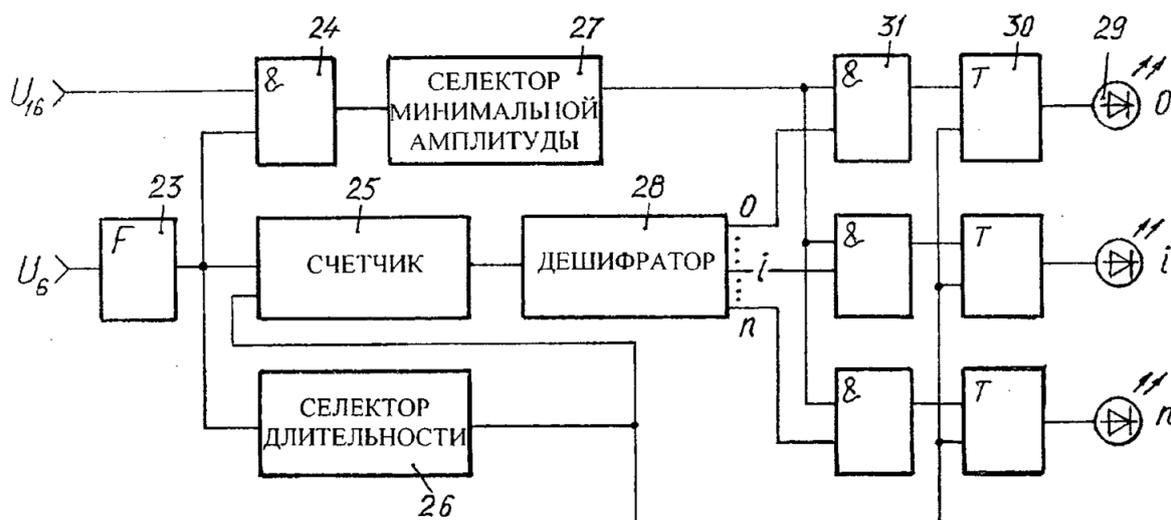


Рис. 3.6. Функциональная схема фазоопределятеля

Входными сигналами фазоопределятеля являются выходной импульсный сигнал U_6 датчика фазового положения шпинделя и выходной аналоговый сигнал U_{16} измерителя перемещений активного захвата. Сигнал U_6 поступает на вход формирователя 23. Схематически это может быть триггер Шмидта. На выходе формирователя 23 имеется последовательность прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды, в которой каждый n -ый имеет увеличенную длительность, соответствующую зубу 20 звездочки 19 датчика фазового положения шпинделя. Выходной сигнал формирователя поступает на входы конь-

конъюнктора 24 сигнала измерителя перемещений активного захвата, счетчика 25 и селектора длительности 26. Конъюнктор 24 пропускает импульсы формирователя ограничивая их по амплитуде напряжением U_{16} измерителя перемещений активного захвата. Далее селектор минимальной амплитуды 27 выделяет импульс минимальной амплитуды, на время действия которого на его выходе будет присутствовать логическая единица.

Счетчик 25 представляет собой линейку последовательно соединенных счетных триггеров. Для принятого примера $n=16$ линейка составит 4 триггера. Шину сброса образует выход селектора длительности 26. Этот селектор формирует короткий импульс по срезу (заднему фронту) импульса повышенной длительности с выхода формирователя 23.

Состояние счетчика 25 переводится в позиционный код дешифратором 28. Таким образом, если назвать импульс повышенной длительности нулевым (он соответствует широкому зубу звездочки датчика 6), то потенциал логической единицы на выходе дешифратора будет на той i -ой шине, которая соответствует порядковому i -му номеру зубьев звездочки. Этот цикл будет повторяться на каждом полном обороте шпинделя, соответственно и образца материала.

Управление индикаторными светодиодами 29 осуществляется единичным выходом RS-триггеров 30. Установка каждого триггера 30 в единичное состояние (S-входы) обеспечивается «своим» конъюнктором 31. Первые входы конъюнкторов 31 подключены к выходу селектора минимальной амплитуды 27, а вторые - к соответствующим выходным шинам дешифратора 28. Установка триггеров 30 в исходное состояние (входы R) осуществляется по общей шине сброса импульсом

с выхода селектора длительности 26. Конъюнкторы 31, RS-триггеры 30 и светодиоды 29 образуют индикаторный блок.

Таким образом, фазоопределитель работает циклически, один цикл соответствует одному обороту шпинделя. Если в пределах оборота прогиб образца материала будет изменяться, то на индикаторе 29 высветится тот светодиод, который укажет номер зуба звездочки датчика фазового положения, соответствующий направлению (плоскости) минимальной жесткости образца материала.

Схема формирования импульсов привода (рис. 3.7) предназначена для обеспечения автоколебательного режима нагружения. Она построена по обычному для электромагнитных приводов варианту. СФИП управляется электрическим сигналом катушки W_0 соленоида 8 (см. рис. 3.3). Схема формирует короткий импульс тока в катушку W_u . Каскад на транзисторе VT3 функционально представляет собой электронный ключ, а каскады на транзисторах VT1, VT2 являются усилителем-формирователем. Исходное состояние схемы по постоянному току: транзистор VT1 находится в режиме отсечки за счет запирающего стержня $E_{см}$. Транзистор VT2 открыт – цепь смещения резистор R4, а ключевой транзистор VT3 закрыт нулевым смещением через резистор R6. Каскады по постоянному току разделены конденсаторами C1-C3. В исходном состоянии через катушку W_0 протекает небольшой ток источника E (подмагничивающий ток) через ограничительный резистор R1, ток катушки W_u близок к нулю, так как транзистор VT3 закрыт.

При включении питания источника I3 фронт напряжения обеспечивает импульсы тока в катушках W_0 и W_u . В силу неравенства этих токов взаимодействие магнитных полей катушек с магнитопроводным

стержнем 11 создаст импульс силы, который подтолкнет активный захват, что обеспечит начало колебаний. При колебаниях в катушке возбуждения W_0 будет индуцироваться ЭДС пропорциональная подмагничивающему току и скорости магнитопроводного стержня. При достижении ЭДС уровня смещения $E_{мс}$ транзистор VT1 откроется, а закроется на спаде ЭДС на том же уровне. Усиленный каскадом на транзисторе VT2 полученный импульс откроет ключевой транзистор VT3 и через катушку W_u пройдет импульс тока. Магнитное поле катушки W_u обеспечит подталкивающий механический импульс на магнитопроводный стержень 11. Энергия этого импульса компенсирует потери энергии при колебаниях, обеспечивая стационарный автоколебательный режим.

Рассматриваемая установка позволяет реализовать два режима испытаний. Режим 1 - режим вынужденных колебаний, когда образец материала вращается за пассивный захват, а к активному захвату приложена постоянная поперечная сила. Режим 2- режим автоколебаний. Для ускорения времени испытаний и повышения удобства изучения состояния образца материала в процессе испытаний целесообразно эти режимы использовать последовательно.

Режим 1. Переключатель режимов испытаний 14 источника тока устанавливаются в положение «Режим 1». При этом контакты коммутатора 15 окажутся в положении рис. 3.3, то есть контакты S_{01} и S_{u1} замкнуты, а контакты S_{02} и S_{u2} разомкнуты. В этом режиме от источника тока 13 подается электропитание на электровигатель 7, измеритель перемещений 16 активного захвата, фазоопределитель 17 и по шине питания U_{u1} величиной тока задается постоянная сила, втягивающая магнитопроводный стержень 11 в соленоид 8. Эта сила обеспечивает изгиб образца материала 4. В процессе такого нагружения в конечном счете

в образце материала начинает появляться микротрещина. С появлением микротрещины нарушается симметрия жесткости образца материала. На фазе поворота образца материала, когда микротрещина окажется в зоне растянутых волокон она раскрывается, а когда в зоне сжатых – схлапывается. Направление на микротрещину, т.е. плоскость минимальной жесткости в этой установке показывает индикатор фазоопределителя 17. При появлении немметрии жесткости на каждом обороте шпинделя будет выявляться номер зуба звездочки датчика 6 фазового положения шпинделя, следовательно, оператор будет наблюдать мерцающий свет соответствующего номера светодиодного индикатора 29 фазоопределителя 17. После этого отключают электропитание двигателя 7 (или всей установки), поворачивают шпиндель 2 в положение, когда зуб звездочки 19, номер которого отмечен на индикаторе, параллельно осевой линии магнитопроводного стержня 11, затем стопорят это положение шпинделя (и пассивного захвата) фиксатором 5. При такой ориентации появляется микротрещина, которая окажется на верхней части образца материала, что обеспечит хороший обзор при ее изучении.

После ориентации образца материала и фиксации пассивного захвата переключатель режимов 14 источника тока 13 устанавливают в положение «Режим 2». При этом замыкаются контакты S_{02} , S_{u2} (соответственно размыкаются S_{01} , S_{u1}) за счет чего подключается к соленоидным катушкам 8 схема формирования импульсов привода (СФИП), которая обеспечивает автоколебательный режим нагружения образца материала. Источник тока 13 снабжает СФИП (рис. 3.7) уровнями напряжений E и $E_{см}$. В этом режиме другие функциональные блоки установки обесточены.

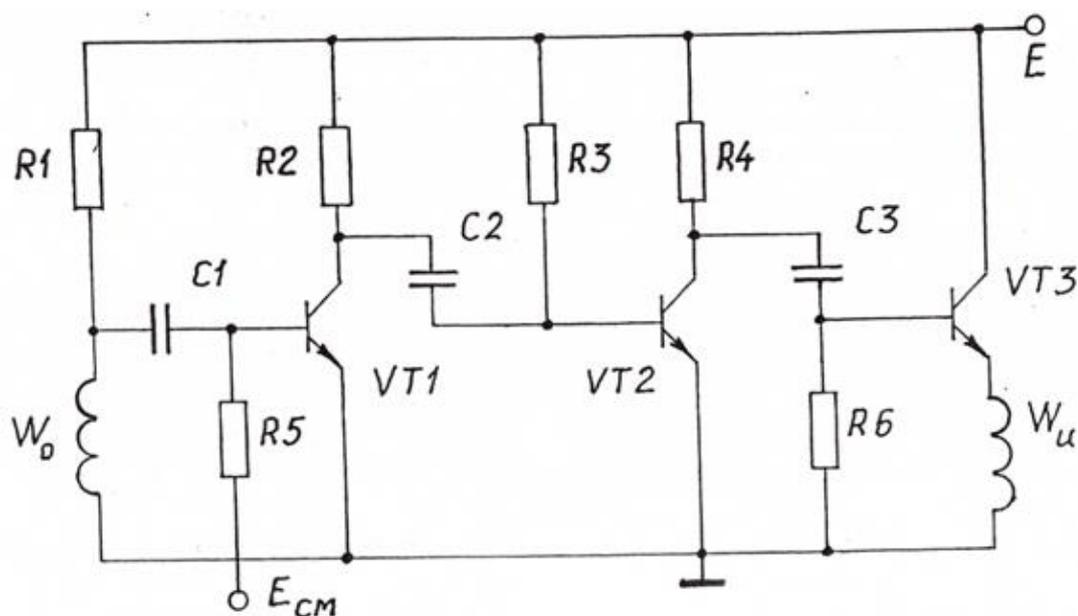


Рис. 3.7. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

Процесс испытаний ведут в соответствии с принятой программой, измеряя время работы в автоколебательном режиме или количество циклов нагружения. Во втором случае ведут подсчет импульсов с катушки привода W_u . Установка позволяет периодически останавливать автоколебания отключением питания СФИП с целью изучения процесса развития микротрещины.

Таким образом предлагаемая установка для испытаний материалов на усталость позволяет проводить испытания в двух режимах, за счет ориентации образца материала по плоскости минимальной жесткости обеспечивается сокращение времени испытаний до момента разрушения образца. На втором этапе испытаний (автоколебательный режим) зарождающаяся микротрещина в образце материала всегда находится в верхней части образца, что расширяет возможности изучения процесса ее развития. Конструктивно установка проста, в ней использованы типовые узлы электроники.

3.3. Испытания при сложном напряженном состоянии

На рис. 3.8 – 3.9 изображена установка [16] для испытаний образцов материалов путём чередования сжатия и знакопостоянного кручения через цикл, т.е. после нагружения образца одним циклом сжатия, он нагружается одним циклом знакопостоянного кручения. После переналадки установки образец испытывается только на циклическое сжатие или циклическое знакопостоянное кручение.

Установка содержит основание 1, установленный на нем привод 2 вращения кривошипов 3 и 4 и кривошипа 5, жестко соединенного с зубчатым колесом оси 6, стопорные кольца 7 и 8, соединенные соответственно винтами 9 и 10 с осями 6 и 11 и предназначенные для предотвращения продольного смещения этих осей, шатун 12, состоящий из двух частей, необходимых для регулирования его длины и соединенных между собой с помощью резьбы, одна часть которого соединена шарнирно с кривошипом 5, а другая - с ползуном 13, размещенным в направляющем цилиндре 14, жестко соединенном с основанием 1, силовую пружину 15, размещенную в цилиндре 14 и взаимодействующую одним концом с ползуном 13, а другим - с поршнем 16, пассивный захват 17 образца 18 и соосный ему активный захват 19, жесткоприкрепленный к поршню 16, и соосно и жестко соединенные с активным захватом 19 по обе его стороны рычаги 20 и 21.

Установка также содержит шатуны 22 и 23, состоящие каждый из двух частей аналогично шатуну 12 и соединенные шарнирно одними концами с соответствующими кривошипами 3 и 4, а другими - с соответствующими ползунами 24 и 25, размещенными в соответствующих направляющих 26 и 27, жестко соединенных с основанием 1, гибкие тяги 28 и 29, соединенные одними концами с соответствующими ползунами 24 и 25, охватывающие соответствующие блоки 30, 31 и 32, 33,

закрепленные на основании, и другими концами соединенные с соответствующими силовыми пружинами 34 и 35, которые в свою очередь соединены соответственно с рычагами 20 и 21.

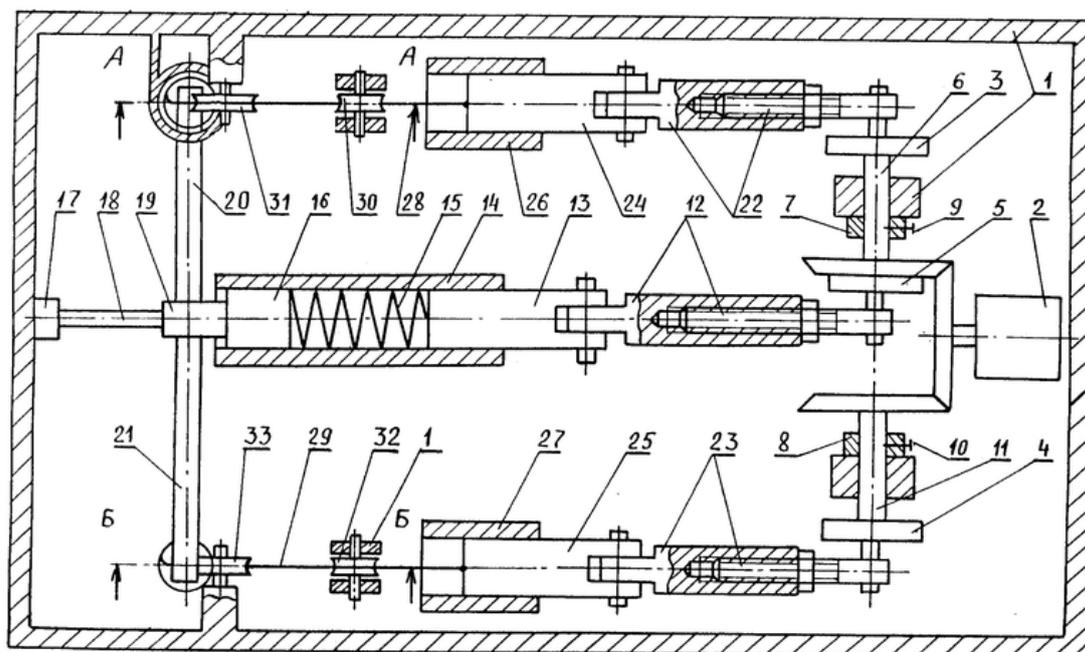


Рис. 3.8. Конструктивная схема установки

Пружина 34 размещена в цилиндре 36, соединенном с основанием 1 и необходимом для предотвращения ненужного наклона пружины 34 при провисании тяги 28.

Установка работает следующим образом.

Устанавливают радиусы кривошипов 5, 3 и 4, соответствующие требуемым осадкам пружин 15, 34 и 35, которые определяются соответствующими требуемыми максимальными за цикл нагрузками сжатия и кручения образца 18. Исходное положение шатунов 12, 22 и 23 указано на чертеже. При этом оси крепления шатунов 12 и 22 к кривошипам 5 и 3 находятся в верхнем крайнем положении по отношению к

кривошипам 5 и 3, а ось крепления шатуна 23 к кривошипу 4 - в нижнем крайнем положении по отношению к кривошипу 4.

Длину шатуна 12 устанавливают такой, чтобы пружина 15 контактировала с поршнем 16 и ползуном 13 и оставалась при этом ненагруженной. Затем устанавливают длины шатунов 22 и 23 такими, чтобы гибкие тяги 28 и 29 были натянуты, а пружины 34 и 35 при этом остались ненагруженными. Включают привод 2, который вращает кривошипы 5, 3 и 4 одновременно. При перемещении ползуна 13 в крайнее левое положение (по чертежу) ползун 13 сжимает пружину 15, которая свое усилие передает через поршень 16 и активный захват 19 на образец 18, подвергая его сжатию.

При перемещении ползуна 13 из крайнего левого положения в исходное образец 18 разгружается. При перемещении ползунунов 24 и 25 одновременно с ползуном 13 из исходного положения в крайнее левое и обратно не происходит нагружения образца 18 через пружины 34 и 35, ибо тяги 28 и 29 при этом провисают и возвращаются обратно в исходное положение.

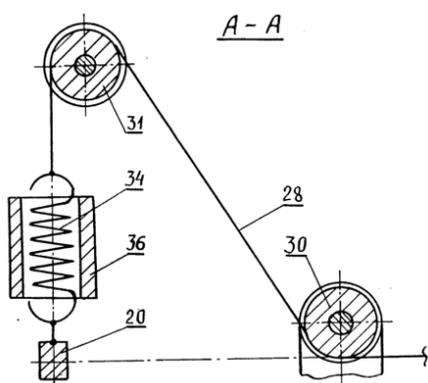


Рис. 3.9, а. Разрез А-А по рис. 3.8

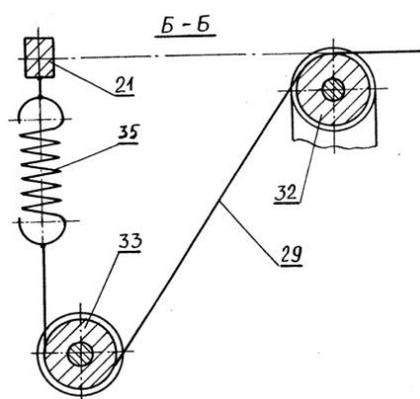


Рис. 3.9, б. Разрез Б-Б по рис. 3.8

При дальнейшем перемещении ползунунов 24 и 25 из исходного положения в крайнее правое ползуны 24 и 25 соответственно через тяги 28 и 29 растягивают пружины 34 и 35, которые передают свои усилия

на рычаги 20 и 21, подвергая образец 18 кручению. При перемещении ползунов 24 и 25 из крайнего правого положения в исходное образец 18 разгружается. При перемещении ползуна 13 вместе с ползунами 24 и 25 из исходного положения в крайнее правое и обратно не происходит нагружения образца 18 через пружину 15 ибо в этот промежуток времени ползун 13 не воздействует на пружину 15. Таким образом образец вначале нагружается одним нулевым циклом сжатия, а затем одним нулевым циклом кручения и после этого процесс нагружения образца повторяется.

Для испытания образца 18 только на циклическое сжатие с нулевым циклом отсоединяют шатуны 22 и 23 от кривошипов 3 и 4. Устанавливают радиус кривошипа 5, соответствующий требуемой осадке пружины 15, которая определяется требуемым максимальным за цикл усилием сжатия образца 18. При этом ползун 13 устанавливают в крайнее правое положение и устанавливают длину шатуна 12 такой, чтобы пружина 15 контактировала с поршнем 16 и ползуном 13 и оставалась при этом ненагруженной. Включают привод 2. Ползун 13, перемещаясь возвратно-поступательно, через пружину 15, поршень 16 и активный захват 19 нагружает образец 18 циклическим сжатием с нулевым циклом.

Для испытания образца 18 только на циклическое кручение с нулевым циклом отсоединяют шатун 12 от кривошипа 5. Устанавливают радиусы кривошипов 3 и 4, соответствующие требуемым осадкам пружин 34 и 35, которые определяются требуемым максимальным за цикл усилием кручения образца 18. При этом ползуны 24 и 25 устанавливают в крайнее левое положение и устанавливают длины шатунов 22 и 23 такими, чтобы гибкие тяги 28 и 29 были натянуты, а пружины 34 и

35 при этом оставались ненагруженными. Включают привод 2. Ползуны 24 и 25, перемещаясь возвратно-поступательно, через тяги 28 и 29, пружины 34 и 35 и рычаги 20 и 21 нагружают образец 18 циклическим кручением с нулевым циклом.

Сравнительно простая схема нагружения реализована в установке [17], которая обеспечивает испытания при циклическом или ступенчатом изменении направления изгибающей нагрузки на образце.

Установка для испытания образцов материалов на усталость при сложном напряженном состоянии содержит два двигателя 1, 2 разной мощности с параллельными валами 3,4 и встречно направленными крутящими моментами, два рычага 5, 6, одни концы которых соединены с валом соответствующего двигателя, захваты 7, 8 для образца 9, один из которых 7 установлен на конце первого рычага 5, электромагнитную катушку 10, шарнирно соединенную с концом второго рычага 6, и якорь 11, закрепленный на втором захвате 8.

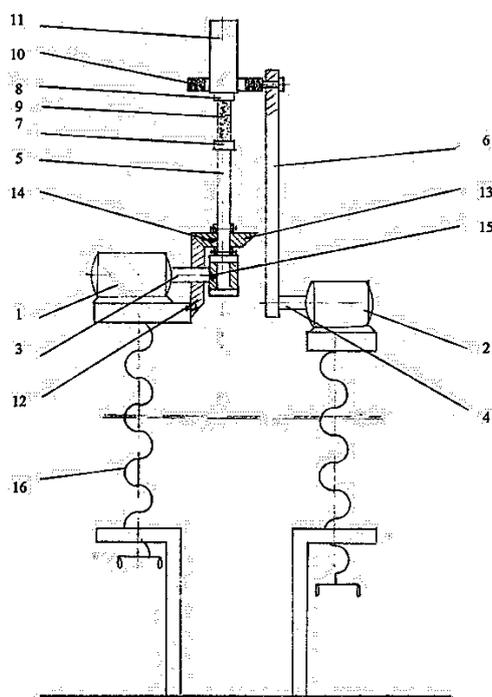


Рис. 3.10. Конструктивная схема установки

Установка имеет два кинематически связанных между собой колеса 12,13. Первый рычаг 5 выполнен с возможностью вращения вокруг своей оси. Одно колесо 13 установлено на этом рычаге 5 соосно ему с возможностью совместного вращения, а второе колесо 12 установлено соосно валу привода первого рычага без возможности вращения.

Установка имеет фиксаторы 14, 15 для соединения первого рычага 5 с установленным на нем колесом 13 и с соответствующим валом 3.

Установка имеет приспособления 16 для регулирования смещения между валами 3, 4.

Установка работает следующим образом.

При подаче электрического тока на электромагнит 10, в зависимости от взаимного расположения электромагнита 10 и якоря 11, к образцу 9 прикладывается растягивающее или сжимающее усилие. При включенных двигателях, имеющих встречно направленные крутящие моменты, более мощный двигатель, например 4, приводит во вращение рычаги 5 и 6, а менее мощный двигатель 2 создает сопротивление вращению рычагов, вызывающее постоянную составляющую изгибающей нагрузки на образец 3. Вследствие несоосности валов 3, 4 при их вращении происходит взаимное смещение электромагнита 10 и якоря 11, что приводит к возникновению переменной составляющей осевой и изгибающей нагрузок. При включенном фиксаторе 14 и выключенном фиксаторе 15 колесо 13 вращается вместе с рычагом 5 относительно неподвижного колеса 12. Это создает вращение образца 9 вокруг своей оси вместе с захватами 7, 8 и якорем 11, что приводит к циклическому изменению направления изгиба образца. Для испытаний при постоянном направлении изгиба образца выключают фиксатор 14 и включают

фиксатор 15. Для ступенчатого изменения направления действия изгибающей нагрузки переключениями фиксаторов 14, 15 поворачивают образец на заданный угол. Пределы изменения осевой и изгибающей нагрузок регулируют изменением взаимного положения валов 3, 4 приспособлениями 16.

Установка обеспечивает испытания в новых условиях - при циклическом или ступенчатом изменении направления изгибающей нагрузки на образце. Это повышает информативность испытаний образцов материалов на усталость при сложном напряженном состоянии.

3.4. Испытания с применением температурных воздействий

Установка [18] предусматривает испытания образцов с минимальной трудоемкостью по различным программам. Снижению трудозатрат способствует простая технология установки образца и автоматизация процесса. Установка позволяет фиксировать жесткость образца для заданных плоскостей колебаний без остановки нагружения. Имеется возможность внешнего промежуточного контроля образца, при перемонтаже не нарушается исходное крепление образца с активным и пассивным захватами. Предусмотрена возможность проводить различные виды термообработки при разных параметрах – скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

Установка для испытания образцов на усталость конструктивно выполнена из двух блоков – нагружателя и блока управления.

Все элементы нагружателя смонтированы на основании 1. В дуплексированном подшипнике 2 основания установлен вал 3. На верхнем конце вала (здесь и далее ориентация чертежа) закреплен пассивный захват 4. Указанное крепление осуществляется через несимметричное гнездо, за счет которого реализуется постоянство относительного

углового (фазового) положения вала и пассивного захвата при пере-
 монтаже. Исследуемый образец материала 5 нижним концом закрепля-
 ется в пассивном захвате, а на верхнем конце закрепляется активный
 захват 6. Активный захват выполнен из магнитопроводного (магнито-
 мягкого) материала, его внешний контур имеет цилиндрическую
 форму, а по периметру имеется группа сквозных соосных отверстий 7.
 Активный захват является частью электромагнитного возбуждителя ко-
 лебаний, другими частями которого служат электромагниты 8, 9. Элек-
 тромагниты (рис. 3.12) выполнены однотипно, каждый из них содер-
 жат плоские магнитопроводы 10, 11 и электрическую катушку 12.

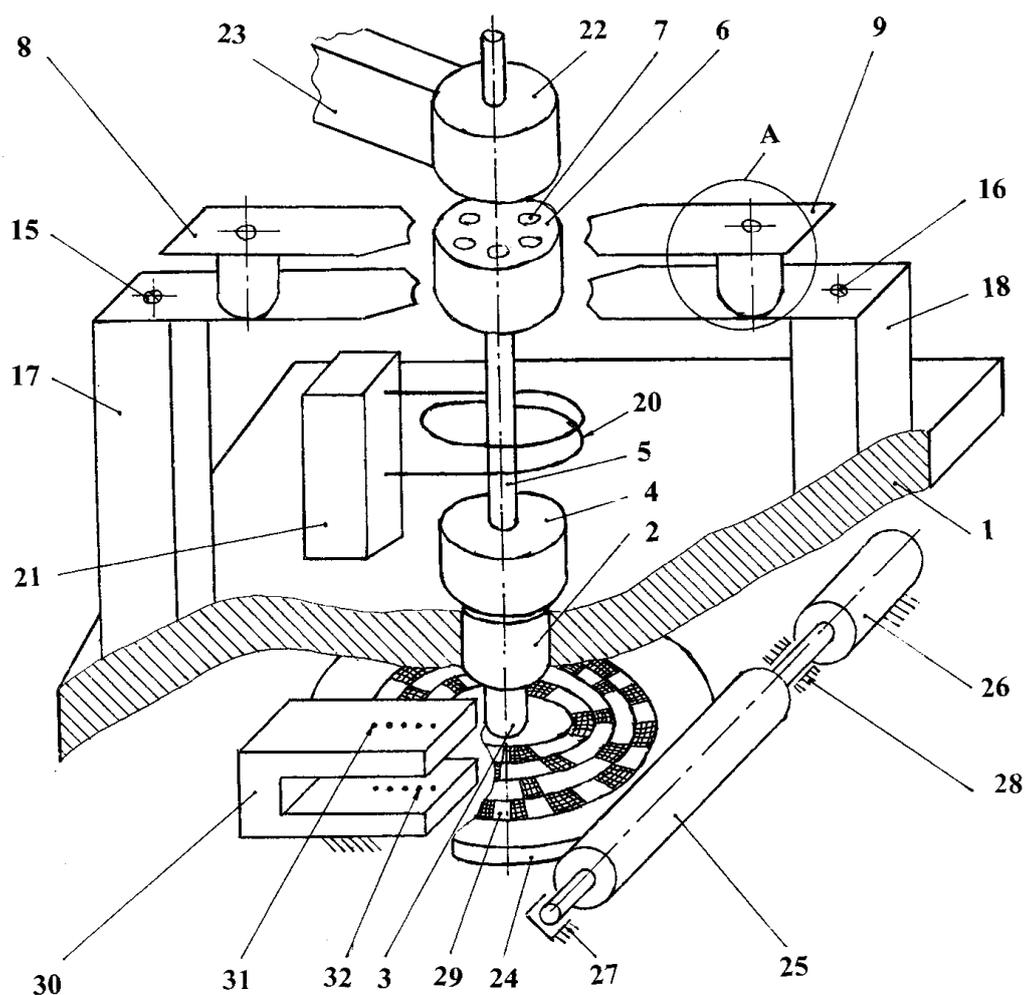
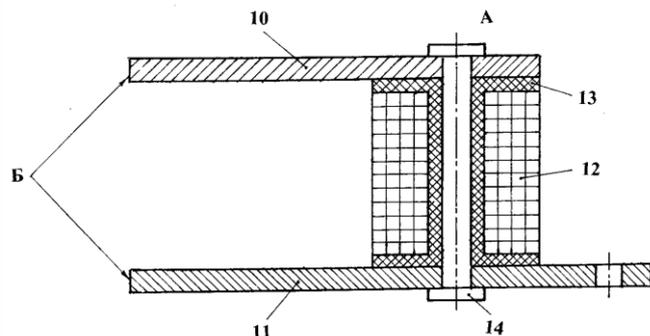


Рис. 3.11. Конструктивная схема установки

Электрическая катушка намотана на каркас 13 и общая сборка осуществляется магнитопроводной стяжкой 14. Обращенные к актив-



ному захвату торцевые поверхности Б магнитопроводов выполнены эквидистантно по отношению к активному захвату с образованием одинаковых радиальных зазоров.

Рис. 3.12. Конструкция электромагнитов

Электромагниты закреплены винтами 15,16 на кронштейнах

17, 18 основания. Электрические катушки электромагнитов соединены с электронным ключом 19 (рис. 3.13).

Для удобства изложения воспользуемся терминологией автоколебательных систем и назовем одну катушку катушкой освобождения

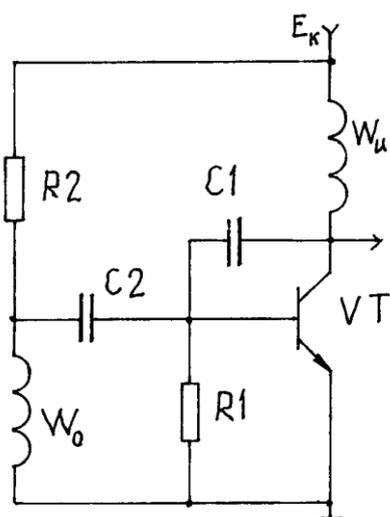


Рис. 3.13. Электрическая принципиальная схема электронного ключа

W_0 , другую – катушкой импульсной (привода) W_u . Функцию собственно ключа выполняет транзистор VT, исходный размер которого задан резистором R1, а для сбоев возможной высококачественной паразитной генерации предусмотрена обратная связь с помощью конденсатора C1 малой емкости. В катушку W_0 через резистор R2 задается подмагничивающий ток, который создает магнитный поток по пути: стяжка 14 – магнитопроводы 10, 11 – два зазора – активный захват Б. При колебаниях активного захвата изменяется величина зазоров, что приводит к изменению магнитного сопротивления и соответственно индуцируется ЭДС в катушке освобождения W_0 . Переменная

захват Б. При колебаниях активного захвата изменяется величина зазоров, что приводит к изменению магнитного сопротивления и соответственно индуцируется ЭДС в катушке освобождения W_0 . Переменная

составляющая через разделительный конденсатор С2 поступает на базу транзистора VT. Положительная полуволна ЭДС открывает транзистор и по катушке привода Wи проходит импульс тока источника Ек. Этот ток создает свой магнитный поток, за счет которого активному захвату сообщается подталкивающий механический импульс силы. Амплитуду изгибных колебаний образца можно регулировать величиной напряжения питания Ек электронного ключа.

Обратимся к температурному режиму испытаний. Для реализации различных видов термообработки образца в установке предусмотрены два канала – нагрева и охлаждения. Канал индукционного нагрева представлен на рис. 3.11 катушкой 20 с датчиком температуры, которые закреплены на кронштейне 21, при этом катушка расположена по периметру испытуемого образца 5. Охладитель на рис. 3.11 отражен форсункой 22, которая закреплена на поворотном кронштейне 23 таким образом, что в рабочем положении образует зазор с верхним торцом активного захвата. Прокачиваемый через форсунку воздушный поток направлен вниз, при этом он частично проходит через группу отверстий 7 активного захвата, и частично огибает его.

В кинематическую схему нагружателя входит привод вала 3. Привод выполнен дискретным. Он содержит червячную передачу, составленную из червячного колеса 24, сопряженного с червяком 25, и шаговый двигатель 26. Привод размещен ниже основания с целью защиты от тепловых возмущений. Червячное колесо закреплено на нижнем конце вала 3, а червяк – в подшипниках 27, 28 корпуса. В процессе испытаний образца привод с заданным временным интервалом поворачивает вал с пассивным захватом на один угловой шаг, что обеспечивает поворот плоскости колебаний образца.

Измерительное устройство предназначено для выявления первичной информации о состоянии образца и передачи ее на регистратор в качестве которого целесообразно использовать компьютер. В процессе испытаний образца начинают накапливаться дефекты и жесткость D изменяется, что отражается на циклической частоте колебаний ω

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (3.2)$$

где m – масса активного захвата.

Вместо циклической частоты ω удобнее пользоваться периодом колебаний T

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (3.3)$$

Значение периода колебаний T отражает последовательность импульсов на коллекторе ключа 19 возбуждителя колебаний.

Поскольку дефекты образца возникают в произвольных его частях необходимо сопоставить период T с фазовым (угловым) положением. Для получения значения фазы служит оптический преобразователь, в который входят кодовый диск 29, оптический кронштейн 30, на котором соосно друг другу установлены линейка осветителей 31 (светодиодов) и линейка фотоприемников 32 (фотодиодов). Кодовый диск выполнен из прозрачного материала и закреплен на червячном колесе 24. Диск разделен на кольцевые зоны (по количеству разрядов) и сектора, соответствующие участки диска покрыты непрозрачной краской в соответствии с принятым двоичным кодом. Таким образом, каждому фиксированному фазовому положению диска, следовательно, и образца, соответствует свое двоичное число в виде сигналов фотоприемников 32.

Обработка вышеназванной информации осуществляется в соответствии с функциональной схемой рис. 3.14.

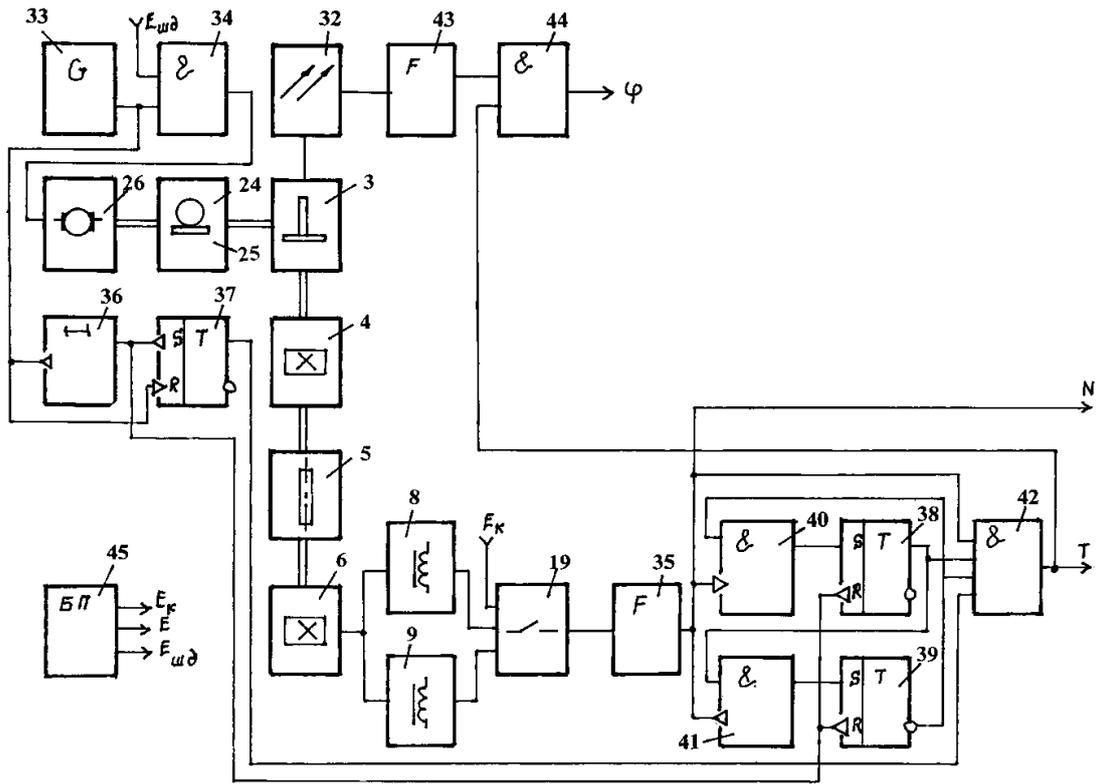


Рис. 3.14. Функциональная схема измерительного устройства

На рис. 3.15 приведены эюры напряжений на выходах отдельных функциональных элементов.

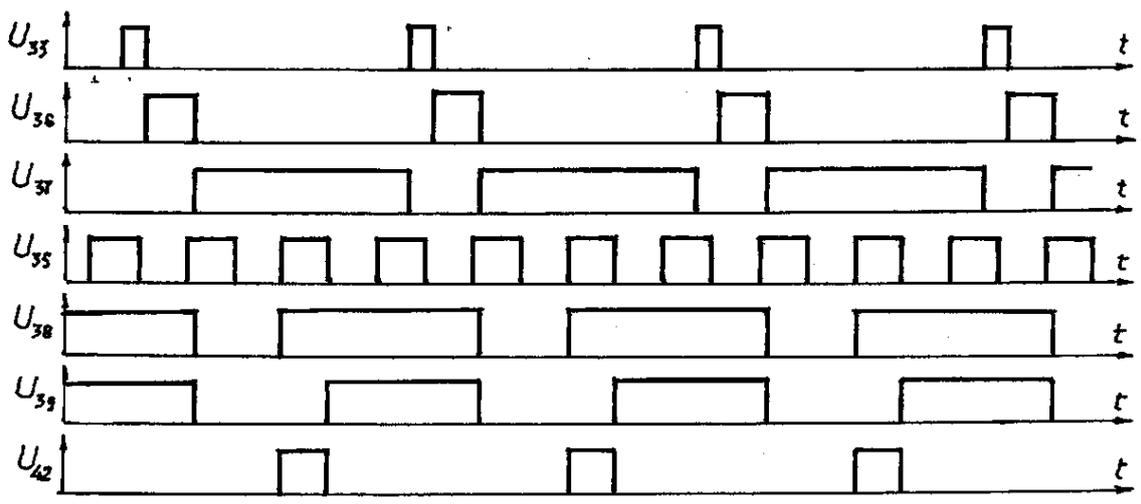


Рис. 3.15. Эюры напряжений на выходах функциональных элементов

Таким образом, измерительное устройство составляют:

- регистратор результата (на рис. 3.14. не показан), который фиксирует фазовое положение φ , период колебаний T и суммарное число циклов N ;

- элементы выявления первичной информации: электронный ключ электромагнитного возбудителя колебаний и кодовый диск, охваченный линейками осветителей и фотоприемников;

- схема формирования, которая подготавливает первичную информацию для регистрации. К схеме формирования относятся следующие элементы функциональной схемы: 35-44.

Вторым конструктивным блоком установки, кроме нагрузителя, является блок управления. В этом блоке смонтированы элементы электроники с органами управления, индикации и блок электропитания:

- элементы канала нагрева с регулятором мощности и индикатором температуры;

- элементы канала охлаждения: регулируемый воздушный насос, который может быть снабжен охладителем воздуха;

- электронные элементы функциональной схемы;

- органы управления: тумблеры, регуляторы;

- гнезда для подключения регистратора.

Связь между блоками нагружения и управления осуществляется электрическим кабелем, а по каналу охлаждения гибким шлангом.

Пользуются установкой в соответствии с программой испытаний. Рассмотрим один вариант программы. На отдельном рабочем месте закрепляют на образце 5 пассивный 4 и активный 6 захваты. Поворачивают кронштейн 23 смещая форсунку 22 охладителя. Устанавливают полученную сборку образца пассивным захватом в гнезде вала 3 и закрепляют пассивный захват. На блоке 45 включают электропитание, и

электромагнитный возбудитель обеспечивает автоколебания образца. Расчетную нагрузку образца регулируют по величине амплитуды колебаний активного захвата, изменяя напряжение питания E_k электронного ключа. Включают генератор 33 и проводят предварительные испытания для оценки исходного состояния образца. Отключают генератор 33 и электронный ключ 19. Включают канал нагрева и производят термообработку, например, рекристаллизационный отжиг. Поворотом кронштейна 23 устанавливают форсунку 22 над активным захватом, включают насос охладителя. После достижения до заданной температуры (контролируют по индикатору температуры канала нагрева) отключают насос. Включают установку и проводят основные испытания. Анализ получаемых на регистраторе результатов может привести к необходимости промежуточного оптического контроля состояния образца. Для этого освобождают крепление пассивного захвата 4 на валу 3, снимают образец вместе с захватами и изучают его на другом рабочем месте. Возврат образца для продолжения испытаний не нарушает его фазового положения. По окончании испытаний на регистраторе будут зафиксированы коды фазового положения, для каждого из них значение периода колебаний образца T и суммарное количество циклов нагружения N . При анализе жесткости D образца пользуются формулой (3.3).

Установка для испытания образцов материалов на усталость [19] позволяет реализовать широкий спектр программ испытаний. Индикатор установки показывает в масштабе текущее значение перемещения активного захвата в форме прямоугольных импульсов, при этом восходящему участку соответствуют положительные импульсы, а нисходящему – отрицательные. Индикатор также отражает момент прохождения экстремума функции перемещения активного захвата и количество

циклов работы устройства термообработки. Термообработка выполняется без демонтажа образца как в произвольный момент времени, так и по сигналу о текущем состоянии образца материала. Установка проста в обращении, режим испытаний задается органами электроуправления.

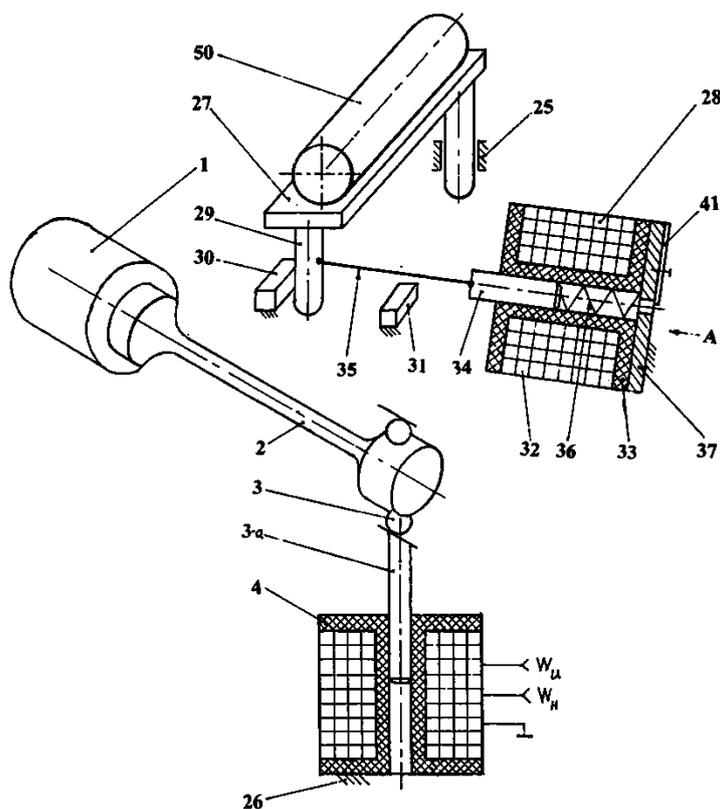


Рис. 3.16. Конструктивная схема установки

При практической реализации принятых проектных решений конструктор исходит из принципа преемственности, т.е. он широко применяет зарекомендовавшие на практике отдельные узлы и детали подобных изделий. Будем полагать, что реализация предлагаемых технических решений будет проводиться с использованием некоторых элементов широкораспространенной машины УКИ-10М. Исходя из этого подхода на рис. 3.16 не отражены шпиндель с его электроприводом и счетчик нагружения, а показан только пассивный захват 1.

В соответствии с конструктивной схемой (рис. 3.16) испытываемый образец материала 2 крепится одним концом в пассивном захвате, а другим в активном захвате 3 в виде шарикоподшипникового узла. Имеется двухсекционная (с бифилярной обмоткой) электрическая соленоидная катушка, выполненная на каркасе 4. Одна обмотка W_H предназначена для задания силы нагружения образца материала, другая – W_u входит в состав схемы измерителя перемещения активного захвата. В центральное отверстие каркаса 4 с радиальным зазором входит магнитопроводный стержень 3-а, который одним концом закреплен на активном захвате. Сила нагружения для срединного участка перемещения магнитопроводного стержня 3-а пропорциональна току в обмотке W_H . Индуктивность L_u другой обмотки W_u также изменяется линейно. Обмотка W_H подключена к регулируемому выходу постоянного тока U_H источника тока.

Цепь обмотки W_u показана на рис. 3.17.

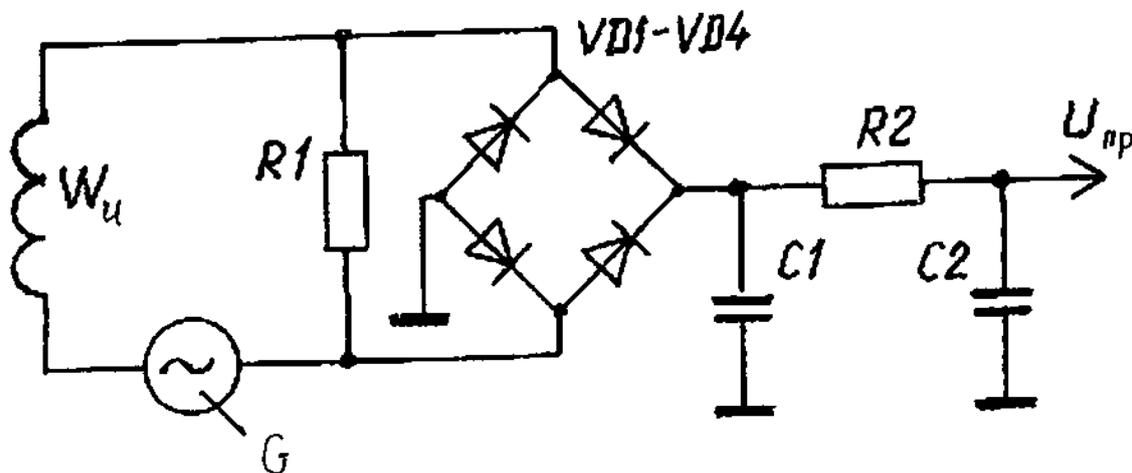


Рис. 3.17. Схема измерителя перемещения активного захвата

Обмотка W_u совместно с высокочастотным синусоидальным выходом U_G источника тока (для наглядности это отражено в виде генератора G) и резистором $R1$ образуют замкнутый электрический контур.

Действующее значение тока в контуре

$$I = \frac{U_G}{z}, \quad (3.4)$$

где z – полное сопротивление контура.

$$z = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_u)^2}, \quad (3.5)$$

здесь ω – циклическая частота сигнала генератора G .

Падение напряжения на резисторе R_1 пропорционально току

$$U_{R1} = I \times R_1. \quad (3.6)$$

Синусоидальное напряжение (3.6) выпрямляется диодным мостом $VD1$ - $VD4$ и сглаживается Π -образным электрическим фильтром на двух конденсаторах $C1$, $C2$ и резисторе $R2$. Таким образом на выходе фильтра получается гладкая функция перемещения в форме напряжения $U_{пр}$. Характер этой функции по аргументу количество циклов нагружения N будет аналогичен деформационной диаграмме Школьника [6, с. 62]. Рассматриваемая функция отражает процессы в материале образца материала. Восходящий участок функции отражает повышение предела упругости за счет явления наклепа. Нисходящему участку соответствует появление необратимых повреждений, т.е. зарождаются и растут микротрещины.

Исследователю важно знать, как изменяется состояние материала с увеличением количества циклов нагружения. Поскольку некоторому значению функции перемещения может соответствовать как восходящий, так и нисходящий участки, необходимо, как минимум, выявить экстремум функции $U_{пр}=f(N)$.

На рис. 3.18 изображена функциональная схема блока выявления экстремума характеристики перемещения активного захвата.

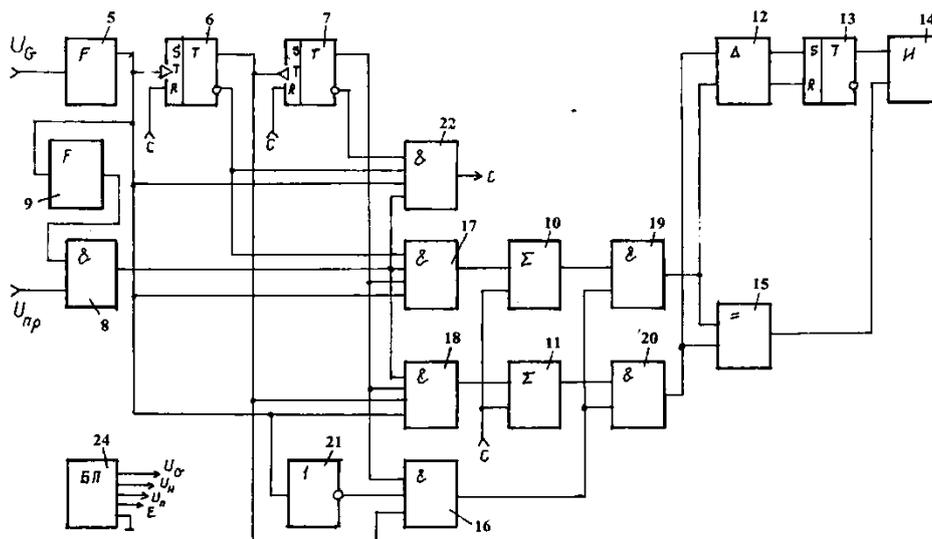


Рис. 3.18. Функциональная схема блока выявления экстремума характеристики перемещения активного захвата

Временную ось задает генератор G измерителя перемещения активного захвата. В цепь времени входят формирователь 5 сигнала генератора G и два последовательно соединенных счетных триггера 6,7.

Дискретизация функции перемещения $U_{пр}=f(N)$ осуществляется конъюнктом 8 с помощью формирователя длительности 9. На выходе конъюнктора 8 получаются прямоугольные импульсы постоянной длительности с амплитудой равной значению функции $U_{пр}=f(N)$ в данный момент времени. Временной шаг этих импульсов равен периоду сигнала генератора G .

Принцип выявления экстремума заключается в сравнении амплитуд двух соседних импульсов на выходе конъюнктора дискретизации 8. Возрастающему участку функции $U_{пр}=f(N)$ соответствует большая амплитуда последующего импульса по отношению к предыдущему. На спадающем участке – наоборот. Поскольку сравниваемые импульсы разнесены по времени, то в схеме предусмотрены два интегратора 10, 11. Выходные потенциалы интеграторов сравниваются амплитудным

селектором 12 (рис. 3.19), выходы которого управляют RS-триггером 13 экстремума.

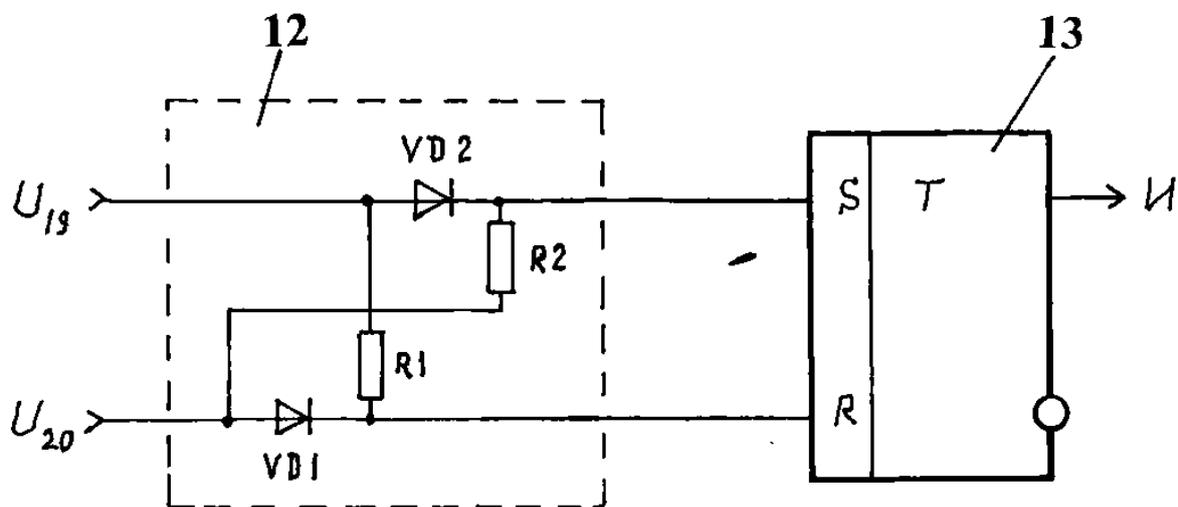


Рис. 3.19. Схема амплитудного селектора

Для отражения режима работы установки предусмотрен дисплейный индикатор. Индикатор имеет три временных канала (по принципу трехканального электронно-лучевого осциллографа):

- канал перемещения активного захвата;
- канал состояния триггера экстремума;
- канал устройства термообработки образца материала.

Сигнал перемещения активного захвата формирует устройство сравнения 15 как разностный потенциал интеграторов. Соответственно на индикаторе пользователь будет наблюдать разнополярные импульсы пропорциональные величинам перемещения активного захвата, причем на возрастающем участке функции $U_{пр}=f(N)$ импульсы положительные, а на спадающем – отрицательные. Длительность импульсов формирует конъюнктор считывания 16. Управление основными функциональными составляющими осуществляется цепью времени с

использованием входных 17, 18 и выходных 19, 20 конъюнкторов интеграторов. Для реализации логической функции работы конъюнктора считывания 16 предусмотрен инвертор 21. Один цикл измерения осуществляется за время единичного цикла измерения конъюнктор 22 формирует импульс сброса.

Канал состояния триггера 13 экстремума отражает потенциал единичного выхода. На восходящей ветви функции $U_{пр}=f(N)$ потенциал близок к нулю (совпадает с линией развертки). При достижении экстремума потенциал близок к уровню низковольтного электропитания E (питание микросхем).

Канал устройства термообработки образца материала отражает в форме меандра циклы его работы. Электропитание всех элементов установки обеспечивает блок питания 24.

Работает блок выявления экстремума характеристики перемещения активного захвата следующим образом – см. эпюры напряжений на выходах элементов схемы рис. 3.21. Исходное состояние всех триггеров блока устанавливается штатным образом фронтом электропитания при включении блока питания 24. Такт работы блока задает цель времени по высокочастотному (килоггерцы) сигналу U_G блока питания 24. Этот сигнал преобразуется формирователем 5 в прямоугольную форму U_5 . Фронтом импульса U_5 срабатывает счетный триггер 6, а срезов импульса последнего срабатывает счетный триггер 7.

Вторым входным сигналом блока является аналоговая функция перемещения $U_{пр}=f(N)$ со схемы рис. 3.17, которая поступает на вход конъюнктора 8. На второй вход конъюнктора 8 с формирователя 9 поступает прямоугольный импульс U_9 , сформированный фронтом импульса U_5 .

Таким образом, на выходе конъюнктора 8 появится прямоугольный импульс длительностью U_9 и амплитудой равной $U_{пр}$ в данный момент времени.

Далее в интервале единичного состояния триггера 7 цепи времени осуществляется сравнение амплитуд двух соседних импульсов U_8 : предыдущий импульс поступает на вход интегратора 10, а последующий – на вход интегратора 11. Интеграторы устроены однотипно по схеме рис. 3.20.

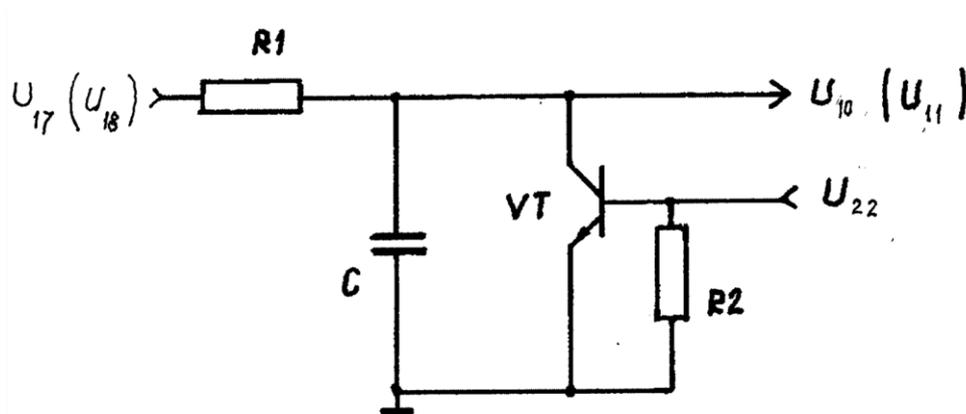


Рис. 3.20. Схема интегратора

Зарядный ток конденсатора C определяется параметрами RC -цепи и амплитудой входного импульса. Выходное напряжение интегратора U_{10} (U_{11}) пропорционально амплитуде входного импульса, поступающего с выхода конъюнктора 8. Разряд конденсатора C осуществляется через транзистор VT по сигналу сброса U_{22} . Выходные напряжения интеграторов поступают на входы устройства сравнения 15 и амплитудного селектора 12. Выход амплитудного селектора подключен к входам триггера экстремума 13. Распределение импульсов осуществляется конъюнкторами 17, 18, 19, 20, а логика их работы прослеживается по эюграмм напряжений рис. 3.21.

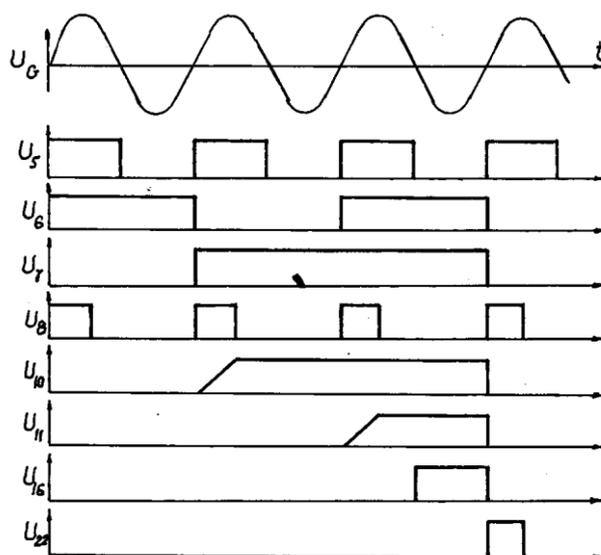


Рис. 3.21. Эпюры напряжений на выходах элементов функциональной схемы

Процедура сравнения выходных напряжений интеграторов проходит за время действия импульса U_{16} с выхода конъюнктора считывания 16.

Схема сравнения (рис. 3.22) представляет собой дифференциальный усилитель на транзисторах $VT1$, $VT2$ по схеме с общим эмиттером.

В исходном состоянии транзисторы находятся в режиме отсечки за счет резисторов $R1$, $R4$.

При поступлении входных сигналов U_{19} , U_{20} рабочая зона смещается в активную область транзисторов,

при этом напряжения на коллекторах будут пропорциональны входным сигналам. Разностный потенциал коллекторов поступает на индикатор 14.

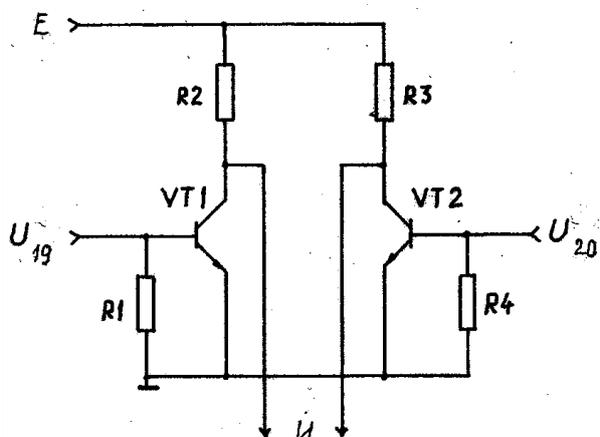


Рис. 3.22. Схема устройства сравнения

Работу амплитудного селектора 12 (рис. 3.24) удобно рассматривать совместно с триггером экстремума 13. Схема 12 представляет собой композицию двух диодных ограничителей: один построен на диоде VD1 и резисторе R1, другой – на диоде VD2 и резисторе R2. Принципы работы каждого ограничителя основан на характеристике диода – при положительном потенциале анода по отношению к катоду диод электропроводен. На возрастающем участке характеристики $U_{пр}=f(N)$ входные напряжения соотносятся как $U_{20}>U_{19}$, следовательно диод VD1 электропроводен и потенциал первого ограничителя поступает на вход сброса R RS-триггера 13. При достижении экстремума функции $U_{пр}=f(N)$ ситуация становится обратной и в этот момент на вход S триггера поступает импульс со второго ограничителя, соответственно триггер 13 переходит в единичное состояние.

Обратимся к устройству термообработки образца материала. В подшипниках 25 на основании 26 установки для испытания образцов материалов на усталость установлена поворотная платформа 27. Для реализации поворота предусмотрены электромагнит привода 28 и закрепленный на платформе поводок 29. Угол поворота платформы ограничен двумя электроконтактными упорами 30, 31, которые взаимодействуют с поводком 29. С целью упрощения конструкции упоров поводок выполнен из электроизоляционного материала, например, стеклопластика (либо его поверхность в зоне контакта с упорами имеет диэлектрическое покрытие). Обмотка 32 электромагнита 28 намотана на каркас 33. Якорь 34 электромагнита имеет цилиндрическую форму и размещает в отверстии каркаса с некоторым радиальным зазором. Под якорем установлена винтовая пружина 36, которая опирается на пластину 37, закрепленную винтами на каркасе 33.

Для стабилизации скорости движения якоря предусмотрен регулятор скорости (рис. 3.23).

На пластине 37 выполнено соосное с отверстием каркаса 33 сквозное отверстие 39. На плоскости пластины с помощью штифта 40 установлена поворотная заслонка 41. Дуговой паз 42 заслонки совместно с винтом 43 образуют фиксатор положения заслонки. Пластина 37 крепится к каркасу 33 электромагнита винтами 44.

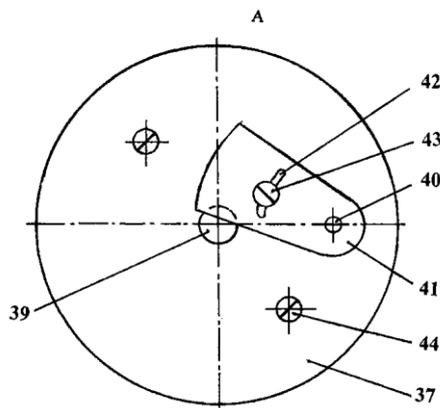


Рис. 3.23. Вид А по рис. 3.16

Принцип работы регулятора скорости основан на образовании силы вязкого трения, которое в отличие от постоянного (Кулонова) трения не образует зоны застоя в характеристике перемещения.

Сила вязкого трения равна

$$F_v = h\dot{x}, \quad (3.7)$$

где \dot{x} – линейная скорость движения якоря электромагнита;

$h = \rho S$ – коэффициент вязкого трения;

Здесь ρ – плотность воздуха;

S – эффективное сечение отверстия 39.

Из вышеперечисленных формул следует, что силу вязкого трения регулировать, изменяя эффективное сечение отверстия 39 путем поворота заслонки 41.

Оба электроконтактных упора выполнены однотипно – рис. 3.24, где условно изображено сечение поводка 29 поворотной платформы.

В электроизоляционном корпусе 45 упора закреплены два обычных для релейных устройств гибких контактных элемента 45, 46. Кон-

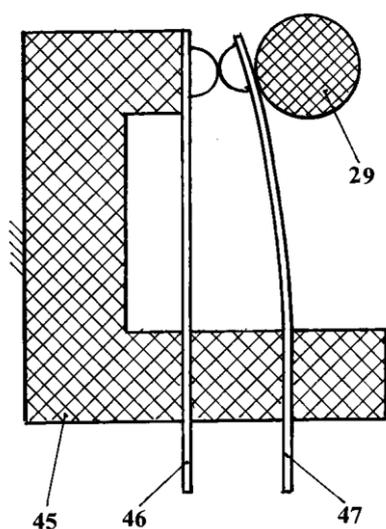


Рис. 3.24. Конструктивная схема упора поворотной платформы

тактные элементы установлены таким образом, что образуют нормально разомкнутый контакт. В цепь управления электромагнитом 28 кроме электроконтактных упоров 30, 31 входят RS-триггер 48 и силовой электронный ключ 49 см. рис. 3.25.

Кроме вышперечисленных элементов в рассматриваемое устройство входит лазер 50. Лазер закреплен на поворотной платформе 27 таким образом, что осевая линия его оптического луча пересекает осевую линию образца материала, а диаметр оптического луча меньше диаметра рабочей части образца материала. Вышеуказанное соотношение диаметров обеспечивает высокий коэффициент полезного действия теплового цикла, поскольку оптическое пятно луча лазера проходит только по поверхности рабочего участка образца и не нагревает окружающие элементы установки. В силу сравнительно короткого времени термообработки нагрев утолщенных концов образца в захватах будет ограничен.

В исходном положении под действием пружины 36 якоря поводок 29 находится на упоре 30 и его контакт S_0 замкнут, при этом оптический луч лазера 50 находится в начале рабочего участка образца материала. Соответственно при переключке поворотной платформы на второй упор 31 оптический луч проходит всю длину рабочего участка образца материала.

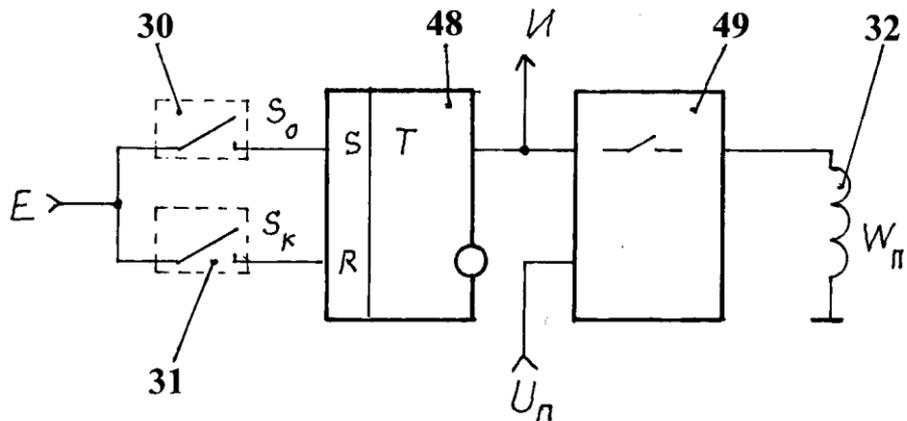


Рис. 3.25. Схема цепи привода платформы

Рассмотрим вариант температурного отпуска образца материала для устранения наклепа. Для реализации этого техпроцесса снимают нагрузку образца путем отключения электропитания U_H обмотки W_H электромагнита 4 в момент появления сигнала триггера экстремума 13 на индикаторе 14. Не останавливая вращения пассивного захвата 1 включают устройство термообработки. Поскольку в исходном положении замкнут контакт S_0 упора 30, то триггер 48 устанавливается в единичное состояние и включает электронный ключ 49, запитывающий обмотку 32 электромагнита 28. Якорь 34 через тягу 35 и поводок 29 поворачивает платформу 27 вместе с лазером 50 до упора 31. Достигнув упора 31 поводок 29 замыкает нормально разомкнутый контакт S_k , что приводит к опрокидыванию триггера 48, соответственно к обесточиванию катушки 32. После этого платформа 27 под действием пружины 36 будет возвращаться в исходное положение. При колебаниях платформы вместе с лазером луч последнего проходит путь рабочего участка образца материала, а поскольку при этом образец вращается, то нагрев осуществляется по всей поверхности. Температура нагрева определяется мощностью лазера и количеством циклов поворотной платформы. Заметим, что время на устранение начального наклепа

сравнительно невелико, т.к. глубина прогрева образца материала необходима на десятые доли миллиметра.

Предлагаемая установка позволяет выполнять другие виды термообработки, например, закалку. Известно, что некоторые материалы подвергаются закаливанию путем нагрева с последующим охлаждением на воздухе. Если заблокировать питание электромагнита 28, то термообработке будет подвергаться только начальный участок образца, где механические напряжения максимальны. Период цикла работы устройства термообработки определяется инерционностью элементов кинематики и жесткостью пружины 36 якоря

$$T_{ц} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}, \quad (3.8)$$

где m – приведенная к якорю 34 электромагнита 28 масса подвижных элементов кинематики;

D – жесткость пружины 36.

Пользуются установкой для испытания образцов материалов на усталость в соответствии с программой испытаний. Предлагаемая установка позволяет реализовать самые разные программы, в том числе испытание с заданной нагрузкой и испытания с заданной деформацией. Рассмотрим основу одного варианта программы испытаний образца материала на усталость.

Закрепляют образец материала в пассивном и активном захватах и включают установку. Задают необходимую частоту вращения пассивного захвата (как было отмечено выше приводом шпинделя, на котором закреплен пассивный захват). По тарифовочному графику установки регулятором напряжения U_H на блоке питания 24 величиной

тока обмотки W_H соленоидной катушки 4 устанавливают силу нагружения образца материала. Величину прогиба отсчитывают по масштабной сетке индикатора 14.

В процессе вращения нагруженного образца материала происходит смещение магнитопроводного стержня 3-а активного захвата. Смещение стержня изменяет индуктивность L_u обмотки W_u измерителя перемещения активного захвата, на выходе которого формируется функция перемещения $V_{пр}=f(N)$. Блок выявления экстремума характеристики перемещения формирует сигнал экстремума и отражает его на индикаторе.

Далее проводят температурный отпуск образца материала. Отключением питания U_H обмотки W_H снимают нагрузку образца материала и включают устройство термообработки. В соответствии с циклом работы триггера 48 оптический луч лазера 50 многократно перемещается по рабочему участку вращающегося образца материала обеспечивая нагрев до нужной температуры. Время нагрева зависит от исследуемого материала, вида термообработки и мощности лазера. Далее продолжают испытания в соответствии с программой испытаний.

3.5. Групповые испытания

Испытания на усталость весьма трудоёмки. Поэтому в ряде случаев целесообразно использовать одновременные испытания группы образцов. Характерным примером служит установка [12], которая обеспечивает одновременное испытание образцов по сложной программе: одних – на растяжение-сжатие, других – на знакопеременный изгиб и третьих – на знакопеременное кручение.

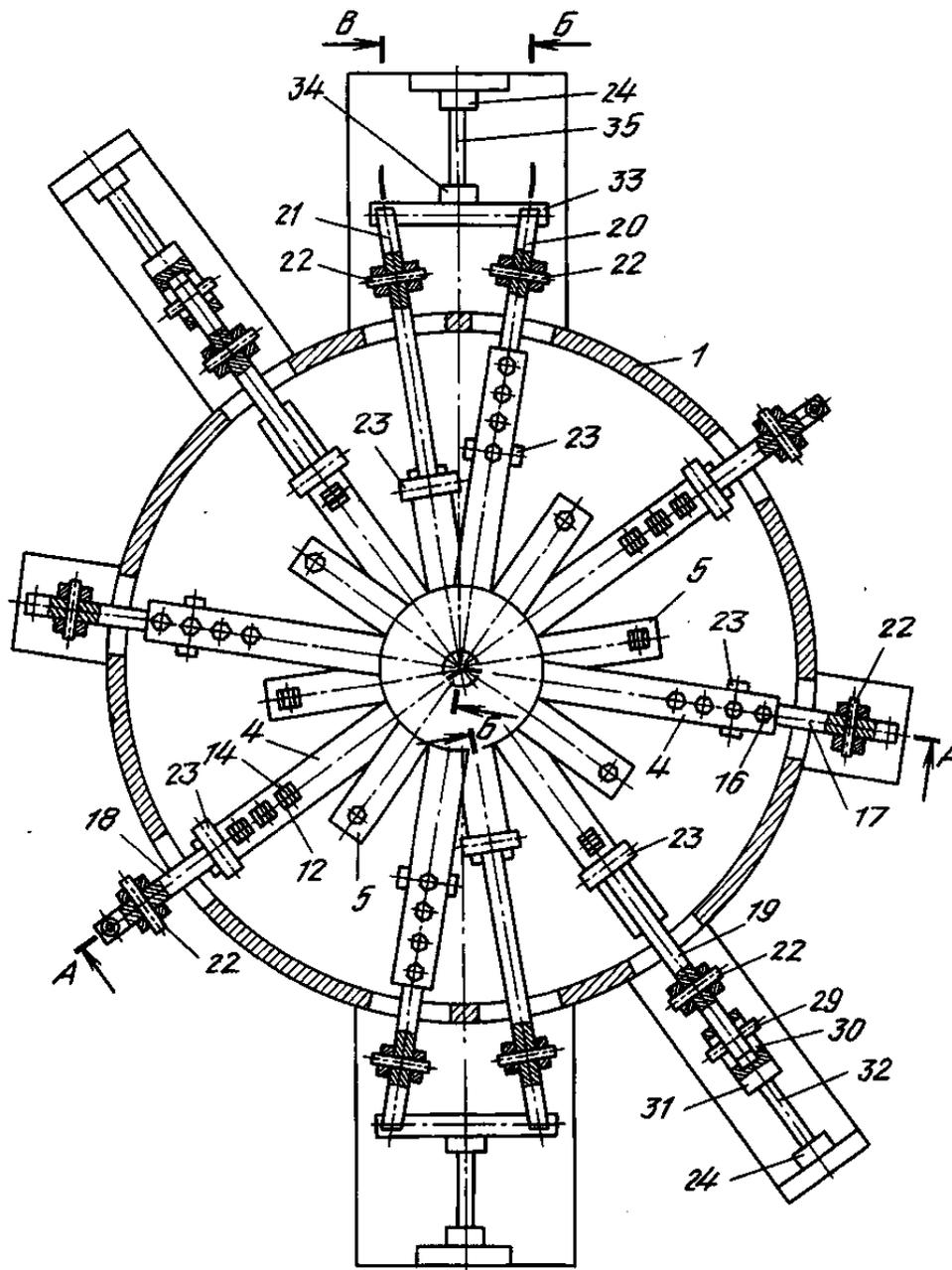


Рис. 3.26. Конструктивная схема установки

Установка содержит корпус 1, на котором установлен привод 2 и вал 3. На валу 3 жёстко укреплены расположенные в радиальном направлении верхние 4 и нижние 5 рамы при этом плоскости рам проходят через продольную ось вала 3. Рамы имеют перемычки в виде цилиндров 6. В отверстиях 7 установлены свободно толкатели 8, каждый из которых на одном конце имеет жёстко прикреплённый поршень 9 с

выступами 10, размещёнными в продольных пазах 11 цилиндров 6 и предназначенными для предотвращения самопроизвольного поворота толкателя вокруг своей оси.

На другом конце каждого толкателя жёстко укреплена каретка 12, на оси 13 которой установлен ролик 14. В каждом цилиндре 6 размещена силовая пружина 15, одним концом взаимодействующая с поршнем 9 толкателя 8, а другим – с винтом 16, размещённым в раме и служащим для создания и регулирования усилия в пружине. Рычаги первого рода 17-21 укреплены шарнирно с помощью осей 22 на корпусе 1 и имеют каждый на одном плече кулачок 23, предназначенный для взаимодействия противоположными сторонами с соответствующими роликами 14 кареток 12. Пассивные захваты 14 укреплены жёстко на корпусе 1.

Другие плечи рычагов 17 и 18 соединены с соответствующими активными захватами 25 и 26 образцов 27 и 28. Образцы 27 испытывают растяжение при взаимодействии кулачков 23 с верхними роликами 14 и сжатие – с нижними роликами 14, а образцы 28 – наоборот.

Другие плечи рычагов 19 соединены шарнирно с помощью осей 29, расположенных паза 30 активных захватов 31 образцов 32. Образцы 32 испытывают изгиб с изгибающим моментом одного знака при взаимодействии кулачков 23 с верхними роликами 14, а при взаимодействии с нижними роликами – изгиб с изгибающим моментом противоположного знака.

Другие плечи рычагов 20 и 21 соединены шарнирно с равными плечами рычагов первого рода 33, соединённых жёстко с активными захватами 34 образцов 35. Другие плечи рычагов 20 и 21 выполнены в виде вилок, в которых расположены шаровые опоры 36, взаимодей-

ствующие с противоположными сторонами соответствующих плеч рычагов 33. Образцы 35 испытывают кручение с крутящим моментом одного знака, если кулачки 23 рычагов 20, взаимодействуют с верхними роликами 14, а кулачки 23 рычагов 21 – с нижними роликами. При противоположном взаимодействии кулачков 23 с роликами 14 образцы 35 испытывают кручение с крутящим моментом противоположного знака.

Установка работает следующим образом.

Устанавливают образцы 27 в захваты 24 и 25, образцы 38 – в захваты 24 и 26 (рис. 3.27), образцы 32 – в захваты 24 и 31 (рис. 3.26) и образцы 35 – в захваты 24 и 34 (рис. 3.28 и 3.29).

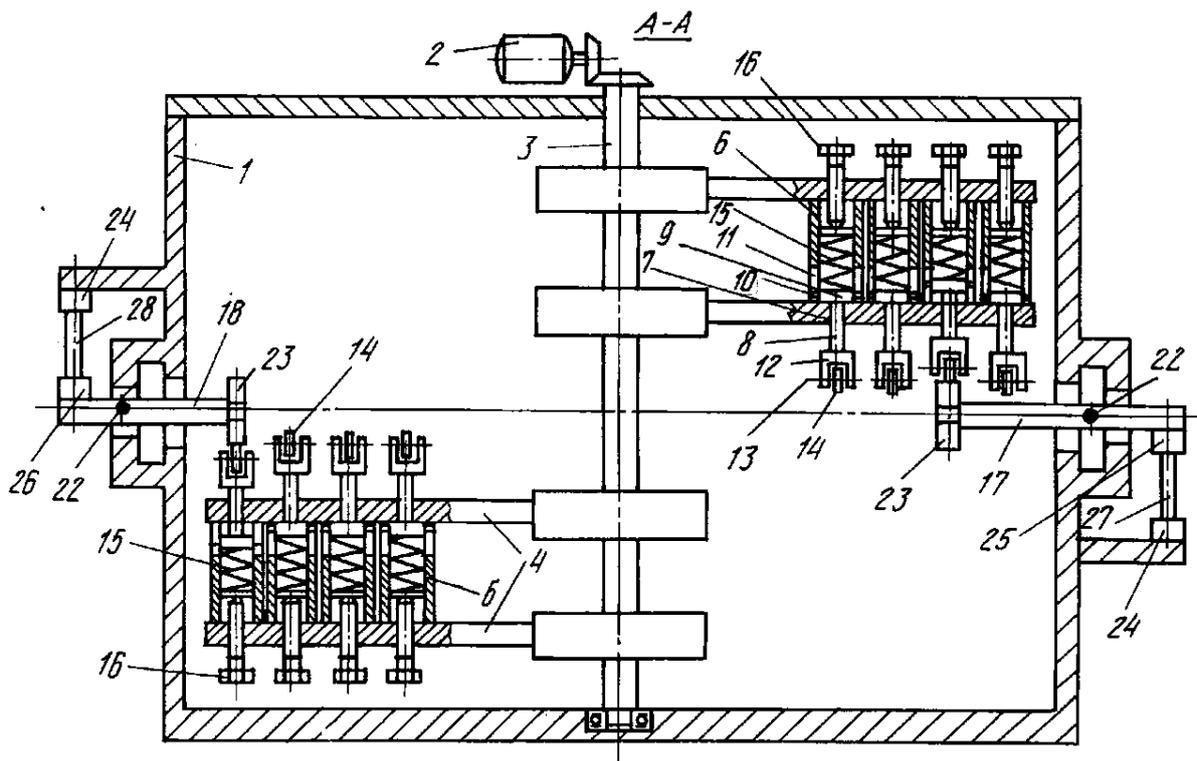


Рис. 3.27. Разрез А-А по рис. 3.26

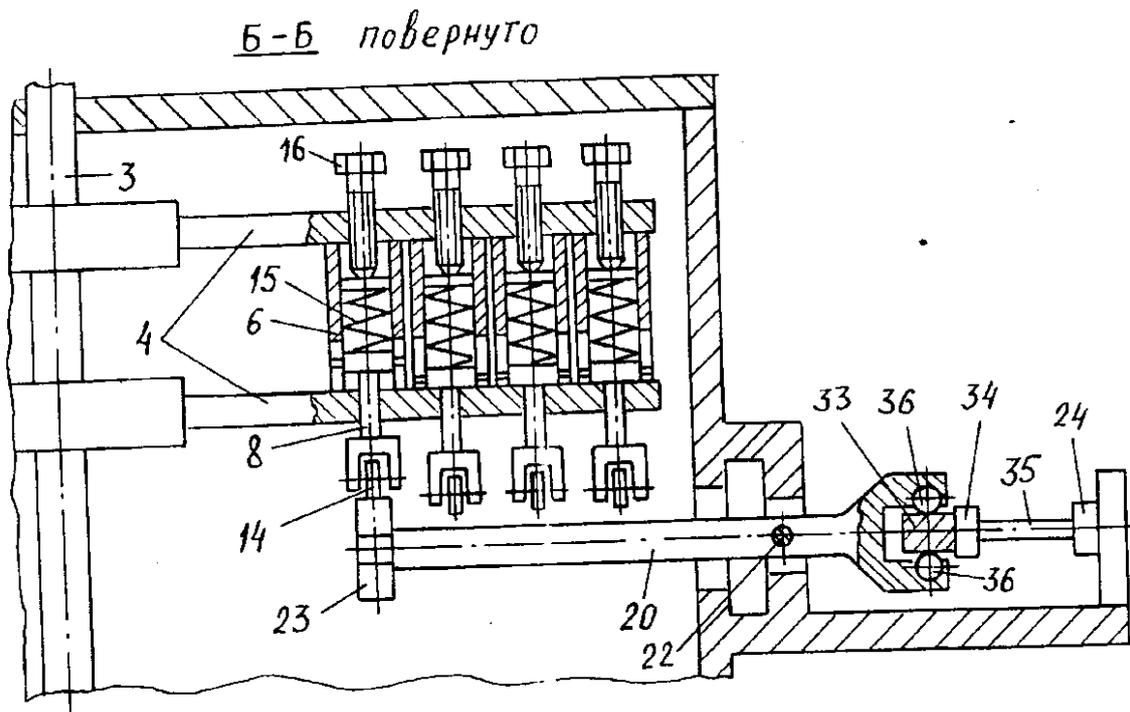


Рис. 3.28. Разрез Б-Б по рис. 3.26

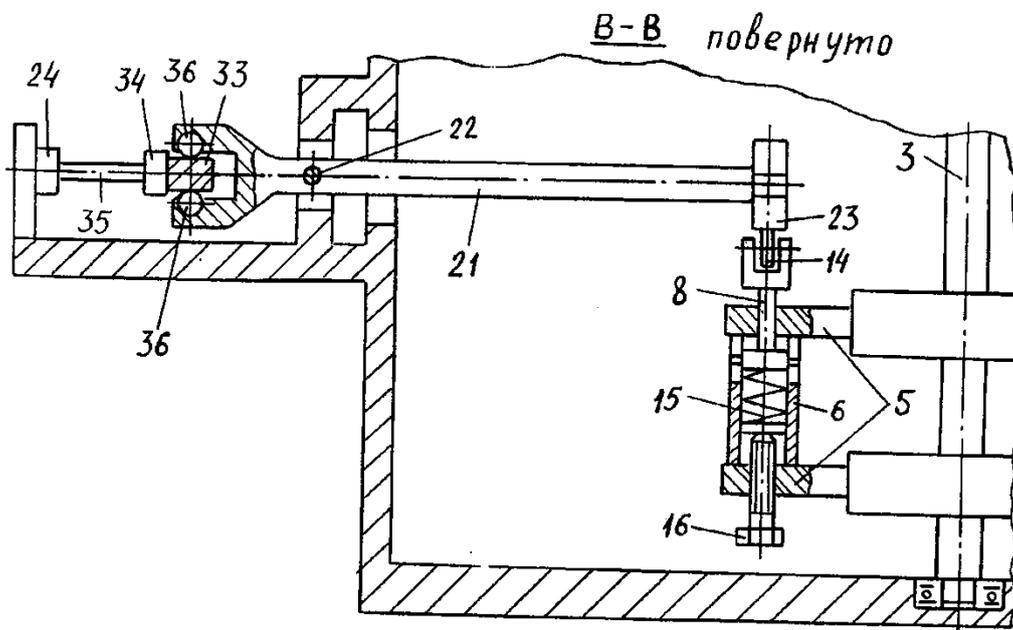


Рис. 3.29. Разрез В-В по рис. 3.26

Для испытания образцов 27,28, 32 и 35 при симметричном цикле вращением винтов 16 (рис. 3.27) создают в пружинах 15, усилия которых будут передаваться на рычаги 17, равные усилия, как в верхних пружинах, так и в нижних.

Аналогично создают в пружинах 15 усилия, передающиеся на рычаги 18-21. При этом усилия в пружинах 15, передающиеся на рычаги 17, свои, как и усилия, передающиеся на рычаги 18-21 в зависимости от вида нагружения образцов растяжение-сжатие, изгиб, кручение. Включают привод 2, который вращает вал 3 с закреплёнными на нём рамами. В моменты взаимодействия верхних роликов 14 с кулачками 23 рычагов 17 толкатели 8 перемещаются вверх, поршни 9 открываются от рам 4, после чего усилия пружин 15 передаются через рычаги 17 на образцы 27, которые подвергаются растяжению.

После выхода из взаимодействия верхних роликов 14 во взаимодействие с кулачками 23 рычагов 17 вступают ролики 14 нижних рам 4. При этом образцы 27 подвергаются сжатию. При взаимодействии роликов 14 верхних рам 4 с кулачками 23 рычагов 18 образцы 28 подвергаются сжатию, а при взаимодействии нижних роликов 14 – растяжению. При взаимодействии роликов 14 верхних рам 4, а затем роликов 14 нижних рам 4 с кулачками 23 рычагов 19 (рис. 3.26) образцы 32 подвергаются изгибу. При взаимодействии одновременно роликов 14 верхних рам 4 и роликов 14 нижних рам 5 с кулачками 23 соответственно рычагов 20 и 21 (рис. 3.28 и 3.29), а затем роликов 14 нижних рам 4 и роликов 14 верхних рам 5 – с кулачками 23 тех же рычагов образцы 35 подвергаются кручению.

Для испытания образцов при ассиметричном цикле вращения винтов 16 создают в верхних пружинах 15 одинаковые усилия, но отличные от усилий в нижних пружинах. При этом в зависимости от вида

нагрузки образцов усилия в пружинах 15, расположенных на равных расстояниях от оси вала, устанавливают свои и включают привод 2.

При выключении из работы всех толкателей нижних рам 4 и верхних рам 5 образцы испытывают при нулевом цикле.

При каждом режиме испытания определяют предел выносливости материала образцов. Затем создают вращением винтов 16 в каждой верхней и нижней пружинах разные усилия, соответствующие указанным уже режимам испытания и видам нагружения образцов. При каждом включении привода 2 образцы будут испытывать одинаковыми циклами, состоящими из нескольких различных пиков по числу верхних или нижних рам. Различным поджатием пружин 16 исследуют влияние пиков на предел выносливости материала образцов одновременно при различных видах нагружения образцов (растяжение-сжатие, изгиб, кручение).

3.6. Испытания нестандартных образцов

Как отмечалось выше, для проведения значительного количества видов испытаний образцы материалов стандартизованы по форме и размерам. Такой подход позволяет формализовать сравнительный анализ свойств различных материалов. В то же время, существует общее требование к методике проведения испытаний – испытания должны проводиться в условиях максимально приближающихся к эксплуатационным по спектру нагружения, среде, температурным условиям и т.д. Отмеченные требования относятся к форме и размерам образцов материалам [6, с.7].

В реальных изделиях применяют детали, форма которых существенно отличается от общепринятых форм образцов материала, например детали с большим отношением длина – приведенный размер

сечения – растяжки, подвесы. Указанное отношение размеров может достигать 100. Растяжки (круглого или прямоугольного сечения) работают при больших углах закручивания – свыше 180° .

Рассмотрим конструкцию установки для испытания длинных образцов материалов. Установка состоит из двух блоков – блока режима испытаний и электронного блока, которые соединены электрическим кабелем.

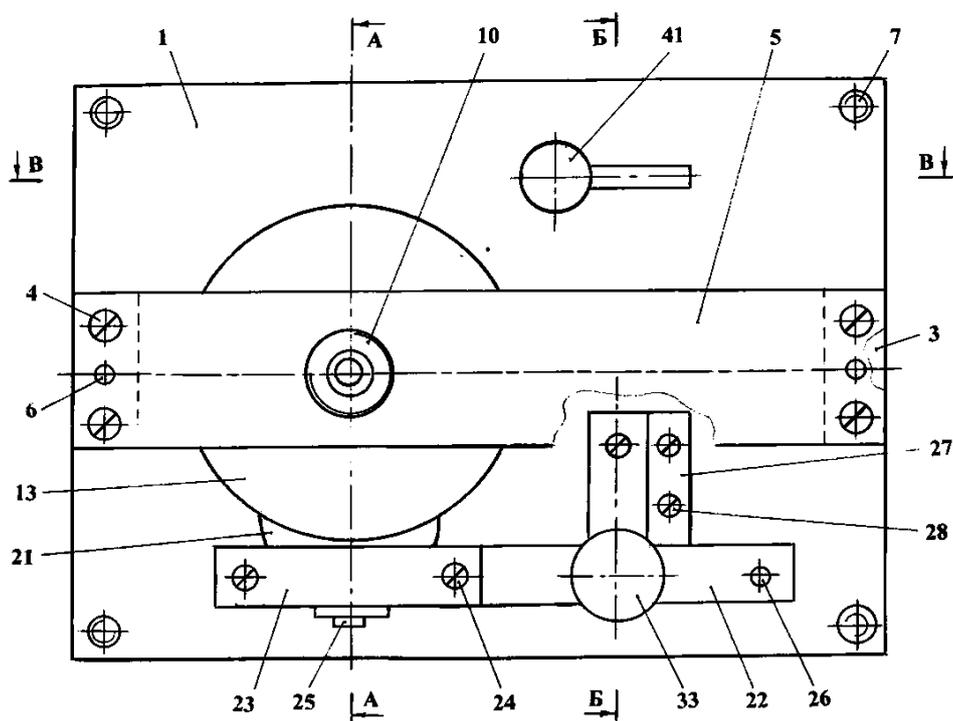


Рис. 3.30. Установка для испытаний длинных образцов – вид сверху

Все элементы блока режима испытаний смонтированы на основании (корпусе). Несущим является нижняя пластина 1, в пазах её противоположных сторон неподвижно (например, сваркой) закреплены две вертикальные стойки 2,3. Сверху на стойках с применением крепёжных винтов 4 установлена перемычка 5. Для сохранения однозначного положения перемычки в процессе эксплуатации предусмотрены базисные штифты 6. На нижней пластине предусмотрены опорные ножки 7.

Испытываемый образец материала 8 закрепляется в типовых цанговых зажимах 9,10 с зажимными гайками 11,12. На представленных чертежах изображён вариант образца материала круглого сечения. В случае образца с прямоугольным сечением применяют соответствующий цанговый зажим. Верхний цанговый зажим своим резьбовым хвостовиком снизу закреплён на перемычке 5, а нижний цанговый зажим – сверху на магнитопроводном инерционном элементе 13. Исходя из функции этого элемента, воспользуемся терминологией теории автоколебаний.

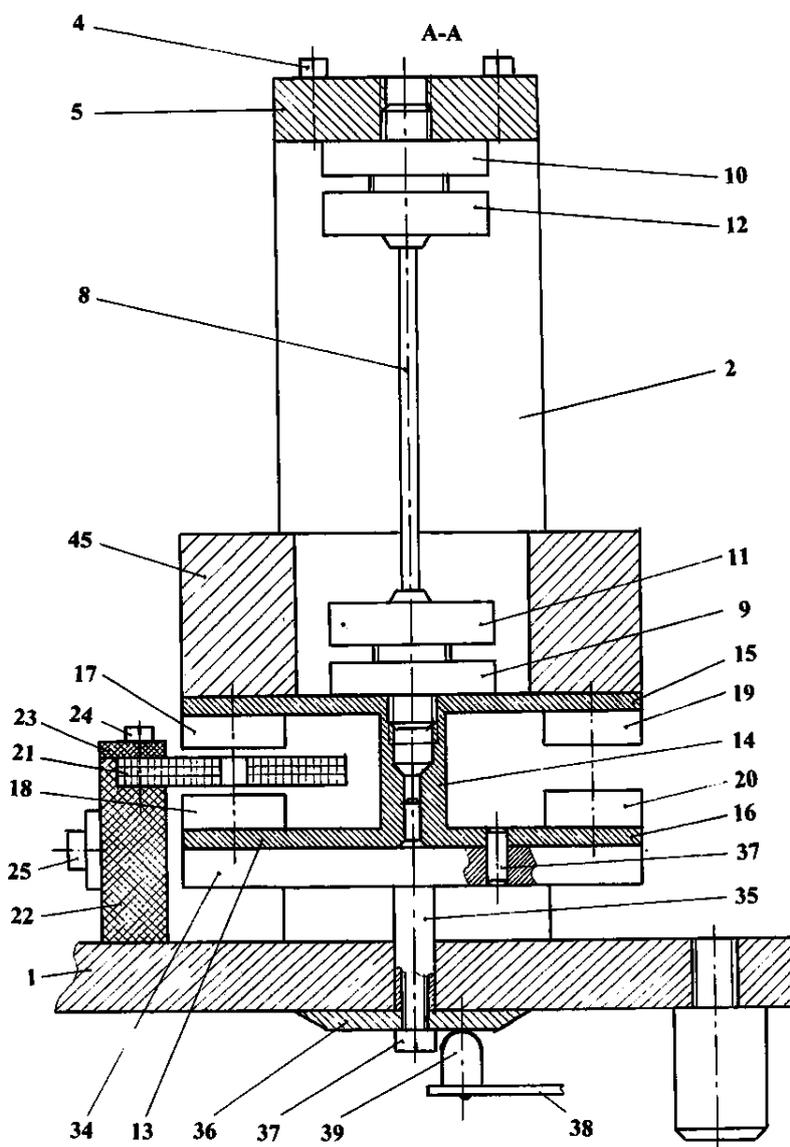


Рис. 3.31. Разрез А-А по рис. 3.30

На рис. 3.31 изображён баланс на основе единой детали. Из технологических соображений иногда изготавливают баланс составным. В этом случае различают – втулка баланса 14 и крылья 15,16. Будем иметь в виду эти термины. С внутренней стороны на крыльях баланса с помощью клея закреплены два постоянных магнита 17,18 осевой намагниченности. Приведение центра масс на ось вращения реализовано за счёт противовесов 19,20. Магнитный поток замыкается по цепи: постоянные магниты – крылья втулка.

В магнитном зазоре размещена плоская бескаркасная бифилярная (намотанная в два провода) электрическая катушка 21. Одну секцию электрической катушки назовём катушка освобождения W_0 , другую – катушка привода W_u . Электрическая катушка закреплена в точке поворотного кронштейна 22 посредством планки 23 и винтов 24. Поворотный кронштейн и планка выполнены из электроизоляционного материала. На поворотном кронштейне закреплён электрический разъём 25. Центром вращения поворотного кронштейна является запрессованный в нижней пластине основания штифт 26. Фиксация поворотного кронштейна в рабочем положении осуществляется за счёт упора 27, имеющего стопор. Упор закреплён винтами 28 на нижней планке 1.

Стопор выполнен на основе плоской пружины 29. Один конец плоской пружины посредством винта 30, тарельчатой пружины 31 и шайбы 32 установлен на упоре, а на другом конце плоской пружины методом развальцовки закреплена ручка 33. Нижний конец ручки стопора имеет цилиндрический хвостовик, который в рабочем положении входит в отверстие поворотного кронштейна.

Для удобства монтажных операций предусмотрена технологическая оправка. Корпус технологической оправки имеет дисковую часть

34 и хвостовик квадратного сечения 35, который входит в квадратное отверстие нижней пластины 1. Ограничителем перемещения служит шайба 36, которая винтом 37 закреплена на хвостовике. На дисковой части запрессованы два штифта 37, которые входят в соответствующие отверстия нижнего крыла баланса. На рис. 3.31 показан один штифт в положении развёрнуто на 90° . По осевой линии диска выполнен базирующий цилиндрический наконечник, имеющий на подошве фаску, которая соответствует фаске баланса.

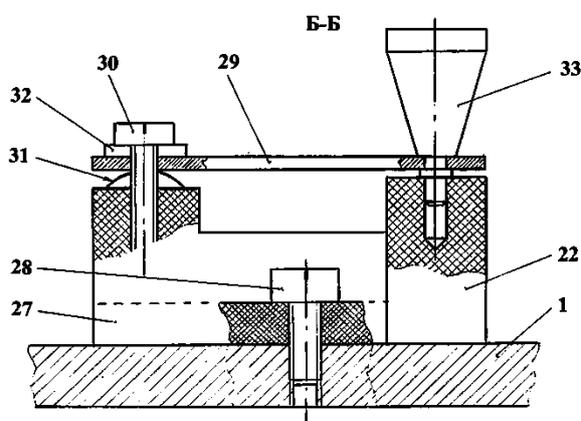


Рис. 3.32. Разрез Б-Б по рис. 3.30

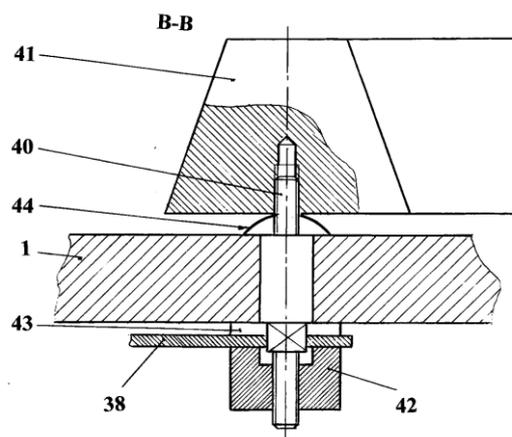


Рис. 3.33. Разрез В-В по рис. 3.30

На этапе монтажа образца материала технологическая оправка удерживается в верхнем положении держателем. Держатель выполнен на основе плоской пружины 38, которая на консольном конце содержит наконечник 39 для взаимодействия с шайбой технологической оправки. Второй конец пружины держателя закреплён на валу 40 ручки поворота 41. В этом сопряжении участок квадратного сечения вала входит в квадратное отверстие пружины, затем закручивается специальная гайка 42. Между пружиной и нижней пластиной 1 размещена шайба 43. Необходимый момент трения в этом узле реализуется тарельчатой пружиной 44, размещённой между ручкой и нижней пласти-

ной. При повороте ручки держателя из монтажного положения в рабочее наконечник 39 смещается с шайбы 36 и технологическая оправка опускается до совмещения её дисковой части с нижней пластиной. В этом положении штифты 37 выходят из отверстий крыла баланса и баланс освобождается. Но цилиндрическая часть базирующего наконечника диска технологической оправки остаётся в зазоре отверстия втулки баланса.

В процессе испытаний в материале образца материала развиваются дефекты и изгибная жёсткость образца изменяется, что может привести к нежелательным изгибным деформациям образца, т.е. может проявиться так называемый маятниковый эффект. Отмеченное выше положение элементов установки блокирует этот эффект – поперечное смещение баланса возможно лишь в пределах зазора между цилиндрической частью базирующего наконечника диска технологической оправки и отверстия втулки баланса. Возможные касания являются точечными и практически не влияют на энергетику крутильных колебаний. Заметим, что маятниковый эффект снижается при увеличении массы баланса совместно с массой дополнительного груза 45, который выполнен в форме кольца из намагниченного материала и удерживается на верхнем крыле баланса за счёт действия магнитных сил.

Таким образом, нормальная составляющая напряжений в образце материала задаётся силой тяжести суммарной массы баланса и дополнительного груза. Диапазон изменения растягивающей силы задаётся комплектом сменных дополнительных грузов 45. Касательную составляющую напряжения в образце задаёт электронный блок за счёт реализации необходимой амплитуды крутильных колебаний баланса.

Электронный блок содержит:

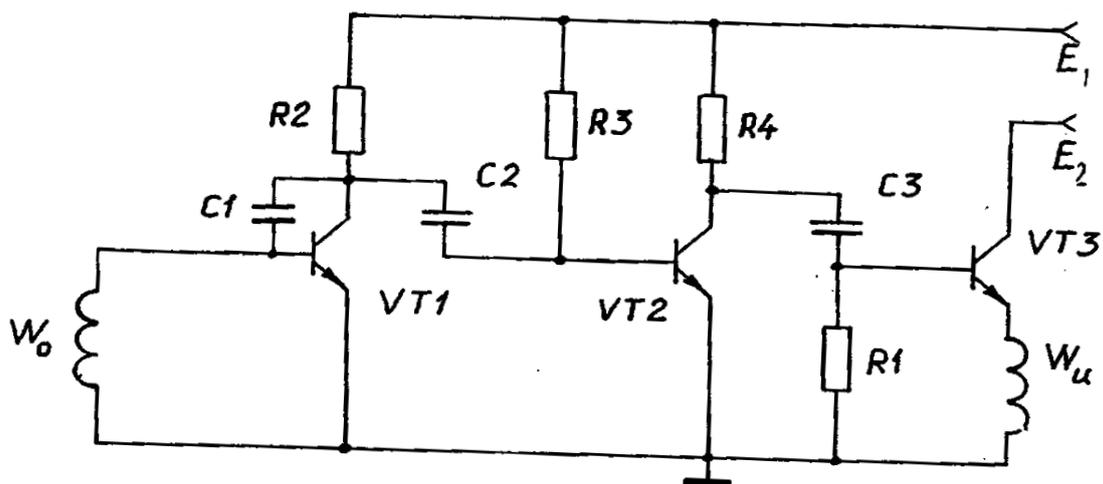
1. Схему формирования импульсов привода (СФИП).
2. Каналы измерения первичных параметров режима испытаний:
 - канал частоты колебаний f ;
 - канал амплитуды колебаний Φ .
3. Счётчик числа циклов нагружения N .
4. Индикатор для отражения вышепоименованных величин со входным переключателем.

5. Блок вторичного электропитания с тумблером включения и индикатором состояния. Блок питания создаёт два постоянных напряжения:

E_1 – фиксированный уровень для питания функциональных элементов;

E_2 – регулируемый уровень для питания выходного каскада СФИП.

Схема формирования импульсов привода (рис. 3.34) предназначена для обеспечения заданной стационарной амплитуды автоколебаний (соответственно максимального значения касательного напряжения в цикле). Схема представляет собой трёхкаскадный усилитель переменного тока. Конденсатор C_1 предназначен для сбоя высокочастотной паразитной генерации. Выходной каскад на транзисторе VT3 представляет собой эмиттерный повторитель, который обеспечивает необходимый уровень импульсного тока в катушке привода W_u . СФИП обеспечивает мягкий режим возбуждения автоколебаний.



3.34. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

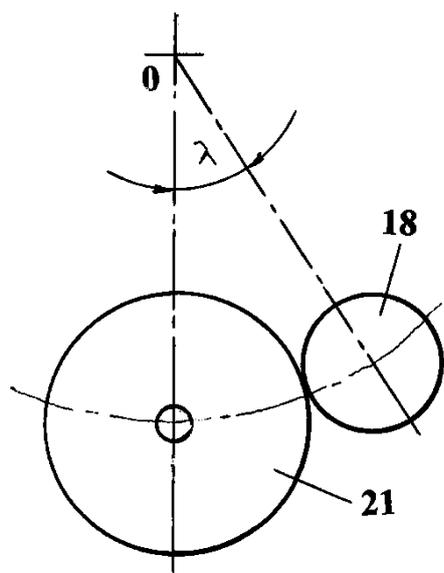


Рис. 3.35. Расчетная схема

На рис. 3.35 изображено касательное положение электрической катушки и магнитного зазора. При движении баланса поле зазора будет пересекать витки катушки, и в катушке будет индуцироваться ЭДС e . Направление ЭДС определяется направлениями скорости, вектора индукции поля и витка катушки. Подключим катушку так, что в пределах угла λ ЭДС положительна (соответственно, на второй половине катушка ($-\lambda$) ЭДС будет отрицательна). Положительная полуволна ЭДС

будет усилена и обеспечит импульс тока в катушке привода. Амплитуда этого импульса определится уровнем питания E_2 . Энергия импульса в катушке W_u компенсирует потери энергии баланса при колебаниях, и установится стационарный режим с постоянной амплитудой колебаний Φ .

Канал частоты электронного блока отражает на индикаторе значение в единицах частоты – Гц.

Канал амплитуды отражает на индикаторе значение амплитуды e_{\max} ЭДС электрической катушки в единицах напряжения – В. Схематически канал представляет собой пиковый детектор.

В соответствии с теорией автоколебаний амплитуда e_{\max} ЭДС пропорциональна частоте f и амплитуде Φ колебаний. Но частота f зависит от массы (точнее момента инерции) дополнительного груза 45. Поэтому документация на испытательную установку комплектуется двухвходовой таблицей, в которой учтены первичные конструктивные параметры установки – величина магнитной индукции в зазоре, число витков электрической катушки, расстояние от оси вращения баланса до осевой линии катушки и т.п. Выходным параметром таблицы является амплитуда колебаний баланса Φ в угловых единицах – рад. Таблица составлена для всех возможных амплитуд (с допустимым шагом) от $\Phi_{\min} = \lambda$ до $\Phi_{\max} = 2\pi - \lambda$. Этому диапазону амплитуд соответствует диапазон максимальных углов закручивания образца материала.

Установка для испытаний длинных образцов материалов работает следующим образом. Разработчик программы испытаний задаёт требуемые значения нормального напряжения σ при растяжении и выбирает дополнительный груз 45. По заданному значению максимального касательного напряжения τ определяет угол закручивания образца, т.е. амплитуду колебаний Φ .

До монтажа образца материала выполняют предварительные операции. Ручкой 33 стопора освобождают и поворачивают в сторону от зоны монтажа (или снимают со штифта 26) поворотный кронштейн 22, обеспечивая сохранность бескаркасной катушки 21. Поднимают и поворотом ручки 41 держателя фиксируют технологическую оправку. Устанавливают баланс 13 на технологическую оправку, базируя по

фаске подошвы базирующего наконечника дисковой части 34 и штифтами 37.

Закрепляют образец 8 материала. Для этого снимают со стоек 2,3 перемычку 5. Затем с помощью гайки 11 закрепляют нижний конец образца в цанговом зажиме 9. Далее устанавливают на баланс дополнительный груз 45. После этого возвращают перемычку в рабочее положение и гайкой 12 закрепляют верхний конец образца в цанговом зажиме 10. Поворотом ручки 41 освобождают технологическую оправку и она опускается до упора в нижнюю плиту 1. Возвращают поворотный кронштейн 22 в рабочее положение и фиксируют его, пользуясь ручкой 33 стопора. Установка готова к проведению эксперимента.

Для задания режима колебаний проводят предварительный эксперимент по выявлению собственной частоты колебаний f . Это можно выполнять по-разному. Например, вручную отклоняют баланс, обеспечивая свободные затухающие колебания, и измеряют частоту f . По прилагаемой таблице находят требуемую амплитуду колебаний $\Phi_{\text{расч}}$.

Ручку регулирования напряжения E_2 на блоке питания устанавливают в положение min . Включают электропитание. Начинаются автоколебания на некоторой малой амплитуде Φ_{min} . Регулируя напряжение E_2 , доводят амплитуду колебаний баланса до расчётного значения $\Phi_{\text{расч}}$. Эксперимент продолжают в соответствии с принятой программой испытаний.

Таким образом, установка для испытаний длинных образцов материалов конструктивно проста и высокотехнологична. Установка позволяет проводить испытания на кручение с заданной растягивающей силой. Предусмотрено регулирование в широких диапазонах угла закручивания и растягивающей силы. Установка не предполагает высокую квалификацию оператора. Электронный блок выполнен на типовых элементах электроники.

Глава 4

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

При проектировании нового изделия конструктор выбирает материал конкретных деталей по цифровым параметрам - модули E, G, твердость, предел текучести, фрикционные свойства и т.п. Для некоторых классов материалов можно выделить обобщенные свойства. Так в случае многих сталей процесс усталости тесно связан с пластической деформацией. Сдвиги по плоскостям скольжения приводят к наклепу металла. Однако, наряду с упрочнением при циклической нагрузке, развиваются процессы разупрочняющие материал. Это явление наглядно отражено в виде деформационной диаграммы [6, рис. 24].

Обратимся к примеру практического использования деформационной диаграммы.

4.1. Оценка ресурса деталей

Надежность и долговечность машин и механизмов зависит от текущего состояния деталей. Пользователь на основе оценки текущего состояния деталей принимает решение о профилактическом обслуживании или замене деталей. Эти процедуры требуют значительных экономических затрат, в частности деталь может иметь высокую себестоимость. Возьмем пример из авиационной техники. Одной из самых дорогих деталей является лопатка газовой турбины двигателя самолета, она выполнена из дорогостоящего сплава, имеет сложную форму и предполагает непростую технологию изготовления. Из соображений безопасности нельзя допустить разрушения лопатки в полете. Поэтому

к эксплуатации допускаются изделия выработавшие только часть возможного ресурса.

Установка [20] позволяет прогнозировать поведение детали в процессе эксплуатации применительно к деталям массового производства. Сущность работы установки заключается в следующем: из партии изготовленных деталей берут выборку и по ней строят деформационную диаграмму. Взятую из механизма деталь кратковременно испытывают, при этом происходит сравнение результата с деформационной диаграммой за счет чего оценивается остаточный ресурс детали.

В минимальной комплектации установка для усталостных испытаний деталей на остаточный ресурс содержит основание 1, на котором

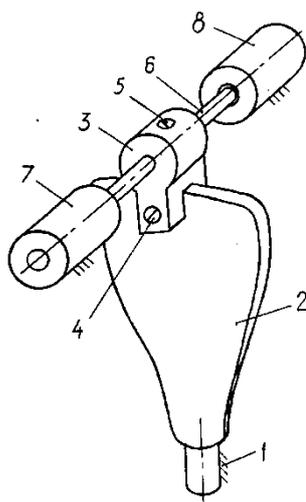


Рис. 4.1. Конструктивная схема устройства нагружения (источник тока и счетчик ресурса условно не показаны)

закреплена испытываемая деталь 2. Крепление детали в установке осуществляется с помощью пассивного захвата также, как крепление этой детали в реальном устройстве. На рис. 4.1 в качестве примера изображена лопатка турбины. В месте приложения внешней силы (точнее равнодействующей внешних сил) на испытываемой детали закреплен активный захват 3. В качестве элемента крепления активного захвата на схеме рис. 4.1 показан винт 4. На активном захвате винтом 5 закреплен стержень 6 из магнитомягкого материала. С кольцевым зазором по отношению к магнитопроводному стержню 6 на основании установки закреплена соленоидная катушка привода 7. Магнитопроводный стержень и соленоидная катушка привода расположены на одной осевой линии,

совпадающей с направлением деформации испытуемой детали в точке закрепления активного захвата. К соленоидной катушке подключены источник тока и счетчик ресурса детали. Эти два последних элемента на рис. 4.1 не показаны из соображений наглядности конструктивной схемы.

Работа установки для усталостных испытаний деталей на остаточный ресурс в описанной выше минимальной комплектации заключается в следующем. Переменная составляющая тока источника обеспечивает циклическое нагружение детали. Счетчик ресурса выявляет остаточный ресурс детали. Источник тока может иметь постоянную составляющую тока, в этом случае циклическое нагружение будет происходить относительно некоторой постоянной составляющей деформации детали.

В приведенном на рис. 4.1 примере испытуемая деталь испытывает либо чистый изгиб, либо в случае смещенного от линии симметрии детали закрепления активного захвата – изгиб с кручением.

Испытанию на этой установке могут подвергаться

любые детали, для которых внешние силы, действующие в реальном устройстве, могут быть сведены к равнодействующей силе. Переход на испытуемую деталь другой формы изменит лишь конструкцию пассивного и активного захватов.

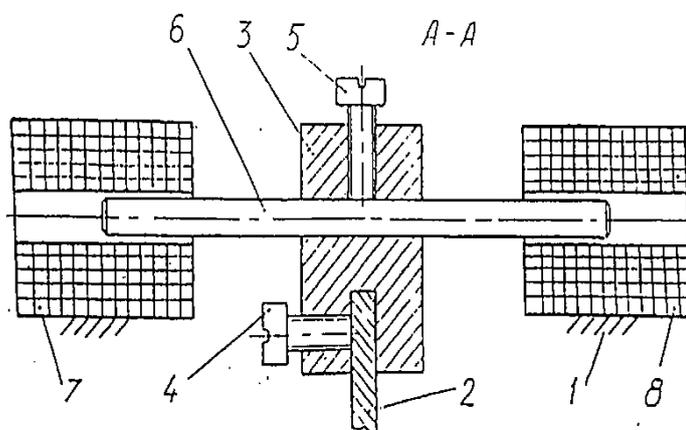


Рис. 4.2. Разрез А-А по рис. 4.1

Во многих реальных устройствах детали подвергаются циклической нагрузке на собственной частоте. В рассматриваемом примере лопатка турбины испытывает деформацию под действием потока газа, который турбулентен, следовательно из широкого спектра частот возмущения она будет «вырезать» собственную частоту. Для обеспечения испытаний на этом режиме возможна расширенная комплектация предлагаемой установки для усталостных испытаний деталей на остаточный ресурс. Установка снабжена второй соленоидной катушкой – катушкой освобождения 8. Эта вторая катушка установлена на основании установки и ориентирована по отношению к магнитопроводному

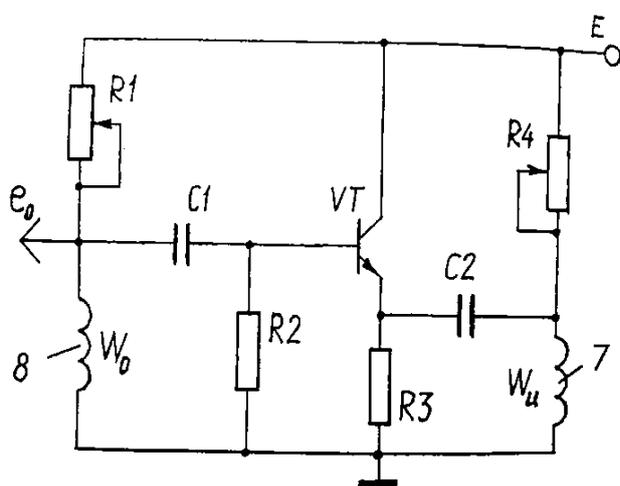


Рис. 4.3. Электрическая принципиальная схема электронного ключа

стержню 6 аналогично катушке 7 привода, но относительно другого конца магнитопроводного стержня 6, при этом она соединена с источником тока и через электронный ключ – с катушкой привода 7. Электронная принципиальная схема одного из вариантов электронного ключа приве-

дена на рис. 4.3. Электронный ключ построен на транзисторе VT по схеме с общим коллектором. В схему входят два переменных (или постоянных подбираемых при настройке) резистора R1 и R4, два постоянных резистора – базовый R2 и эмиттерный R3. Для развязки токов транзистора VT по постоянной составляющей имеются конденсаторы C1, C2. Катушки привода 7 (W_u) и освобождения 8 (W_0) в соответствии с приведенной схемой по постоянной составляющей тока подключены

через резисторы R4 и R1 к источнику E, а по переменной составляющей – соответственно через конденсаторы C2 и C1 к эмиттеру и базе транзистора VT. Выходной сигнал e_0 электронного ключа поступает, как и в варианте минимальной комплектации, на вход счетчика ресурса.

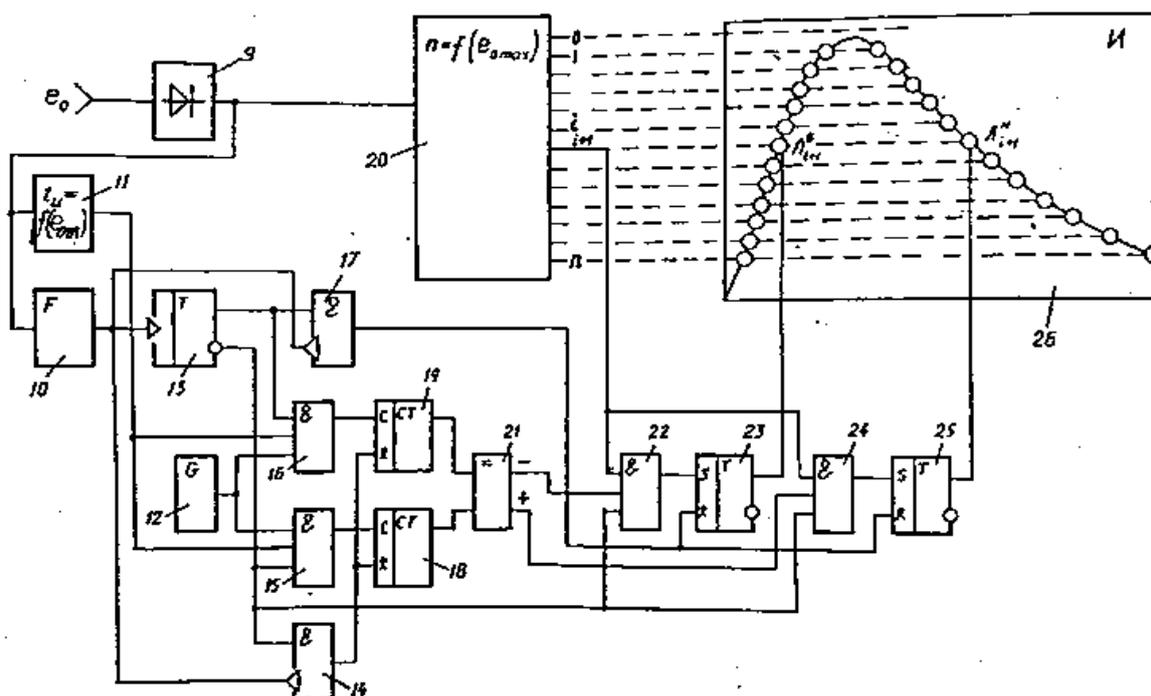


Рис. 4.4. Функциональная схема счетчиков ресурса

Работает установка для усталостных испытаний деталей на остаточный ресурс при этой комплектации следующим образом. Резисторами R1 и R4 задают начальные токи в катушках освобождения 8 и привода 7. При этом начальный ток в катушке освобождения W_0 требуется очень малым, поскольку мощность потребления сигнала e_0 мала, а начальный ток в катушке привода W_u выбирается по величине постоянной составляющей прикладываемой к активному захвату силы. Если

постоянной составляющей силы не требуется, то сопротивление резистора R4 устанавливают большим, тогда постоянным током по отношению к току импульса можно пренебречь.

При включении питания источника E фронт напряжения обеспечивает импульсы тока в катушках. В силу неравенства токов в катушках W_0 и W_u взаимодействие магнитных полей катушек 7,8 с магнитопроводным стержнем 6 через активный захват 3 создаст импульс силы, которая подтолкнет испытуемую деталь. После окончания фронта питания деталь окажется свободной и начнет совершать колебания на собственной частоте. При колебаниях в катушках 7,8 будут индуцироваться электродвижущие силы (ЭДС), соответственно $e_0 = f(t)$ в катушке освобождения W_0 и $e_u = f(t)$ в катушке привода W_u . Эти ЭДС будут иметь синусоидальную форму. ЭДС e_0 в катушке освобождения W_0 положительной полуволной (для изображенного транзистора проводимости n-p-n) откроет транзистор VT, который обеспечит импульс тока через катушку привода W_u . Взаимодействие поля катушки привода 7 с магнитопроводным стержнем 6 создает подталкивающую силу, которая обеспечит увеличение амплитуды колебаний. Далее система перейдет в стационарный режим колебаний, в котором подводимая энергия сравняется с рассеиваемой. Фазировка импульсов e_0 и e_u осуществляется соблюдением подключения концов катушек. На этапе прохождения импульса тока в катушке привода W_u в ее цепи действуют два источника: E и e_u . ЭДС e_u создаст небольшой провал вершины импульса, но в целом импульс тока будет близок к прямоугольному. Поскольку переход база – эмиттера транзистора является диодом, то импульс привода в катушке W_u будет только за время положительной полуволны ЭДС в катушке освобождения W_0 . При смене транзистора на p-n-p

проводимость все останется аналогичным, но следует изменить полярность подключения источника питания E , при этом импульс тока в катушке W_u будет проходить за время отрицательной полуволны ЭДС e_0 . Транзистор работает в режиме ключа, поэтому энергия импульса не зависит от величины деформации детали. Напротив, наводимая ЭДС пропорциональна амплитуде колебаний. Таким образом, ЭДС e_0 будет отражать текущее значение цикловой деформации детали. Этот факт положен в основу работы счетчика ресурса.

Счетчик циклов содержит следующие штатные элементы:

- однополупериодный выпрямитель 9;
- формирователь прямоугольник импульсов 10;
- преобразователь амплитуда-длительность - $t_u = f(e_{o_{max}})$ 11;
- генератор опорной частоты 12;
- счетный триггер 13;
- конъюнктор сброса счетчиков 14;
- два конъюнктора счетчиков 15, 16;
- конъюнктор сброса выходных триггеров 17;
- два счетчика импульсов 18, 19;
- компаратор с n уровневый импульсным выходом - $n = f(e_{o_{max}})$ -20;
- схема сравнения 21;
- $2n$ выходных конъюнктора 22, 24;
- $2n$ выходных триггера 23, 25 (RS – триггеры);
- индикатор 26.

Поясним устройство некоторых функциональных элементов счетчика ресурса. Принцип работы преобразователя амплитуда-длительность 11 показан на рис. 4.6. Ограничивая экспоненту заряда на некоторых достаточно низком уровне $U_{пар}$ получим однозначную

связь между амплитудой импульсов освобождения e_{0max} и длительностью выходных импульсов. Заметим, что начальный (достаточно малый) участок экспонент заряда можно аппроксимировать отрезком прямой, поэтому преобразование окажется линейным.

Компаратор 20 выполняет задачу дискретизации функции цикловой деформации детали $\delta = f(N)$, где δ - текущая деформация детали (в примере рис. 4.1 это прогиб); N – количество циклов нагружения. Поскольку амплитуда электрических импульсов в катушках W_0 и W_u пропорциональна амплитуде функция $e_{0max}=f(N)$. Отсюда следует, что схематически компаратор представляет собой набор двухсторонних селекторов уровня. Уровни селекции задаются делителем напряжения, который питается напряжением, превышающим максимальное значение функции $e_{0max}=f(N)$.

Устройство сравнения схемотехнически выполняют весьма разнообразно. В частном случае его автономный элемент памяти может быть заменен на связи с формирователем амплитуда-длительность 11, выходом формирователя прямоугольных импульсов 10 и инверсным выходом счетного триггера 13. Поскольку все функциональные элементы счетчика ресурса выполняют известные (штатные) операции здесь их электрические принципиальные схемы не приводятся и отмеченный частный случай не рассматривается.

Индикатор 26 счетчика ресурса выполнен в виде набора индикаторных лампочек (светодиодов), которые своим пространственным положением отражают остаточный ресурс работы детали. Известная функция цикловой деформации детали $\delta = f(N)$ для упрочняемых материалов имеет минимум, соответственно для больших значений N эта функция возрастающая. Психологически целесообразнее ввести поня-

тие функции качества $K = f(N)$ в виде функции уменьшения деформации δ . В этом случае выходной участок функции $K = f(N)$ окажется падающим (вплоть до точки разрушения), что и будет восприниматься пользователем как снижение качества, т.е. ресурса. На рис. 4.4 индикаторные лампочки изображены по стилизованной форме функции качества (ресурса) и для наглядности положение этих лампочек изображено согласованно с уровнем дискретизации.

Работает счетчик ресурса следующим образом. Синусоидальный сигнал e_0 ЭДС катушки 7 (W_0) поступает на вход однополупериодного выпрямителя 9 – см. рис. 4.4 – на его выходе будут однополярные импульсы, показанные на верхней эпюре рис. 4.5. Для наглядности на эпюру этих импульсов e_0 положены уровни U_k компаратора. Для определенности будем полагать, что текущее состояние детали соответствует участку разупрочнения, на котором амплитуда деформации δ растет, соответственно и растет амплитуда сигнала e_0 .

Пусть в момент времени $t=t_0$ фронтом включения питания триггеры 13, 23 и 25 установлены в нулевое состояние. При $t=t_1$ появляется импульс на выходе выпрямителя 9. Одновременно запускаются формирователь прямоугольных импульсов 10 и преобразователь амплитуда-длительность 11 – см. эпюры $U_{10}=f(t)$ и $U_{11}=f(t)$. В этот же момент времени передним фронтом преобразователя 10 переворачивается счетный триггер 13. Прямой выход триггера 13 дает логическую единицу на вход конъюнктора 16 счетчика 19, обеспечивая прохождение импульсов опорного генератора на вход счетчика 19 в течении времени действия импульса преобразователя 11, т.е. в интервале от t_1 до t_2 . В это время конъюнктор 15 закрыт инверсным сигналом триггера 13.

В момент времени $t=t_3$ амплитуда e_{0max} импульса e_0 превышает некоторый i -й уровень компаратора 20 и на его i -м выходе в течении $t=t_4-t_3$ появляется импульс – см. эпюру $U_{20}=f(t)$.

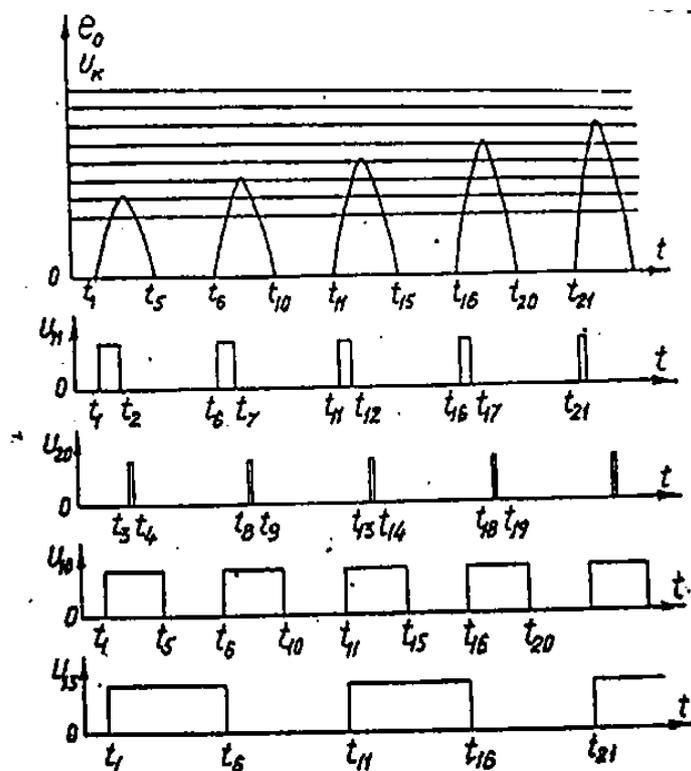


Рис. 4.5. Эпюры напряжений на выходах отдельных элементов функциональной схемы

В момент время $t=t_5$ первый из рассматриваемых выходных импульсов выпрямителя 9 заканчивается и появляется импульс формирователя 10. При $t=t_6$ появляется очередной импульс выпрямителя 9, формируется импульс формирователя 10, который своим передним фронтом переворачивает счетный триггер 13.

Счетный триггер 13 прямым выходом закрывает конъюнктор 16 и открывает конъюнктор 15. Поэтому в течении времени $t_6...t_7$ очередного $i+1$ импульса формирователя 11 происходит заполнение счетчика 15. Схема сравнение 21 обеспечивает логическую единицу на

своем выходе «+», если количество импульсов в счетчике 19 превышает количество импульсов в счетчике 18, соответственно – логическую единицу на выходе «-» для обратной ситуации. Для рассматриваемого участка функции качества логическая единица будет на выходе «+». Эта логическая единица возникает на выходе n выходных конъюнкторов 2, на вторых входах которых в это время присутствует логическая единица инверсного выхода счетного триггера 13. В интервале времени от $t=t_8$ до $t=t_9$ на входах всех $2n$ выходных конъюнкторов 22, 24 появится импульс $i+1$ шины компаратора 20. Но компараторы 22 закрыты выходом «-» схемы сравнения, поэтому будут открыты только компараторы 24, следовательно сработает только $i+1$ выходной триггер 25 и будет высвечиваться лампочка \mathcal{L}_{i+1}^H нисходящей ветви функции качества индикатора 26. При обратном соотношении количества импульсов на счетчиках 18, 19 соответственно выход «-» схемы сравнения 21 обеспечит срабатывание $i+1$ триггера 23 восходящего участка функции качества и высвечивания лампочки \mathcal{L}_{i+1}^H .

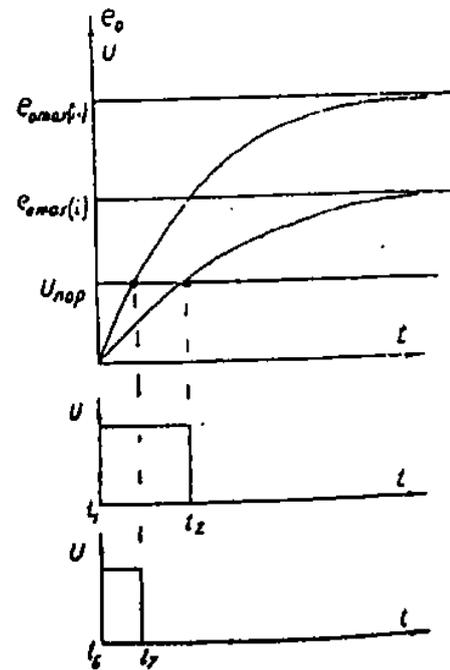


Рис. 4.6. К принципу работы преобразователя амплитуда-длительность счетчика ресурса

Начиная с момента времени $t = t_{11}$ цикл измерения будет повторяться. Сброс счетчиков конъюнкторов 18, 19 осуществляется через конъюнктор 14, задним фронтом импульса формирователя 10, когда на инверсном входе счетного триггера 13 присутствует логическая

единица ($t=t_{10}...t=t_{20}$). Сброс выходных триггеров осуществляется также задним фронтом формирователя 10, когда на входе конъюнктора 17 присутствует логическая единица с прямого выхода счетного триггера 13. Таким образом, такт измерения равен периоду работы счетного триггера 13. Результат сравнения на выходе схемы 21 присутствует в интервале времени ($t-t_{10}...t_{17}-t_{20}$). Соответствующие выходные триггеры (23 или 25) будут устанавливаться в единичное состояние и обеспечивать включение лампочек (L^H или L^B) в моменты t_8, t_{18} . Сброс выходных триггеров, соответственно выключение индикатора будет происходить в моменты времени t_{15}, t_{25} . Пользователь будет наблюдать одну мерцающую лампочку индикатора 26. В рассматриваемом случае это будет лампочка L_{i+1}^H . Частота мерцания равна частоте переключения счетного триггера 13, т.е. в два раза ниже частоты цикла нагружения детали.

Усталостные испытания деталей на остаточный ресурс проводят следующим образом. Каждый экземпляр установки имеет свои паспортные параметры:

- активные R_7, R_8 сопротивления катушек привода 7 и освобождения 8;
- индуктивности L_7, L_8 катушек 7,8;
- напряжение питания U_k делителя компаратора 20;
- зависимости $F_u = f(I_7)$ силы F_u взаимодействия поля катушки привода 7 от величины тока I_7 в катушке;
- зависимости ЭДС $e_{0max} = f(I_8, f)$ от величины тока I_8 в катушке освобождения 8 и частоты f колебаний;

Последовательность действий пользователя при производстве измерений ресурса деталей включает следующие операции:

1. Настройка установки на заданный режим нагружения:

– определяются с видом деформации (растяжение-сжатие, изгиб, сложное напряженное состояние) и по нему назначают требуемые силы нагружения. По данным из партии деталей, подлежащих измерению, берут деталь, по ней подготавливают пассивный и активный захваты, устанавливают деталь на основании 1 установки и корректируют положение катушек 7,8 относительно магнитопроводного стержня 6;

– при произвольных уровнях тока в катушках дают небольшое возмущение активному захвату (например, легким ударом) и по ЭДС в любой из катушек определяют собственную частоту f_c системы;

– по заданному для испытаний значению силы $F_{\text{иц}}$ в цикле определяют импульсный ток $I_{7\text{и}}$ в катушке привода 7, пользуясь зависимостью $F_u = f(I_7)$. По величине этого тока вычисляют и устанавливают уровень E источника электропитания, пользуясь законом Ома $E = I_{7\text{и}} \times Z$, где $Z = \sqrt{R_7^2 + (\omega L_7)^2}$, $\omega = \pi f_c$ (заметим, что первая гармоника импульсного режима имеет частоту в два раза меньше собственной f_c);

– если по условиям нагружения детали требуется постоянная составляющая силы $F_{7\text{п}}$, то по функции $F_u = f(I_7)$ определяют необходимый ток $I_{7\text{п}}$ и его величину устанавливают резистором R4. Заметим, что $I_{7\text{п}} = E / (R_7 + R4)$. В случае, когда постоянной составляющей $F_{7\text{п}}$ не требуется, выдерживают соотношение $R4 \gg R7$, при котором током $I_{7\text{п}}$ можно пренебречь (можно исключить резистор R4);

– предварительно резистором R1 устанавливают некоторое значение постоянного тока $I_{8\text{п}}$ в катушке освобождения 8 пользуясь

зависимостью $e_{0\max} = f(I_8 + f)$ при частоте $f = f_c$. Величина тока $I_{8П}$ должна быть согласована с параметрами электронного ключа (транзистора VT). Порядок величины $e_{0\max}$ - единицы вольт;

- на установленных режимах проводят усталостные испытания детали до ее разрушения, измеряя амплитуду ЭДС $e_{0\max}$ в катушке освобождения δ . Фиксируют значение $e_{0\max}$ при разрушении детали - $e_{0\max}^{разр}$;

- пропорционально резисторам R1 корректируют величину тока $I_{8П}$ в катушке освобождения δ так, чтобы скорректированный ток обеспечивал $e_{0\max}^{разр} = U_k$. Фактически это масштабирование тарировочной функции $e_{0\max} = f(N)$.

2. Проведение испытаний на определение остаточного ресурса работы деталей.

Для определения остаточного ресурса деталей их устанавливают в пассивный и активный захваты и включают установку. Через несколько циклов автоматического нагружения (минимально через два цикла) результат измерения будет отражен на индикаторе 26 установки.

4.2. Развитие методики испытаний

Как отмечалось выше, испытания на усталость весьма трудоемки – 10^7 циклов и более. Снижение трудоемкости за счет увеличения частоты цикла ограничено эффектом запаздывания деформации по отношению к нагрузке. Устранить указанное противоречие возможно за счет выбора формы цикла нагружения.

Рассмотрим установку [21], реализующую такой подход. В основе лежит синусоидальный цикл, но в районе амплитудных значений

вводятся площадки выстоя для завершения процесса деформации. В таком случае время движения между соседними площадками выстоя может быть минимизировано.

Установка (рис. 4.7) содержит основание *1*, на котором с помощью пассивного захвата *2* закреплен образец *3* испытываемого материала. На свободном конце образца установлен активный захват *4*, который связан с магнитопроводным стержнем *5*. По осевой линии магнитопроводного стержня около его концов на основании установлены соленоидные катушки *6*, *7*. По этой же осевой линии на некотором удалении от концов магнитопроводного стержня размещены упругие упоры *8*, *9*. На рис. 4.7 упругие упоры представлены (рассмотрим один) корпусом *10*, внутри которого имеется подвижный поршень *11* с пружиной *12*. Пружина поджата гайкой *13*. Упругие упоры фиксируются на основании установки винтами *14*.

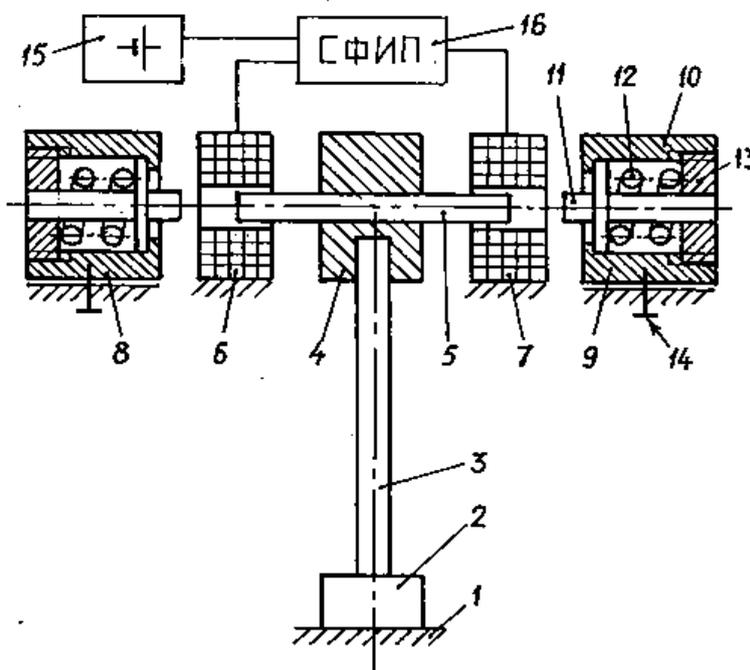


Рис. 4.7. Конструктивная схема установки для ускоренных испытаний на усталость

Для подведения энергии к активному захвату от источника электропитания 15 имеется схема формирования импульсов привода (СФИП) 16. СФИП электрически связана с соленоидными катушками 6, 7.

Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода представлена на рис. 4.8. СФИП управляется электрическим

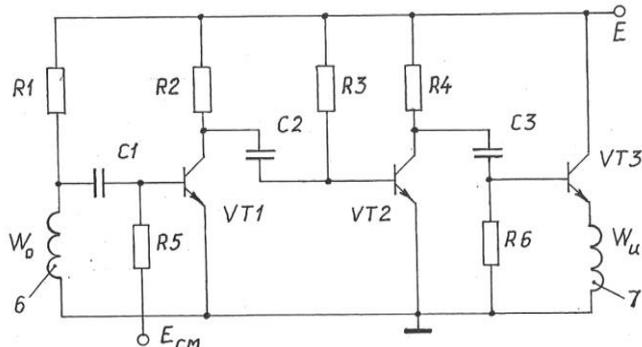


Рис. 4.8. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

сигналом одной соленоидной катушки 6, назовем ее катушкой освобождения W_0 . Схема формирует короткий импульс тока в другую соленоидную катушку 7, назовем ее катушкой привода $W_у$. Каскад на транзисторе $VT3$ функционально представляет собой –

электронный ключ, а каскады на транзисторах $VT1$ и $VT2$ являются усилителем-формирователем.

Исходное состояние схемы по постоянному току (при отсутствии входного сигнала): транзистор $VT1$ находится в режиме глубокой отсечки за счет источника запирающего смещения $E_{см}$. Транзистор $VT2$ открыт – цепь смещения резистор $R4$, а ключевой транзистор $VT3$ закрыт нулевым смещением через резистор $R6$. Каскады по постоянному току разделены конденсаторами $C1-C3$. В исходном состоянии через катушку освобождения W_0 протекает небольшой ток источника питания E – подмагничивающий ток – через ограничительный резистор $R1$, а ток катушки привода близок к нулю, т.к. транзистор $VT3$ закрыт.

Предварительно поясним принцип работы предлагаемой установки на физической модели. В качестве физической модели возьмем

свободную консервативную систему (систему без потерь энергии), состоящую из упругого образца 3 жесткостью C_3 с массой m_4 на свободном конце (суммарная масса активного захвата и магнитопроводного стержня). Будем полагать, что масса образца m_3 мала по отношению к массе m_4

$$m_3 \ll m_4. \quad (4.1)$$

В физической модели жесткость пружины упругого упора обозначим C_{12} и примем

$$C_{12} \gg C_3. \quad (4.2)$$

Массой поршня можно пренебречь, т.к.

$$m_{11} \ll m_4. \quad (4.3)$$

Без учета влияния упоров инерционная масса m_4 будет совершать незатухающие колебания (по условию система не имеет потерь) по закону

$$x = X_m \sin \omega t, \quad (4.4)$$

где x – смещение массы m_4 ;

X_m – амплитуда колебаний;

$\omega = \sqrt{\frac{C_3}{m_4}}$ – циклическая частота.

Период колебаний T , собственная частота f и циклическая частота связаны

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (4.5)$$

График функции (4.4) приведен на рис. 4.9 точечной линией.

Теперь рассмотрим движение системы с учетом упоров.

Рассмотрение начнем с положения равновесия. На участке 0-1 система движется свободно, подчиняясь закону (4.4). Когда масса m_4

пройдет путь X_1 она встретит упругий упор – точка 1 . В этот момент времени $t=t_1$ скорость \dot{x}_1 составит

$$\dot{X}_1 = \frac{dx}{dt} = X_m \omega \cos \omega t_1, \quad (4.6)$$

при этом кинетическая энергия будет равна

$$E_{kl} = \frac{1}{2} m_4 \dot{X}_1^2. \quad (4.7)$$

Кинетическая энергия (4.7) будет расходоваться на деформацию образца 3 и пружины упора 12 . На участке $1-2$ будем наблюдать замедление скорости \dot{x} . В точке 2 $E_{kl}=0$ и $\dot{x}_2=0$, т.е. масса m_4 будет остановлена. Перемещение на этом участке $X_{1-2}=\ell_{yn}$ и время движения $t_{1-2}=t_{yn}$ (см. рис. 4.9).

Далее за счет потенциальных энергий образца и пружины упора масса m_4 начнет ускоренно двигаться в обратном направлении – участок $2-3$. Начиная с точки 3 ,

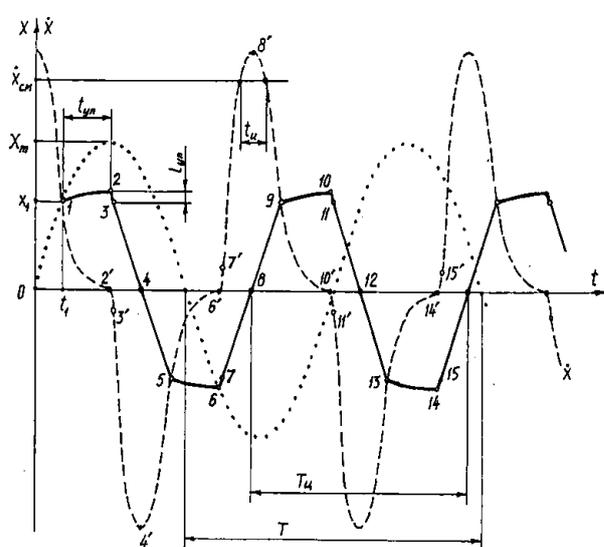


Рис. 4.9. Стилизованные графики перемещения и скорости активного захвата

система будет двигаться свободно по закону (4.4) пока не встретит второй упор – точка 5 . На втором упоре процесс повторяется.

В результате закон перемещения активного захвата оказывается примерно трапецидальным (сплошная линия на рис. 4.9). Площадки

высоты $1-2, 5-6, 9-10...$ на максимальных напряжениях образца позволяют обеспечить время на процессы пластической деформации образца. При этом время движения на участках $2-5, 6-9...$ может быть

предельно малым, за счет этого уменьшается период цикла, что приводит к сокращению времени испытаний.

Обратимся к работе установки рис. 4.7.

Устанавливают испытываемый образец 3 в пассивный захват 2. Далее на свободном конце образца закрепляют активный захват 4 с магнитопроводным стержнем 5. При включении питания источника 15 фронт напряжения обеспечит импульсы тока в катушках 6, 7. В силу неравенства этих токов взаимодействие магнитных полей катушек с магнитопроводным стержнем 5 через активный захват 4 создаст импульс силы, которая подтолкнет испытываемый образец 3. После окончания фронта питания образец начнет колебания на собственной частоте.

При колебаниях в катушке освобождения W_0 6 будет индуцироваться ЭДС пропорциональная подмагничивающему току и скорости магнитопроводного стержня 5 (т.к. транзистор VT3 закрыт, то подмагничивающий ток в катушке импульса W_u 7 ничтожно мал, поэтому ЭДС этой катушки не рассматриваем). Скорость магнитопроводного стержня представляет собой первую производную перемещения – формула (4.6). На рис. 4.9 функция скорости изображена пунктирной линией. Для наглядности функция скорости в некоторых точках совмещена с графиком перемещения, поэтому масштабы на отдельных участках не равны. В соответствии с вышеизложенным ЭДС e_0 в катушке W_0 пропорциональна скорости \dot{x} .

ЭДС e_0 катушки освобождения 6 является управляющим сигналом для схемы формирования импульсов привода (СФИП) 16. При достижении скорости стержня $X_{см}$ ЭДС e_0 будет иметь уровень $e_{0см}$. По-

тенциал источника смещения $E_{см}$ принят равным этой величине. Следовательно, транзистор $VT1$ откроется при этом уровне и сформирует импульс длительностью t_u (рис. 4.9). Усиленный каскадом на транзисторе $VT2$ данный импульс откроет ключевой транзистор $VT3$ и через катушку импульса W_u 7 пройдет импульс тока. Магнитное поле катушки обеспечит взаимодействие с магнитопроводным стержнем 5, т.е. механический импульс. Энергия импульса будет компенсировать энергию потерь в системе. После переходного процесса установится стационарный режим и перемещение активного захвата будет соответствовать функции X на рис. 4.9. Заметим, что деформация функции X импульсом привода будет минимальна, поскольку импульс симметричен положению равновесия системы (соблюдены требования теоремы Эри).

Пользователь для выбора параметров функции нагружения имеет возможность смещать исходное положение упругих упоров 8,9 и регулировать энергию подводимого через катушку привода 7 импульса уровнями питания E и смещения $E_{см}$ источника тока 15. При необходимости возможно применить пружины 12 упоров другой жесткости. При этом всегда характер функции нагружения (функция X на рис. 4.9) остается неизменным. Кроме регулирования режима работы установки имеется возможность при назначении максимального напряжения цикла варьировать геометрическими параметрами образца исследуемого материала.

Окончание испытаний образца пользователь определяет в соответствии с принятой программой, как правило, измеряя количество циклов нагружения (в данном случае количество импульсов t_u) или время.

В целом, установка для ускоренных испытаний материалов на усталость отличается простотой конструкции, не содержит кинематических пар трения, технологична и удобна в пользовании. (Значение единственной пары трения в упругом упоре невелико, поскольку основным параметром упора является жесткость его пружины). Заметим, что упругий упор может быть выполнен в виде упругого звена, например упругой балки. Установка может найти широкое применение при ускоренных испытаниях различных материалов на усталость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисциплина «Основы материаловедения» занимает важное место в системе подготовки будущих учителей технологии. Разработка технологических процессов невозможна без знания свойств материалов.

В рамках программы студенты изучают структуру материалов и ее влияние на свойства – механические, электрические, магнитные, оптические и др. Студент должен понимать, что любые параметры материалов могут быть выявлены только экспериментально, путем проведения испытаний с применением образцов материалов. Поэтому раздел программы по испытаниям конструкционных материалов занимает важное место среди других вопросов материаловедения.

С учетом структуры учебного плана основное внимание в этом разделе программы уделено методам и средствам механических испытаний конструкционных материалов. Рассматриваются основные виды испытаний – статические, динамические, испытания на усталость. Студент должен понимать общий подход к созданию испытательного оборудования – условия испытания образца материала должны быть максимально приближены к условиям работы деталей в реальном изделии. Следствием этого требования является многообразие конструкций испытательных установок.

Результаты изучения конструкции установок для испытания образцов материалов послужат подспорьем при освоении дисциплин технического творчества, которые предусмотрены учебным планом по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
2. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. – СПб: Химиздат. 2004. – 736 с.
3. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов вузов / Под ред. В.С. Чередниченко – 4-е изд. стер. – М.: Изд-во «Омега-Л», 2008. – 752 с.
4. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. Арзамасов, А.Н. Воликов, В.А. Головин и др.; под ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепяхина. 2-е изд. стер. – М.: Изд-й центр «Академия», 2009. – 448 с.
5. М. Эшби, Д. Джонс. Конструкционные материалы. Полный курс: Учебное пособие. – Перевод 3-его английского издания. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. - 672 с.
6. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. – М.: Металлургия, 1973. – 216 с.
7. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
8. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
9. Установка для определения коэффициента трения. Патент RU2659179C1 МПК G01M 19/02 / С.А. Тихомирова, Н.В. Хрусталева, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Опубл. 28.06.2018.

10. Способ определения момента трения в подшипниках качения. Патент RU2659101C1 МПК G01M 13/04 / С.А. Тихомирова, В.О. Васильев, Н.В. Хрусталева, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 28.06.2018.

11. Устанoвка для определения внутреннего трения в материале. Патент RU163380U1 МПК G01N 3/32, 19/02 / Т.В. Смирнова, Л.Е. Каткова, И.Ф. Гильманова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.07.2016.

12. Устанoвка для испытания групп образцов на усталость. Патент RU2017122C1 МПК G01N 3/32 / В.П. Власов. Оpubл. 30.07.1994.

13. Машина гидравлическая для механических испытаний при циклических нагружениях. Патент RU2337344C1 МПК G01N 3/08 / А.И. Бугавец, А.Ф. Кравченко, Е.Н. Потаенко и др. Оpubл. 27.10.2008.

14. Устанoвка для испытаний образцов при циклическом нагружении. Патент RU2488804 МПК G01N 3/32 / Е.В. Лодус, А.В. Никифоров, А.А. Павлович, Д.Ю. Таланов. Оpubл. 27.07.2013.

15. Устанoвка для испытания материалов на усталость. Патент RU145586U1 G01N 3/38 / И.О. Груздев, Л.Е. Каткова, Н.А. Елгаев, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.09.2014.

16. Устанoвка для испытания образцов материалов на усталость. Патент RU2029281 C1 МПК G01N 3/32 / В.П. Власов. Оpubл. 20.12.1995.

17. Устанoвка для испытания образцов материалов на усталость при сложном напряженном состоянии. Патент RU2472132C1 МПК G01N 3/32 / Е.В. Лодус, А.А. Павлович. Оpubл. 10.01.2013.

18. Устанoвка для испытаний образцов на усталость. Патент RU186689U1 МПК G01N 3/32 / Н.А. Елгаев, Е.Д. Панфилова, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 29.01. 2019.

19. Установка для испытания образцов материалов на усталость. Патент RU194611U1 МПК G01N 3/32 / Н.А. Елгаев, А.Ю. Морякова, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 17.02.2019.

20. Установка для усталостных испытаний деталей на остаточный ресурс. Патент RU100622U1 МПК G01N 3/32 / А.Н. Сушина, Н.А. Елгаев, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.12. 2010.

21. Установка для ускоренных испытаний материалов на усталость. Патент RU108843U1 МПК G01N 3/32 / А.Н. Сушина, Н.А. Елгаев, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.09.2011.

22. Шарыгин Л.Н., Каткова Л.Е. Проектирование конкурентно-способных технических изделий: Учебник. – Владимир: Транзит-ИКС, 2017. – 364 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| Глава 1. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ | 6 |
| 1.1. Испытания на растяжение..... | 6 |
| 1.2. Испытания на сдвиг | 8 |
| 1.3. Испытания на сжатие | 9 |
| 1.4. Испытания на изгиб..... | 11 |
| 1.5. Испытания на кручение..... | 15 |
| 1.6. Твердость материалов | 19 |
| 1.6.1. Метод Бринелля | 20 |
| 1.6.2. Метод Виккерса | 22 |
| 1.6.3. Метод Роквелла..... | 23 |
| 1.6.4. Другие методы | 26 |
| 1.7. Испытания на ползучесть | 27 |
| Глава 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТНИЯ..... | 31 |
| 2.1. Испытания на ударный изгиб..... | 31 |
| 2.2. Трибологические испытания | 36 |
| 2.3. Определение параметров трения..... | 41 |
| 2.3.1. Трение в поступательной кинематической паре | 43 |
| 2.3.2 Трение во вращательной кинематической паре | 54 |
| 2.3.3. Внутреннее (гистерезисное) трение в материале | 63 |

| | |
|--|-----|
| Глава 3. ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ..... | 71 |
| 3.1. Испытания на растяжение-сжатие | 76 |
| 3.2. Испытания на изгиб..... | 80 |
| 3.3. Испытания при сложном напряженном состоянии..... | 90 |
| 3.4. Испытания с применением температурных воздействий .. | 96 |
| 3.5. Групповые испытания | 117 |
| 3.6. Испытания нестандартных образцов | 123 |
| | |
| Глава 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ | 133 |
| 4.1. Оценка ресурса деталей | 133 |
| 4.2. Развитие методики испытаний | 146 |
| | |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 154 |
| | |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 155 |

Учебное издание

ШАРЫГИН Лев Николаевич
КАТКОВА Лилия Евгеньевна

ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 17.02.21.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 9,3. Тираж 50 экз.

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.