

**ЛИСТ УЧЕТА ЦИРКУЛЯРНЫХ ПИСЕМ, ИЗМЕНЯЮЩИХ / ДОПОЛНЯЮЩИХ
НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ**

НД № 2-020101-104 - Правила классификации и постройки морских судов, 2018

Часть IX

(номер и название нормативного документа)

№ п/п	Номер циркулярного письма, дата утверждения	Перечень измененных и дополненных пунктов
1.	313-09-1126ц от 27.04.2018	Часть IX: раздел 2: 2.4.1, 2.4.3, 2.4.6.1 - 2.4.6.4, 2.4.8, 2.4.9, Приложения I - VI; раздел 6: 6.3.1 - 6.3.4, 6.3.5.1



РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

ЦИРКУЛЯРНОЕ ПИСЬМО № 313-09-1126ц от 27.04.2018

Касательно:

внесения изменений в Правила классификации и постройки морских судов, 2018, НД № 2-020101-104 в связи с вступлением в силу унифицированных требований (УТ) МАКО А3 и М53 рев.3

Объект(ы) наблюдения:
суда в постройке

Дата ввода в действие:
с момента опубликования

Действует до:

Действие продлено до:

Отменяет/ изменяет/ дополняет циркулярное письмо №

от

Количество страниц: 1 + 52

Приложение(я):

текст изменений к части IX «Механизмы»

Генеральный директор

К.Г. Пальников

Текст ЦП:

Настоящим информируем, что в связи с вступлением в силу унифицированных требований (УТ) МАКО А3 и М53 рев.3 в часть IX «Механизмы» Правил классификации и постройки морских судов, 2018, НД № 2-020101-104 вносятся изменения, приведенные в приложении к настоящему циркулярному письму.

Оригинальный текст УТ МАКО А3 (June 2017) и М53 (Rev.3 June 2017) на английском языке размещен на служебном сайте РС в разделе «Внешние нормативные документы РС/02 Документы МАКО/ № 1-0202-003-Е и №1-0209-053-Е-А1».

Необходимо выполнить следующее:

1. Руководствоваться положениями настоящего циркуляционного письма при рассмотрении и одобрении технической документации судов с 01.07.2018.
2. Содержание настоящего циркуляционного письма довести до сведения инспекторского состава подразделений РС, заинтересованных организаций и лиц в зоне деятельности подразделений РС

Перечень измененных и дополненных пунктов/глав/разделов (для указания в Листе учета ЦП (форма 8.3.36)):

часть IX, раздел 2: 2.4.1, 2.4.3, 2.4.6.1-2.4.6.4, 2.4.8, 2.4.9, Приложения I-VI; раздел 6: 6.3.1-6.3.4, 6.3.5.1.

Исполнитель: Серов А.В.

Отдел 313

(812) 3123985

Система «Тезис» № 18-49727

ПРАВИЛА КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ МОРСКИХ СУДОВ, 2018,

НД № 2-020101-104

ЧАСТЬ IX. МЕХАНИЗМЫ

2.4 КОЛЕНЧАТЫЙ ВАЛ

Пункт 2.4.1. Во втором абзаце текст «...при условии представления обосновывающих расчетов или экспериментальных данных» заменяется текстом "при условии выполнения расчетов, учитывающих применимые требования Приложений III, V, VI к разд. 2 и экспериментальных данных, полученных в соответствии с требованиями Приложения IV к разд. 2. При этом принимаемые коэффициенты запаса прочности должны быть обоснованы.».

Пункт 2.4.3. Абзац «...поверхностная обработка ...» заменяется следующим текстом:

«...поверхностная обработка галтелей рамовых и шатунных шеек и краев масляных отверстий (индукционная закалка, закалка открытым пламенем, азотирование, обкатка, дробеструйная обработка и т.п. с описанием процесса закалки) (см. Приложение V к разд. 2);».

Пункт 2.4.6.1. Последнее предложение «Альтернативный метод расчета коэффициентов концентрации напряжений с использованием МКЭ должен быть согласован с Регистром» дополняется следующим текстом: «(см. Приложения III и VI к разд. 2)».

Пункт 2.4.6.2 первое предложение «Галтель шатунной шейки» дополняется текстом: «(см. Приложение I к разд. 2)».

Пункт 2.4.6.3. Первое предложение «2.4.6.3 Галтель рамовой шейки» дополняется текстом: «(см. Приложение I к разд. 2)».

Пункт 2.4.6.4. Первое предложение «2.4.6.4 Край масляного отверстия» дополняется текстом: «(см. Приложение II к разд. 2)».

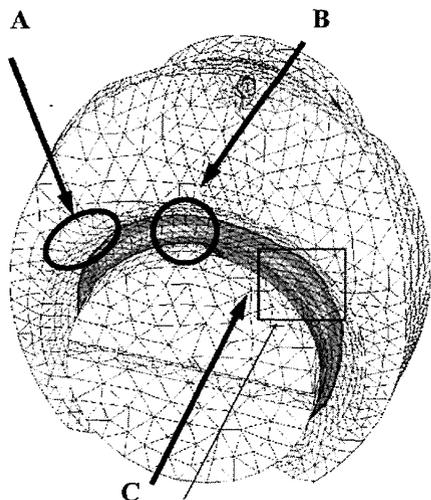
Пункт 2.4.8 дополняется следующим текстом: «См. также Приложения I и II к разд. 2.».

Пункт 2.4.9. Предпоследний абзац «При наличии результатов испытаний на усталостную прочность полноразмерных кривошипов или коленчатых валов, подвергавшихся поверхностной обработке, коэффициент K принимается на основе этих испытаний.» дополняется следующим текстом «(См. Приложения IV и V к разд. 2)».

Раздел 2 ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ дополняется в конце Приложениями I - VI (См. УТ МАКО М53):

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ГАЛТЕЛЯХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ (СМ. УТ МАКО М53)

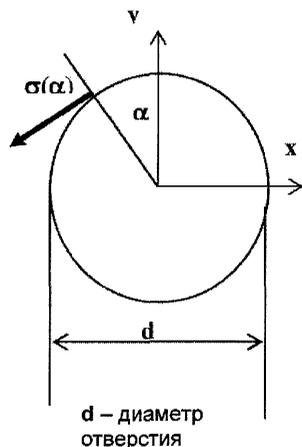
ПРИЛОЖЕНИЕ I



		Напряжение	Max $ \sigma_3 $	Max σ_1	
Нагружение кручением	Область максимальных напряжений		A	C	B
	Характерная система главных напряжений				
	Круг Мора при $\sigma_2 = 0$		$ \sigma_3 > \sigma_1$	$\sigma_1 > \sigma_3 $	$\sigma_1 \approx \sigma_3 $
	Эквивалентное напряжение и ККН	$\tau_{\text{экр.}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ $\text{ККН} = \frac{\tau_{\text{экр.}}}{\tau_n} \text{ для } \alpha_T, \beta_T$			
Нагружение изгибом	Область максимальных напряжений		B	B	B
	Характерная система главных напряжений				
	Круг Мора при $\sigma_3 = 0$		$\sigma_{\text{экр.}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$ $\text{ККН} = \frac{\sigma_{\text{экр.}}}{\sigma_n} \text{ для } \alpha_B, \beta_B, \beta_Q$		

**КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА КРАЮ
МАСЛЯНЫХ ОТВЕРСТИЙ (СМ. УТ МАКО М53)**

ПРИЛОЖЕНИЕ II



Тип напр.	Номин. тензор напр.	Распределение одноосного напряжения по краю	Круг Мора
Растяжение	$\begin{bmatrix} \sigma_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\sigma_\alpha = \sigma_n \gamma_B / 3 [1 + 2 \cos(2\alpha)]$	<p>$\gamma_B = \sigma_{\max} / \sigma_n$ при $\alpha = k\pi$</p>
Срез	$\begin{bmatrix} 0 & \tau_n \\ \tau_n & 0 \end{bmatrix}$	$\sigma_\alpha = \gamma_T \tau_n \sin(2\alpha)$	<p>$\gamma_T = \sigma_{\max} / \tau_n$ при $\alpha = \frac{\pi}{4} + k \frac{\pi}{2}$</p>
Растяжение + срез	$\begin{bmatrix} \sigma_n & \tau_n \\ \tau_n & 0 \end{bmatrix}$	$\sigma_\alpha = \frac{\gamma_B}{3} \sigma_n \left\{ 1 + 2 \left[\cos(2\alpha) + \frac{3 \gamma_T \tau_n}{2 \gamma_B \sigma_n} \sin(2\alpha) \right] \right\}$	<p>$\sigma_{\max} = \frac{\gamma_B}{3} \sigma_n \left[1 + 2 \sqrt{1 + \frac{9}{4} \left(\frac{\gamma_T \tau_n}{\gamma_B \sigma_n} \right)^2} \right]$</p> <p>при $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{3 \gamma_T \tau_n}{2 \gamma_B \sigma_n} \right)$</p>

**РУКОВОДСТВО ПО РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТОВ
КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В РАДИУСАХ ГАЛТЕЛИЙ ЩЕК
КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (см.
УТ МАКО М53)**

Содержание

- 1. 1. Общие положения**
- 2. Требования к модели**
 - 2.1** Рекомендации для элементной сетки
 - 2.2** Материал
 - 2.3** Критерии качества элементной сетки
 - 2.3.1** Критерий главных напряжений
 - 2.3.2** Критерий осредненности/неосредненности напряжений
- 3. Случаи нагружения**
 - 3.1** Кручение
 - 3.2** Чистый изгиб (четырёхточечный изгиб)
 - 3.3** Изгиб со срезом (трехточечный изгиб)
 - 3.3.1** Способ 1
 - 3.3.2** Способ 2

1. Общие положения

Целью анализа является определение коэффициентов концентрации напряжений (ККН) в галтелях коленчатых валов МКЭ вместо аналитического способа. Второй из упомянутых метод основывается на эмпирических формулах, полученных из результатов тензометрии различных форм колен и, соответственно, применение этих формул ограничивается исследованными формами.

ККН, рассчитанные в соответствии с положениями настоящего документа, определяются как отношение напряжений, рассчитанных МКЭ, к номинальным напряжениям, рассчитанным аналитическим способом (в галтелях рамовых и шатунных шеек). При использовании в рамках настоящего метода в главе 2.4 настоящей части или альтернативных методов, для расчета изгибающих и главных напряжений при кручении рассчитываются напряжения по фон Мизесу.

Данная процедура, а также руководства по оценке, применимы как к цельным коленчатым валам, так и к полусоставным коленчатым валам (кроме галтелей рамовых шеек).

Анализ должен проводиться в рамках линейно-упругой конечно-элементной модели, а во всех случаях нагружения следует применять единичные нагрузки соответствующей величины.

Расчет ККН в масляных отверстиях не является предметом рассмотрения настоящего Приложения.

Рекомендуется проверять элементную точность используемого конечно-элементного решателя, например, посредством моделирования простой геометрии с последующим сравнением напряжений, полученных из МКЭ, с результатами аналитического расчета для чистого изгиба и кручения.

Вместо МКЭ может также использоваться метод граничных элементов.

2. Требования к модели

Основные рекомендации и допущения при построении конечно-элементной модели представлены в 2.1. Законченная модель должна соответствовать требованиям 2.3.

2.1 Рекомендации для элементной сетки

Чтобы обеспечить качество сетки, конечно-элементную модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений следует строить в соответствии со следующими рекомендациями:

Модель должна описывать один полноценный кривошип от осевой линии одного рамового подшипника до осевой линии соседнего рамового подшипника.

Вблизи галтелей используются элементы следующих типов:

10-узловые четырехгранные элементы;

8-узловые шестигранные элементы;

20-узловые шестигранные элементы.

Характеристики сетки в области радиусов галтелей. Следующие требования действуют в пределах области $\pm 90^\circ$ по окружности от плоскости кривошипа:

Максимальный размер элемента $a = r/4$ по всей галтели, а также в направлении по окружности. При использовании 20-узловых шестигранных элементов размер элемента в направлении по окружности может быть увеличен до $5a$. В случае многорадиусной галтели в качестве r берется местный радиус галтели.

(В случае использования 8-узловых шестигранных элементов они должны быть еще меньшего размера для соответствия критериям качества).

Рекомендуемые размеры элементов в направлении глубины галтели:

- толщина первого слоя равна размеру элемента a ;
- толщина второго слоя равна размеру элемента $2a$;
- толщина второго слоя равна размеру элемента $3a$.

Не менее 6 элементов в направлении толщины щеки.

Остальная часть кривошипа должна обеспечивать численную устойчивость решателя.

Противовесы должны моделироваться только в случае их значительного влияния на общую жесткость кривошипа.

Моделирование масляных отверстий не является обязательным, если их влияние на общую жесткость незначительно, а расстояние до галтели составляет более $2r$ (см. рис. 2.1).

Сверления и отверстия, предназначенные для облегчения конструкции, следует моделировать.

Применение подмоделей допускается при соблюдении требований программного обеспечения (ПО).

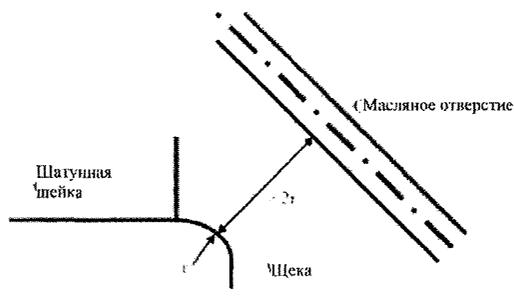


Рис. 2.1. Расстояние между масляным отверстием и галтелью

2.2 Материал

В главе 2.4 настоящей части не рассматриваются свойства материалов, такие как модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (ν). Для анализа МКЭ эти параметры материала необходимы, поскольку сначала рассчитываются упругие деформации, а из них через модуль Юнга и коэффициент Пуассона рассчитываются напряжения. Следует использовать достоверные значения свойств материалов либо взятые из документации, либо измеренные на образцах материалов.

Для стали рекомендуются следующие значения: $E = 2,05 \times 10^5$ МПа и $\nu = 0,3$.

2.3 Критерии качества элементной сетки

Если используемая элементная сетка не соответствует ни одному из нижеуказанных критериев для определения ККН в исследуемой области, должен быть проведен повторный расчет с использованием более мелкой сетки.

2.3.1 Критерий главных напряжений.

Качество сетки должно быть подтверждено посредством проверки составляющей напряжения, нормальной к поверхности радиуса галтели. В идеальном случае такое напряжение должно быть равно нулю. При главных напряжениях σ_1 , σ_2 и σ_3 должно выполняться следующее требование:

$$\min(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) < 0.03 \cdot \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

2.3.2 Критерий осредненности / неосредненности напряжений.

Данный критерий основывается на отслеживании неоднородностей в напряжениях, определяемых на элементах галтели при расчете ККН:

неосредненные узловые напряжения, рассчитываемые на каждом элементе, соединенном с тем или иным узлом, должны отличаться менее чем на 5 % от 100 % осредненного узлового напряжения на этом узле в исследуемой области.

3. Случаи нагружения

При определении ККН взамен аналитического способа, описываемого в главе 2.4 настоящей части, расчеты должны быть выполнены для следующих случаев нагружения;

3.1 Кручение

По аналогии с испытаниями, проводимыми Научно-производственным Объединением по ДВС (FVV), конструкция подвергается воздействию чистым кручением. Деформация торцевых поверхностей модели подавляется.

Крутящий момент прилагается к центральному узлу на оси коленчатого вала. Этот узел работает как главный узел с шестью степенями свободы и жестко соединен с остальными узлами торцевой поверхности.

Такие граничные условия и условия нагружения применимы как для рядных, так и V-образных двигателей.

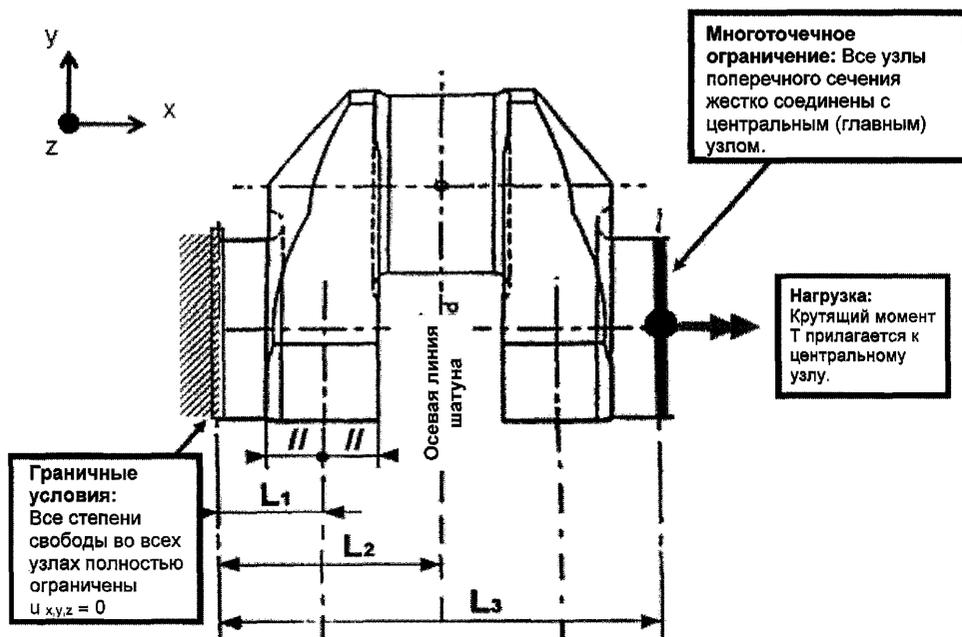


Рис. 3.1. Граничные условия и условия нагружения для случая нагружения кручением

Для всех узлов в галтелях рамовых и шатунных шеек определяются главные напряжения, а эквивалентное напряжение кручения рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{экв.}} = \max\left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}\right)$$

Максимальное значение, берущееся для последующего расчета ККН, составляет:

$$\alpha_T = \frac{\tau_{\text{экв.}} \cdot \alpha}{\tau_N}$$

$$\beta_T = \frac{\tau_{\text{экв.}} \cdot \beta}{\tau_N}$$

где τ_N — номинальное напряжение кручения в шатунной и рамовой шейке согласно 2.4.5.1 настоящей части при крутящем моменте T :

$$\tau_N = \frac{T}{W_p}$$

3.2 Чистый изгиб (четырёхточечный изгиб)

По аналогии с испытаниями, проводимыми FVV, конструкция подвергается воздействию чистым изгибом. Деформация торцевых поверхностей модели подавляется.

Изгибающий момент прилагается к центральному узлу на оси коленчатого вала. Этот узел работает как главный узел с шестью степенями свободы и жестко соединен с остальными узлами торцевой поверхности.

Такие граничные условия и условия нагружения применимы как для рядных, так и V-образных двигателей.

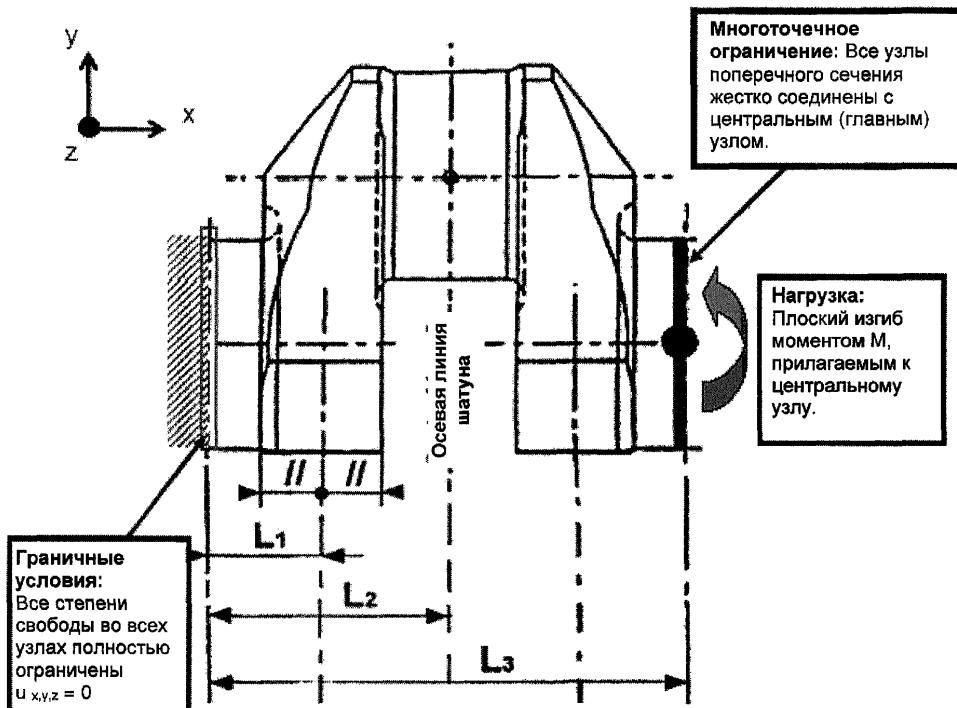


Рис. 3.2. Граничные условия и условия нагружения для случая нагружения чистым изгибом

Для всех узлов в галтелях рамовых и шатунных шеек определяются эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{эки.}$. Наибольшее значение используется для расчета ККН по следующим формулам:

$$\alpha_B = \frac{\sigma_{эки. \alpha}}{\sigma_N}$$

$$\beta_B = \frac{\sigma_{эки. \beta}}{\sigma_N}$$

Номинальное напряжение σ_N рассчитывается согласно 2.4.4.2 настоящей части при

изгибающем моменте M по следующей формуле:

$$\sigma_N = \frac{M}{W_{срп}}$$

3.3 Изгиб со срезом (трехточечный изгиб)

Данный случай нагружения рассчитывается для определения ККН для чистой поперечной (радиальной) силы β_0 , действующей на галтель рамовой шейки.

По аналогии с испытаниями, проводимыми FVV, конструкция подвергается воздействию трехточечным изгибом. Деформация обеих торцевых поверхностей модели подавляется. Все узлы жестко соединены с центральным узлом; граничные условия

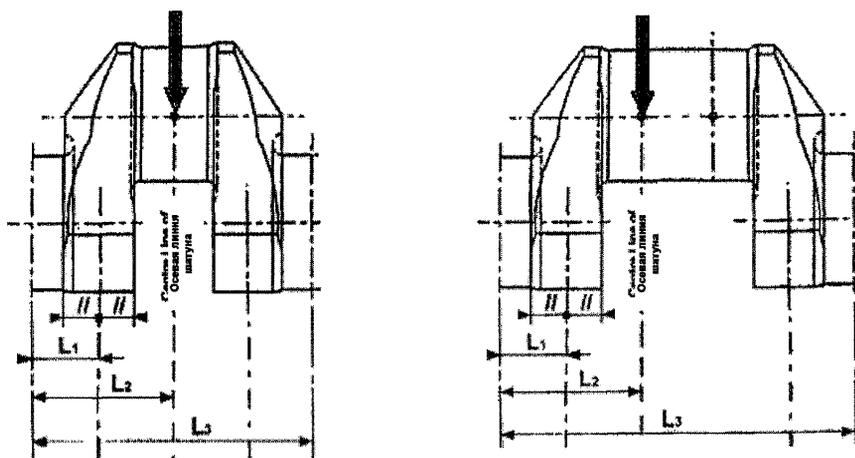


Рис. 3.4. Приложение нагрузки в случае рядного V-образного двигателя

Рассчитывается максимальное эквивалентное напряжение по фон Мизесу σ_{3P} в галтели рамовой шейки. ККН для галтели рамовой шейки может быть определен двумя описанными ниже способами.

3.3.1 Способ 1

Данный способ аналогичен методике, используемой в FVV. Результаты расчета трехточечного и четырехточечного изгиба сочетаются следующим образом:

$$\sigma_{3P} = \sigma_{N3P} \cdot \beta_B + \sigma_{Q3P} \cdot \beta_Q$$

где:

σ_{3P} – согласно расчету МКЭ;

σ_{N3P} — номинальное изгибное напряжение в центре щеки, возникающее вследствие воздействия силы F_{3P} [Н], прикладываемой по осевой линии данного шатуна (см. рис. 3.4);

β_{Q3P} – согласно п. 3.2;

$\sigma_{Q3P} = Q_{3P} / (BW)$, где Q_{3P} – радиальная (срезающая) сила на щеке, возникающей в результате действия силы F_{3P} [Н], прикладываемой по осевой линии данного шатуна (см. также рис. 2.4.4.1-1 и 2.4.4.1-2 настоящей части).

3.3.2 Способ 2

Данный способ не аналогичен методике, используемой в FVV. В статически определенной системе с одним кривошипом на двух подшипниках изгибающий момент и радиальная (срезающая) сила пропорциональны. Поэтому ККН галтели рамовой шейки может быть найден непосредственным конечно-элементным расчетом трехточечного изгиба.

ККН рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta_{BQ} = \frac{\sigma_{3P}}{\sigma_{N3P}}$$

Обозначения см. в 3.3.1.

При использовании этого метода определение радиальной силы и напряжения согласно главе 2.4 настоящей части становится избыточным. Тогда рассчитывается переменное изгибное напряжение в галтели рамовой шейки согласно 2.4.4.3 главы 2.4 настоящей части по следующей формуле:

$$\sigma_{BG} = \pm |\beta_{BQ} \cdot \sigma_{BPN}|$$

Данный метод не применяется к галтели шатунной шейки, и такой ККН не должен использоваться в рамках методов расчета, отличных от тех, в которых предполагается наличие статически определенной системы (как в главе 2.4 настоящей части).

РУКОВОДСТВО ПО ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ(СМ. УТ МАКО М53)

Содержание

- 1. Введение**
 - 1.1 Испытания малых образцов
 - 1.2 Испытание полноразмерного кривошипа
- 2. Оценка результатов испытаний**
 - 2.1 Принципы
 - 2.2 Ступенчатый метод
 - 2.3 Модифицированный ступенчатый метод
 - 2.4 Расчет выборочного среднего и стандартного отклонения
 - 2.5 Доверительный интервал для среднего предела усталости
 - 2.6 Доверительный интервал для стандартного отклонения
- 3. Испытания малых образцов**
 - 3.1 Определение изгибной усталостной прочности
 - 3.2 Определение крутильной усталостной прочности
 - 3.3 Прочие места отбора образцов
 - 3.4 Сопоставление результатов испытаний
- 4. Полноразмерные испытания**
 - 4.1 Гидравлическая пульсация
 - 4.2 Резонансный стенд
 - 4.3 Использование результатов и приемлемость коленчатого вала
- 5. Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам**

1. Введение

Испытания на усталостную прочность можно разделить на две основных группы: испытания малых образцов и испытания полноразмерных кривошипов. Испытания могут проводиться ступенчатым способом или модифицированным ступенчатым способом. Также могут использоваться иные статистические методы оценки.

1.1 Испытания малых образцов

Для коленчатых валов с галтелями без поверхностного упрочнения усталостная прочность может быть определена посредством испытаний малых образцов, взятых от полноразмерного кривошипа, однако этот способ не должен применяться в случае, если соседние с галтелями области имеют поверхностное упрочнение, создающее остаточные напряжения в галтелях.

Особенностью таких испытаний является возможность изготовления достаточно большого количества образцов для проведения испытаний с различными коэффициентами асимметрии цикла напряжений R и в различных режимах нагружения (осевое, изгибное, крутильное), с надрезом или без него для оценки характеристики используемых материалов в условиях многоосного нагружения.

1.2 Испытание полноразмерного кривошипа

В случае коленчатых валов с поверхностным упрочнением усталостная прочность может быть определена только посредством испытания полноразмерных кривошипов. В случае 3- и 4-точечного изгиба нагрузка может прилагаться при помощи гидравлических приводов либо при помощи возбудителя на резонансном стенде, позволяющим производить испытания с коэффициентом асимметрии цикла напряжений $R = -1$.

2. Оценка результатов испытаний

2.1 Принципы

Перед проведением испытаний на усталостную прочность коленчатый вал необходимо проверить в соответствии с процедурами контроля качества, включая соответствие химического состава материала, его механических свойств, твердости поверхности, глубины и протяженности упрочнения, качества обработки поверхностей шеек.

Образцы для испытаний должны быть подготовлены таким образом, чтобы отражать «нижнюю часть» диапазона приемлемых значений – в частности, для коленчатых валов с индукционной закалкой это означает минимально допускаемую глубину упрочнения, минимальная протяженность зоны упрочнения на галтели и т. п. В противном случае средние результаты испытаний необходимо будет скорректировать с учетом доверительного интервала: для среднего и для стандартного отклонения может быть взят интервал с доверительной вероятностью 90 %.

При использовании в рамках главы 2.4 настоящей части результатов испытаний следует проверить и убедиться, что они соответствуют средней усталостной прочности, с учетом или без учета указанного выше интервала с доверительной вероятностью 90 %. Стандартное отклонение должно определяться с учетом интервала для доверительной вероятности 90 %. При этом результат, который будет взят в качестве усталостной прочности, будет равен среднему значению усталостной прочности минус одно стандартное отклонение.

Если оценка проводится для определения отношения между механическими свойствами материала при статическом нагружении и усталостной прочностью, такое соотношение должно основываться на фактических (т.е. измеренных) механических свойствах, а не на установленных минимальных значениях этих свойств.

Методика расчета, представленная в 2.4, применяется как для ступенчатого, так и для модифицированного ступенчатого метода.

2.2 Ступенчатый метод

При применении ступенчатого метода в первом образце создается напряжение, соответствующее средней ожидаемой усталостной прочности. Если образец выдерживает 10^7 циклов, его откладывают, а для следующего образца создают напряжение на одну ступень выше предыдущего, т.е. после каждого образца, успешно прошедшего испытание, всегда идет следующий, в котором создается напряжение на одну ступень выше. При этом между ступенями приращение напряжения подбирают таким образом, чтобы отклонение соответствовало ожидаемому уровню стандартного отклонения.

Если образец разрушается до прохождения 10^7 циклов, то фиксируют отработанное количество циклов, а в следующем образце создают напряжение на одну ступень ниже предыдущего. При этом, сумма неуспешно и успешно завершённых испытаний равна количеству образцов.

Первоначальный ступенчатый метод применим только в случае наличия большого количества образцов, поскольку для достижения достаточной точности результата испытаний необходимо использование около 25 образцов.

2.3 Модифицированный ступенчатый метод

При применении модифицированного ступенчатого метода в первом образце создается напряжение, которое, вероятнее всего, окажется заметно ниже средней усталостной прочности. Когда этот образец успешно пройдет 10^7 циклов нагружения, в нем же создается напряжение на одну ступень выше предыдущего. При этом между ступенями приращение напряжения должно подбираться таким образом, чтобы соответствовать ожидаемому уровню стандартного отклонения. Процесс поступенчатого увеличения нагрузки продолжается с образцом до его разрушения. После его разрушения, в следующем образце создается напряжение по меньшей мере на 2 ступени ниже того, при котором произошло разрушение предыдущего образца.

В рамках этого подхода количество неуспешно и успешно завершённых испытаний (считая по наивысшему уровню напряжений, при котором образец успешно прошел 10^7 циклов) обычно равно числу образцов.

Результат, полученный по итогам испытаний по модифицированному ступенчатому методу, следует использовать с осторожностью, поскольку есть вероятность, что поступенчатое увеличение нагрузки на образец, особенно при большом среднем напряжении, имеет свойство увеличивать предел усталости, хотя этот эффект обучения менее выражен в случае испытаний образцов высокопрочных сталей с пределом прочности более 800 МПа.

При необходимости расчета доверительного интервала минимальное количество испытываемых образцов составляет 3 шт.

2.4 Расчет выборочного среднего и стандартного отклонения

Далее представлен пример испытаний для 5 кривошипов. При использовании модифицированного ступенчатого метода и метода оценки Диксона и Муда количество образцов равняется 10, т.е. 5 успешных и 5 неуспешных результатов:

$$\text{Количество образцов} \quad n = 10$$

Кроме того, данный метод подразделяется на два вида со следующими результатами испытаний:

$$\begin{array}{ll} \text{Менее частый результат – неуспешный} & C = 1 \\ \text{Менее частый результат – успешный} & C = 2 \end{array}$$

В рамках данного метода используются только менее частые результаты испытаний, т.е. если неуспешных результатов больше, чем успешных, то используется количество успешных результатов, и наоборот.

При использовании модифицированного ступенчатого метода количество успешных и неуспешных результатов обычно одинаково. Однако испытания могут быть и неудачными, например, количество успешных результатов может быть меньше количества неуспешных результатов, если образец с напряжением на две ступени ниже, чем в предыдущем (неуспешном) случае, разрушается сразу же. С другой стороны, если такое неожиданное преждевременное разрушение происходит после относительно большого числа циклов, то уровень напряжения ниже данного можно определить как успешный.

Подход Диксона и Муда, выведенный из теории максимального правдоподобия (который также может быть использован, особенно в ходе испытаний с небольшим количеством образцов), позволяет определить некоторые простые приближенные уравнения для расчета выборочного среднего и стандартного отклонения по результатам испытания ступенчатым методом. Выборочное среднее может быть рассчитано по формуле:

$$\overline{S}_a = S_{a0} + d \cdot \left(\frac{A}{F} - \frac{1}{2} \right) \quad \text{для } C = 1$$

$$\overline{S}_a = S_{a0} + d \cdot \left(\frac{A}{F} + \frac{1}{2} \right) \quad \text{для } C = 2$$

Стандартное отклонение может быть определено по формуле

$$s = 1.62 \cdot d \cdot \left(\frac{F \cdot B - A^2}{F^2} + 0.029 \right)$$

где:

S_{a0} — самый низкий уровень напряжения для менее частого исхода

d — ступень напряжения

$$F = \sum fi$$

$$A = \sum i \cdot fi$$

$$B = \sum i^2 \cdot fi$$

i — номер уровня напряжения

fi — количество образцов на уровне напряжения i

Формула для расчета стандартного отклонения является приближенной и может применяться при

$$\frac{B \cdot F - A^2}{F^2} > 0.3 \quad \text{и} \quad \frac{0.5 \cdot s < d < 1.5 \cdot s}{}$$

Если ни одно из этих условий не выполняется, следует рассмотреть возможность выполнения повторного испытания ступенчатым методом либо для надежности значительно увеличить величину стандартного отклонения.

Если величина ступени d значительно больше стандартного отклонения s , данная методика приводит к меньшему стандартному отклонению и немного большему выборочному среднему, нежели когда разница между ступенью и стандартным отклонением относительно мала. Соответственно, если величина ступени d значительно меньше стандартного отклонения s , то данная методика дает большее стандартное отклонение и немного меньшее выборочное среднее.

2.5 Доверительный интервал для среднего предела усталости

При повторном проведении испытаний на усталостную прочность ступенчатым методом выборочное среднее и стандартное отклонение будут, вероятнее всего, отличаться от предыдущего испытания. Поэтому за счет использования доверительного интервала для выборочного среднего необходимо обеспечить, с заданным уровнем уверенности, чтобы значения, полученные при повторных испытаниях, были выше выбранного предела усталости.

Известно, что доверительный интервал для выборочного среднего с неизвестной дисперсией имеет t -распределение (распределение Стьюдента), симметричное относительно среднего.

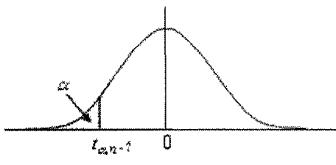


Рис. 2.5. Распределение Стьюдента

Доверительный уровень, обычно используемый для определения выборочного среднего, составляет 90 %, т.е. 90 % выборочных средних, полученных в результате повторных испытаний, будут выше значения, рассчитанного при выбранном доверительном уровне. На рисунке показано значение t для доверительного интервала $(1 - \alpha) \cdot 100$ % для выборочного среднего.

Если S_a является эмпирическим средним, а s — эмпирическим стандартным

отклонением для последовательности из n образцов, в которой значения переменных распределены нормально с неизвестным выборочным средним и неизвестной дисперсией, доверительный интервал $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ для среднего равен:

$$P\left(S_a - t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < S_{aX\%}\right) = 1 - \alpha$$

Получившийся доверительный интервал симметричен относительно эмпирического среднего выборочных значений, а нижний предел можно найти по формуле:

$$S_{aX\%} = S_a - t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

что является средним пределом усталости (совокупное значение), по которому можно определить сокращенный предел усталости, учитывающий пределы вероятности разрушения.

2.6 Доверительный интервал для стандартного отклонения

Доверительный интервал для дисперсии нормальной случайной переменной имеет распределение хи-квадрат с $n - 1$ степенями свободы.

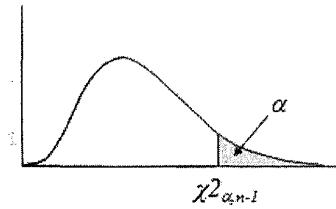


Рисунок 2.6. Распределение хи-квадрат

Доверительный уровень стандартного отклонения используется для обеспечения того, чтобы стандартные отклонения при повторных испытаниях находились ниже верхнего предела, получаемого из стандартного отклонения по результатам усталостных испытаний с определенным доверительным уровнем. На рисунке показано распределение хи-квадрат для доверительного диапазона $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ для дисперсии.

Предполагаемый результат усталостных испытаний n образцов представляет собой нормальную случайную переменную с дисперсией σ^2 и обладает эмпирической дисперсией s^2 . Доверительный интервал $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ для данной дисперсии составляет

$$P\left(\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} < \chi^2_{\alpha, n-1}\right) = 1 - \alpha$$

Доверительный интервал $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ для стандартного отклонения равен квадратному корню из верхнего предела доверительного интервала дисперсии и находится по формуле

$$s_{X^*} = \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{\alpha, n-1}}} \cdot s$$

Это стандартное отклонение (совокупное значение), по которому можно определить предел усталости, учитывающий пределы вероятности разрушения.

3. Испытания малых образцов

Под малым образцом здесь понимается один из образцов, взятых от кривошипа. Поскольку образцы используются для определения усталостной прочности галтелей, они должны отбираться из областей, находящихся близко к галтелям, как показано на рисунке 3.

Необходимо убедиться, что направление главного напряжения при испытаниях образца эквивалентно таковому для полноразмерного кривошипа. Проверку рекомендуется проводить при помощи МКЭ.

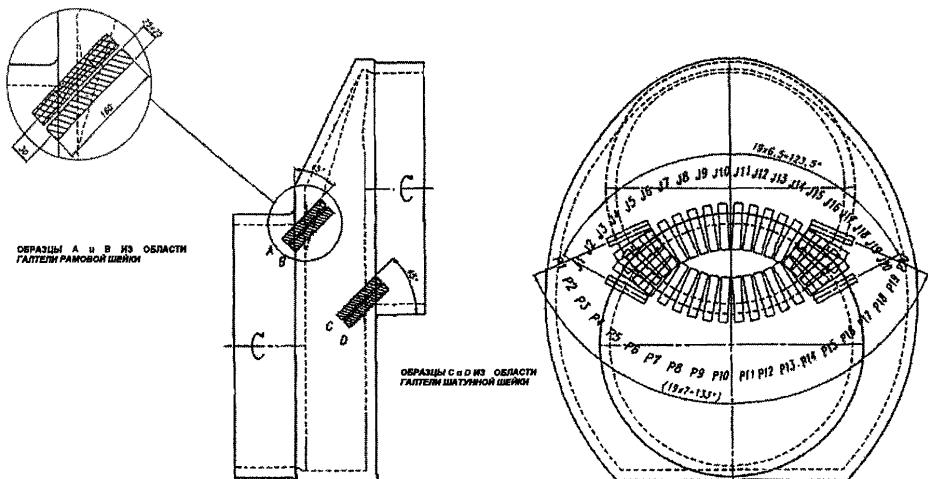


Рис. 3. Места взятия образцов из кривошипа

Статические механические качества определяются в соответствии с процедурами контроля качества.

3.1 Определение изгибной усталостной прочности

Рекомендуется использовать образцы без надреза во избежание возникновения неопределенностей, связанных с влиянием градиента напряжений. Предпочтительна методика испытаний знакопеременной нагрузкой (коэффициент асимметрии цикла напряжений $R = -1$), однако с учётом особенностей проведения испытания и для условий многоосного нагружения дополнительно могут использоваться другие методики.

Для обеспечения того, чтобы направление главного напряжения в ходе испытаний

знакопеременной нагрузкой отражало направление главного напряжения на полноразмерном кривошипе, при отсутствии дополнительной информации образец необходимо располагать под углом 45 градусов, как показано на рис. 3.

- A. Если целью испытаний является определение влияния чистоты поверхности, можно использовать образцы, взятые из области приблизительно на 120 градусов вдоль окружности (см. рис. 3).
- B. Если целью испытаний является определение влияния непрерывнойковки, образцы следует брать исключительно из области вблизи плоскости кривошипа.

3.2 Определение крутильной усталостной прочности

- A. Если образцы подвергаются испытанию на кручение, выбор образцов осуществляется по тем же критериям, что при испытаниях на изгиб. Во время оценки следует учитывать влияние градиента напряжений.
- B. Если образцы испытываются знакопеременной нагрузкой и при отсутствии дополнительной информации, образцы следует отбирать из области в пределах 45 градусов от плоскости кривошипа, для обеспечения коллинеарности направлений главных напряжений между образцами и полноразмерным кривошипом. При отборе образца на некотором расстоянии от срединной плоскости (плоскости кривошипа) коленчатого вала вдоль галтели, эту плоскость можно поворачивать вокруг центра шатунной шейки и брать несколько образцов для определения направления разрушения вследствие кручения (результаты необходимо преобразовать в соответствующие крутильные значения).

3.3 Прочие места отбора образцов

Если целью испытаний является определение усталостных характеристик, а коленчатый вал изготовлен непрерывнойковкой, могут также отбираться продольные образцы на более длинных участках вала из тех мест, откуда обычно отбираются образцы для механических испытаний. Для этого необходимо, чтобы такой длинный участок вала проходил термическую обработку в качестве составной части коленчатого вала, а его размер обеспечивал схожую с кривошипом скорость охлаждения при закалке.

При использовании результатов испытаний образцов от длинной части вала необходимо учитывать, насколько структура зерна в этой части соответствует галтелям шатунных шеек.

3.4 Сопоставление результатов испытаний

Величину усталостной прочности, полученную в ходе испытаний образцов, необходимо преобразовать в усталостную прочность полноразмерного коленчатого вала.

При использовании характеристик изгибной прочности, определенных в ходе испытаний, следует учитывать, что успешно осуществленная непрерывная ковка дает повышенные, по сравнению с другими видамиковки, характеристики, но обычно не приводит к соразмерному повышению крутильной усталостной прочности.

В подобных случаях рекомендуется дополнительно провести испытания на кручение или выполнить консервативную оценку крутильной усталостной прочности, например, без учета непрерывнойковки. Этот подход применим при использовании критерия Гафа — Полларда. Однако он неприменим при использовании критерия фон Мизеса или многоосных критериев, например, критерия Финдли.

Если выявленное соотношение между изгибной и крутильной усталостной прочностью существенно отличается от $\sqrt{3}$, вместо критерия фон Мизеса следует использовать критерий Гафа — Полларда. Кроме того, при исследовании характеристик материала в условиях многоосного нагружения необходимо учесть, что непрерывная ковка вдоль направления волокон делает материал неоднородным в части усталостной прочности, в связи с чем, характеристики материала в разных плоскостях будут разными.

Введение любых коэффициентов влияния должно быть обосновано. Поскольку коэффициенты, применяемые при масштабировании результатов испытаний для материала без поверхностного упрочнения и материала, подвергнутого поверхностному упрочнению могут быть различны, предпочтительно испытание образцов, взятых как из неупрочненного, так и из упрочненного материала.

4. Полноразмерные испытания

4.1 Гидравлическая пульсация

Для испытаний коленчатых валов трех- или четырехточечным изгибом и кручением может быть построен гидравлический испытательный стенд, позволяющий проводить испытания с любыми значениями коэффициента асимметрии цикла напряжений R .

Перед началом испытания величина прилагаемой нагрузки должна быть проверена при помощи тензометрических датчиков на гладких участках вала, а во время испытания их применение для контроля нагрузки необязательно. Также целесообразно проверять напряжения в галтелях при помощи цепочек тензометрических датчиков.

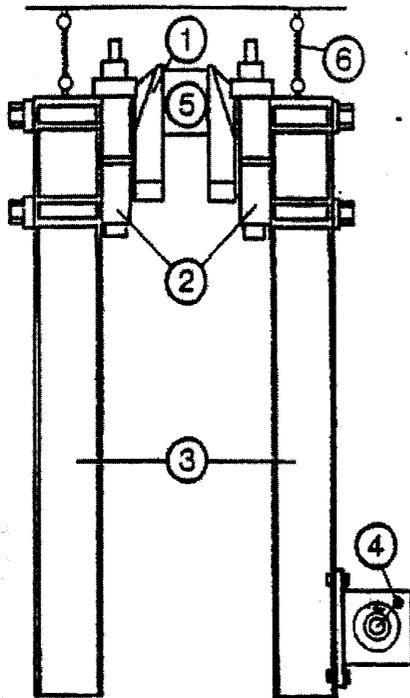
Кроме того, важно, чтобы испытательный стенд обеспечивал граничные условия согласно Приложению III (3.1 – 3.3).

Статические механические качества определяются в соответствии с процедурами контроля качества.

4.2 Резонансный стенд

Резонансный стенд с относительно невысоким энергопотреблением применяется для определения изгибной усталостной прочности, как правило, при коэффициенте асимметрии цикла напряжений $R = -1$. С учетом того, что его рабочая частота обычно относительно высока, т.е. 10^7 циклов можно достичь в течение нескольких суток. Устройство испытательного стенда представлено на рис. 4.2-1.

Величина прилагаемой нагрузки должна проверяться при помощи тензометрических датчиков на гладких участках вала. Также целесообразно проверять напряжения в галтелях при помощи цепочек тензометрических датчиков.



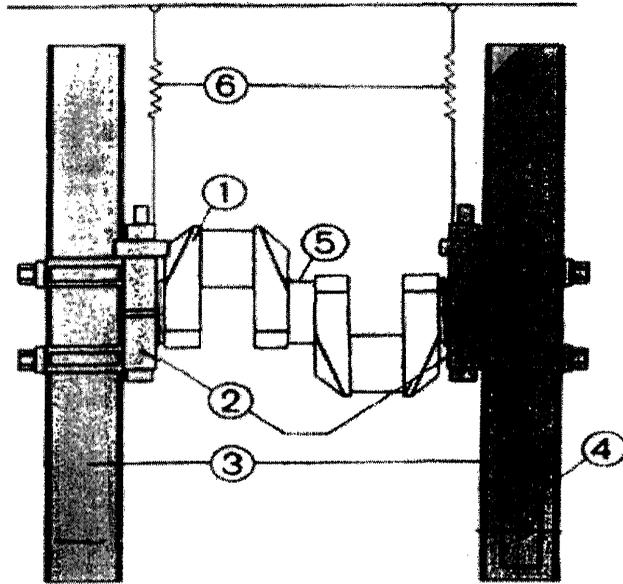
- 1 Кривошип
- 2 Опоры
- 3 Двухтавовая балка
- 4 Эксцентрик с приводом от двигателя с регулируемой частотой вращения
- 5 Тензометрический датчик для регулировки и контроля нагрузки
- 6 Упругая подвеска

Рис. 4.2-1. Пример устройства резонансного стенда для испытания изгибной нагрузкой

Зажимы вокруг рамовых шеек должны быть устроены таким образом, чтобы исключить сильное истирание, которое может привести к разрушению под краями зажимов. При наличии определенного расстояния между зажимами и галтелями рамовых шеек нагрузка будет соответствовать четырехточечному изгибу и, таким образом, будет репрезентативной и для галтелей рамовых шеек.

В двигателе галтели шатунных шеек обычно работают при коэффициенте асимметрии цикла напряжений R больше, чем -1 , а галтели рамовых шеек меньше, чем -1 . При необходимости можно обеспечить такую нагрузку за счет создания предварительного напряжения.

Устройство стенда для определения крутильной усталости показано на рисунке 4.2-2. При воздействии на кривошип крутящей нагрузки скручивание шатунной шейки заставляет рамовые шейки смещаться в боковом направлении. Если на крутильном резонансном стенде испытывается один кривошип, то рамовые шейки с закрепленными на них грузами могут вибрировать в боковом направлении, при этом боковое перемещение закрепленных грузов может быть уменьшено за счет использования двух кривошипов, особенно если кривошипы ориентированы одинаково. Однако в таком случае рамовая шейка, расположенная посередине, будет перемещаться интенсивнее.



- | | |
|---------------------|--------------------------------------|
| ① Кривошип | ④ Эксцентрик с приводом от двигателя |
| ② Зажим | ⑤ Тензометрический датчик |
| ③ Двухавровые балки | ⑥ Упругая подвеска |

Рис. 4.2-2. Пример устройства резонансного стенда для испытания двухсекционного кривошипа крутильной нагрузкой

Поскольку боковые перемещения могут вызвать определенные изгибные напряжения, на гладкие части шатунных шеек также должны быть установлены тензометрические датчики для измерения любых возможных изгибов, которые могут повлиять на результаты испытаний.

Как и в случае испытаний на изгиб, величина прилагаемой нагрузки должна проверяться при помощи тензометрических датчиков на гладких участках вала. Также целесообразно проверять напряжения в галтелях при помощи цепочек тензометрических датчиков.

4.3 Использование результатов и приемлемость коленчатого вала

Для комбинирования результатов испытаний на изгибную с крутильной усталостной прочностью при расчете приемлемости коленчатого вала (см. 2.4.11 настоящей части) подход Гафа — Полларда может применяться в следующих случаях:

В отношении диаметра шатунной шейки:

$$Q = \left(\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ВН}}{\sigma_{ВНСТ}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{ВН}}{\tau_{ВНСТ}} \right)^2} \right)^{-1}$$

где:

σ_{DWCT} – усталостная прочность при изгибных испытаниях;
 τ_{DWCT} – усталостная прочность при крутильных испытаниях.

В отношении масляного отверстия шатунной шейки:

$$Q = \left(\sqrt{\left(\frac{\sigma_{BO}}{\sigma_{DWCT}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{TC}}{\tau_{DWCT}} \right)^2} \right)^{-1}$$

где:

σ_{DWCT} – усталостная прочность при изгибных испытаниях;
 τ_{DWCT} – усталостная прочность при крутильных испытаниях.

В отношении диаметра рамовой шейки:

$$Q = \left(\sqrt{\left(\frac{\sigma_{BF}}{\sigma_{DWJT}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_G}{\tau_{DWJT}} \right)^2} \right)^{-1}$$

где:

σ_{DWJT} – усталостная прочность при изгибных испытаниях;
 τ_{DWJT} – усталостная прочность при крутильных испытаниях.

Если увеличение усталостной прочности в результате поверхностной обработки в описанных выше случаях считается схожим, достаточно испытать только наиболее критические согласно расчетам области, где поверхностная обработка не учитывалась.

5. Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам

В случае галтелей и масляных отверстий без поверхностной обработки усталостные характеристики, определенные по результатам испытаний, могут применяться к коленчатым валам схожего типа при выполнении следующих условий:

Материал:

схожий тип материала;
чистота того же или более высокого уровня;
могут быть приданы такие же механические свойства (соотношение размеров и способность к упрочнению).

• **Геометрия:**

разница во влиянии градиента напряжения из-за различия в размерах незначительна или учитывается.
направление главного напряжения эквивалентно. См. главу 3.

Производство:

схожая технология производства.

Индукционно закаленный или азотированный в газовой среде коленчатый вал будет испытывать усталость либо на поверхности, либо в зоне перехода к сердцевине. Данные о поверхностной усталостной прочности, полученные в результате усталостных испытаний полноразмерных кривошипов, могут использоваться в отношении коленчатых валов такой же или схожей конструкции, если усталость первоначально появляется на поверхности. Схожесть конструкции означает схожий тип материала и поверхностную твердость, а также значение радиуса галтели и глубины упрочнения в пределах приблизительно $\pm 30\%$ относительно аналогичных значений испытанного коленчатого вала.

Появление усталости в переходной зоне может произойти либо под поверхностью (т.е. под твердым слоем), либо на поверхности там, где заканчивается закалка. Усталостная прочность в зоне перехода к сердцевине может быть определена посредством описанных выше испытаний при условии, что появление усталости произошло в зоне перехода к сердцевине. Испытания, проведенные только на материале сердцевины, не будут считаться репрезентативными, поскольку они не учитывают остаточные напряжения растяжения в переходной зоне.

Также необходимо отметить, что ряд исследований показали, что предел усталости может снижаться в зоне сверхбольшого числа циклов с образованием подповерхностных трещин из-за наличия захваченного водорода, скапливающегося за счет диффузии в области некоторых внутренних дефектов, выступающих в роли точек зарождения. В таких случаях следует снижать предел усталости на несколько процентов на каждый порядок циклов свыше 10^7 . При высоком содержании водорода возможно применение снижения в размере 5 % на каждый порядок циклов.

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАСЧЕТУ ГАЛТЕЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ И КРАЕВ МАСЛЯНЫХ ОТВЕРСТИЙ (СМ. УТ МАКО М53)

Содержание

1. Введение
2. Определение поверхностной обработки
 - 2.1 Методы поверхностной обработки
3. Принципы расчета
 - 3.1 Оценка местных напряжений в галтелях
 - 3.2 Расчет напряжений в краях масляных отверстий
 - 3.3 Критерий допустимости
4. Индукционная закалка
 - 4.1 Местная усталостная прочность
5. Азотирование
 - 5.1 Местная усталостная прочность
6. Холодная формовка
 - 6.1 Поверхностное упрочнение чеканкой с использованием шара
 - 6.1.1 Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам
 - 6.2 Холодная обкатка
 - 6.2.1 Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам

1. Введение

Настоящее Приложение содержит указания по расчету краев масляных отверстий и галтелей с поверхностной обработкой. Даны пояснения по учету различных способов обработки, а также представлены эмпирические формулы для расчетов. Консервативный эмпирический путь выбран намеренно с целью повышения надежности расчета.

Необходимо учитывать, что при наличии следует использовать результаты измерений или более точные данные. Тем не менее, в случае большого разброса значений (например, остаточных напряжений) величины должны выбираться с той стороны диапазона, которая обеспечивает заведомо большую консервативность.

2. Определение поверхностной обработки

Термин «поверхностная обработка» охватывает термическую, химическую и механическую обработку, выражающуюся в придании материалам неомогенности свойств (твердости, химического состава, остаточных напряжений) в направлении от поверхности к сердцевине материала.

2.1 Методы поверхностной обработки

Данный перечень содержит возможные методы обработки и данные об их влиянии на свойства, определяющие усталостную прочность.

Таблица 2.1

Методы поверхностной обработки и характеристики, на которые они оказывают воздействие

Метод обработки	На что воздействует
Индукционная закалка	Твердость и остаточные напряжения
Азотирование	Химический состав, твердость и остаточные напряжения
Цементация	Химический состав, твердость и остаточные напряжения
Закалка в штампе (без отпуска)	Твердость и остаточные напряжения
Холодная обкатка	Остаточные напряжения
Поверхностное упрочнение чеканкой	Остаточные напряжения
Дробеструйная обработка	Остаточные напряжения
Лазерное поверхностное упрочнение	Остаточные напряжения
Чеканка шаром	Остаточные напряжения

П р и м е ч а н и е. Важно отметить, что поскольку для судовых двигателей применимыми считаются только индукционная закалка, азотирование, холодная обкатка и чеканка, прочие методы, а также совместное применение двух или более вышеперечисленных методов, в

настоящем документе не рассматриваются. Кроме того, закалка в штампе может рассматриваться аналогично индукционной закалке.

3. Принципы расчета

Основным принципом является то, что величины знакопеременных рабочих напряжений должны быть меньше величин местной усталостной прочности (с учетом эффекта поверхностной обработки), при этом возможно возникновение нераспространяющихся трещин, подробную информацию см. также в 6.1. Далее выполняется деление на заданный коэффициент запаса прочности. Данный принцип применяется к целым галтелям и краям масляных отверстий, а также к подповерхностному слою до глубины ниже зоны влияния обработки, т.е. распространяется вплоть до сердцевины.

При рассмотрении местной усталостной прочности необходимо учитывать влияние местной твердости, остаточного напряжения и среднего рабочего напряжения. Влияние «эффекта гигациклов», в особенности на процесс возникновения подповерхностных трещин, должно быть компенсировано установленным запасом прочности.

Крайне необходим тщательный учет величины площади подвергаемой обработке поверхности в зонах концентрации напряжений. В зоне перехода от упрочненной поверхности к неупрочняемой возникают значительные остаточные напряжения растяжения.

В связи с этим образуются «слабые точки», что является значимым, если они находятся в области повышенных напряжений.

Необходимо знать величины переменных и средних рабочих напряжений для всей области концентрации напряжений и для глубины, составляющей приблизительно 1,2 глубины обработки. На рисунке ниже показано использование данного принципа для индукционной закалки. Ось x – направлена либо в глубину (в направлении перпендикулярно поверхности), либо вдоль контура галтели.

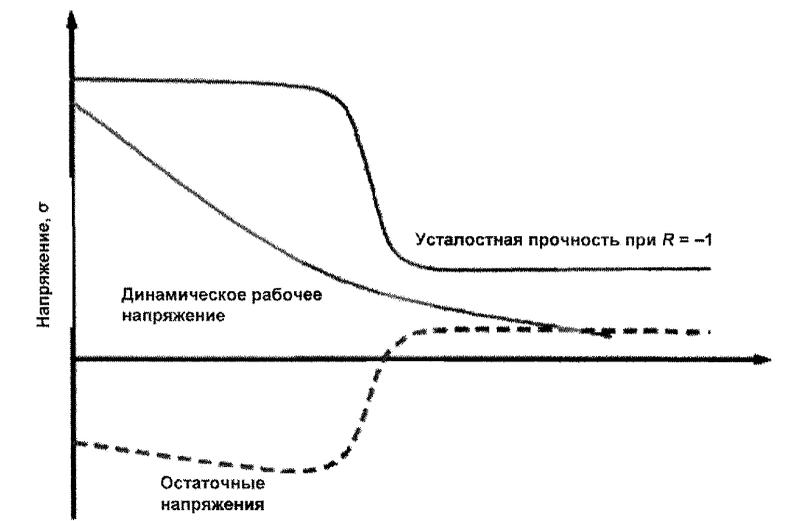


Рис. 3. Общие принципы зависимости напряжений от глубины

Критерий допустимости должен применяться ступенчато в направлении от поверхности к сердцевине и от точки максимальной концентрации напряжений вдоль контура поверхности галтели до щеки.

3.1 Оценка местных напряжений в галтелях

Необходимо знать напряжения вдоль контура галтели и в подповерхностном слое до глубины, несколько больше глубины упрочненного слоя. Такие данные, как правило, могут быть определены методом конечно-элементного анализа, как описано в Приложении III. При этом элементы в подповерхностном слое при анализе должны иметь те же размеры, что и на поверхности. При упрочнении только шатунной шейки малые элементы при выполнении анализа следует распространить вдоль поверхности до твердого слоя.

Если проведение анализа МКЭ невозможно, для коленчатых валов, изготовленных из стали может быть использован упрощенный метод. Он может быть основан на определенных эмпирическим путем ККН, как описано в 2.4.6 настоящей части (при условии нахождения в диапазоне применимости этого метода), и градиенте относительных напряжений, обратно пропорциональном радиусу галтели. Напряжения изгиба и кручения должны рассматриваться отдельно. К сочетанию вышеперечисленных параметров применяется критерий допустимости.

Подповерхностные напряжения в переходной зоне при минимальной глубине упрочнения можно определить через местные ККН вдоль оси, перпендикулярной к поверхности галтели. Функции $\alpha_{B-мест.}$ и $\alpha_{T-мест.}$ имеют различную форму по причине различия в градиентах напряжений.

На поверхности могут применяться ККН α_B и α_T . Местные $\alpha_{B-мест.}$ и $\alpha_{T-мест.}$ уменьшаются с глубиной. Относительные градиенты напряжений на поверхности зависят от типа концентратора напряжений, однако для галтелей шатунных шеек они могут быть упрощены до $2/R_H$ при изгибе и $1/R_H$ при кручении. Для галтелей рамовых шеек выполняются аналогичные действия с использованием R_G и D_G . Номинальные напряжения принимаются линейными от поверхности до средней точки щеки между галтелью шатунной шейки и галтелью рамовой шейки при изгибе и до центров шатунной и рамовой шейки при кручении.

В таком случае, местные ККН являются функцией глубины t в соответствии с уравнением (3.1-1) и рис. 3.1-1 при изгибе и уравнением (3.1-2) и рис. 3.1-2 при кручении.

$$\alpha_{B-мест} = (\alpha_B - 1) \cdot e^{\frac{-2t}{R_H}} + 1 - \left(\frac{2 \cdot t}{\sqrt{W^2 + S^2}} \right)^{\frac{0.6}{\alpha_B}} \quad (3.1-1)$$

$$\alpha_{T-мест} = (\alpha_T - 1) \cdot e^{\frac{-t}{R_H}} + 1 - \left(\frac{2 \cdot t}{D} \right)^{\frac{1}{\alpha_T}} \quad (3.1-2)$$

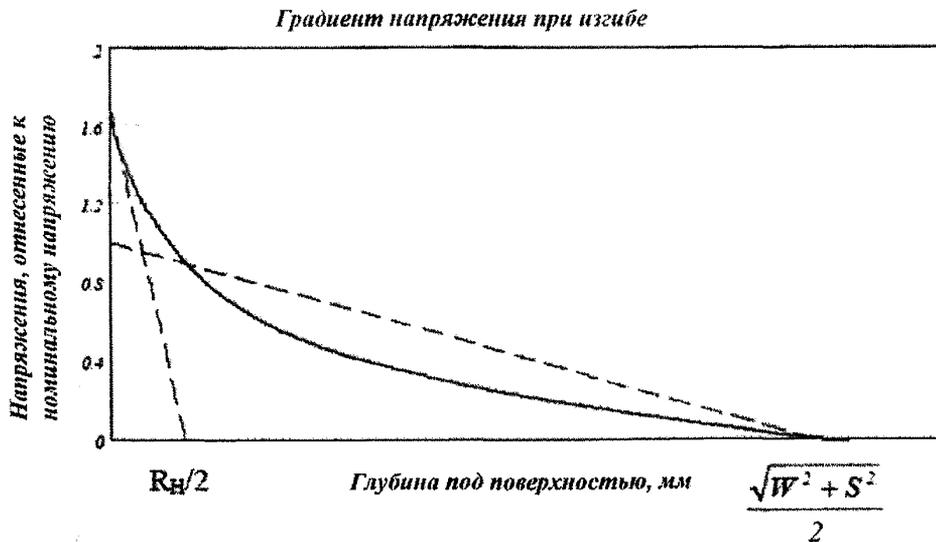


Рис. 3.1-1. ККН при изгибе в галтели шатунной шейки в зависимости от глубины. Соответствующий ККН для галтели рамовой шейки может быть определен путем замены R_H на R_G

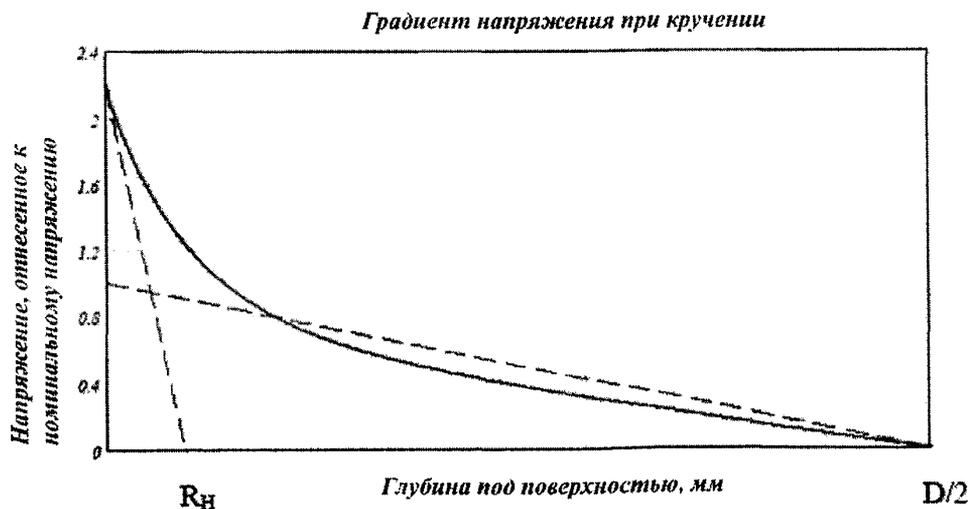


Рис. 3.1-2. ККН при кручении в галтели шатунной шейки в зависимости от глубины. Соответствующий ККН для галтели рамовой шейки может быть определен путем замены R_H на R_G и D на D_G

В случае, если упрочнена только шатунная шейка, а край упрочненной области расположен к галтели ближе, чем трехкратная максимальная глубина упрочнения, для определения фактических напряжений в переходной зоне необходимо использовать МКЭ.

3.2 Расчет напряжений в краях масляных отверстий

Напряжения в краях масляных отверстий также могут рассчитываться при помощи МКЭ. Размер элемента не должен превышать $1/8$ диаметра масляного отверстия D_o , а качество элементной сетки должно отвечать критериям, приведенным в Приложении III. Конечно-элементная сетка должна продолжаться в радиальном направлении достаточно далеко за пределы глубины упрочнения.

В качестве нагрузок в МКЭ используется крутящий момент (см. 3.1 Приложения III) и изгибающий момент при четырехточечном изгибе (см. 3.2 Приложения III).

Если проведение анализа МКЭ невозможно, для коленчатых валов, изготовленных из стали может быть использован упрощенный метод. При этом могут использоваться определенные эмпирическим путем ККН (см. 2.4.6 настоящей части) (при условии нахождения в диапазоне применимости этого метода). Изгибные и крутильные напряжения в точке максимальных напряжений объединяются в соответствии с 2.4.8 настоящей части.

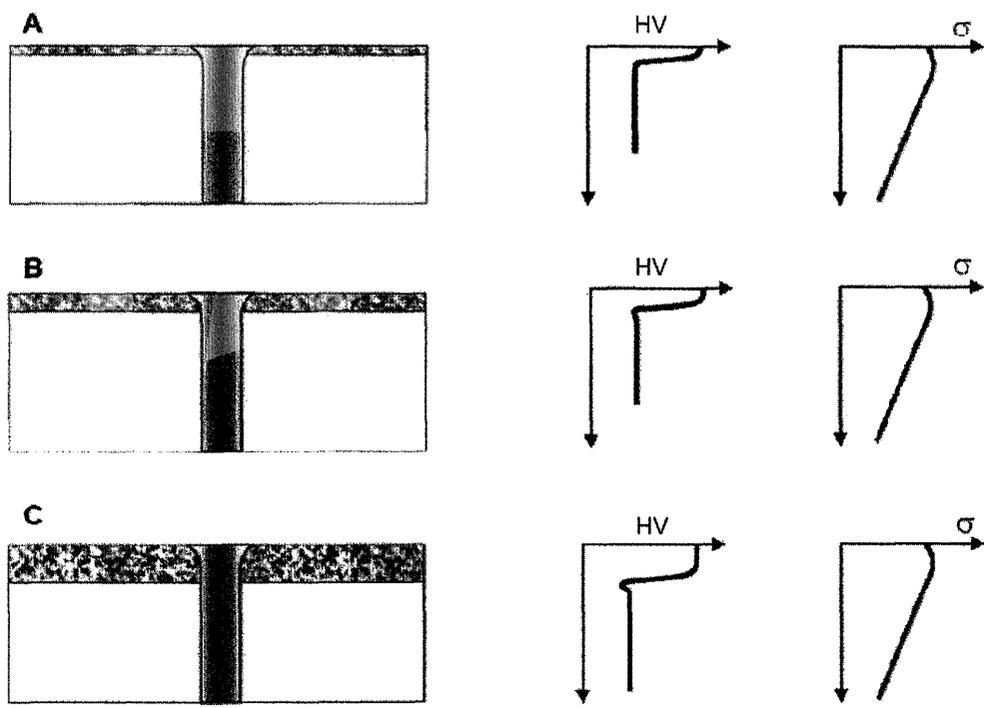


Рис. 3.2. Напряжения и твердости в индукционно закаленных краях масляных отверстий

На рис. 3.2 показан характер изменения твердости в переходной зоне между «твердой» и «мягкой» зонами материалом. Характер изменения зависит, в том числе, и от

температуры отпуска после закалки (при термообработке типа «закалка + отпуск»).

Максимальное напряжение на краях отверстий имеет место в месте окончания скругления кромки. В пределах этой зоны напряжение падает практически линейно с расстоянием до центра шатунной шейки. Как показано на рис. 3.2, при неглубоком (А) и среднем (В) упрочнении переходная точка практически совпадает с точкой максимальных напряжений. При глубоком упрочнении переходная точка оказывается вне точки максимальных напряжений, и местное напряжение можно определить как долю, равную $(1 - 2tH/D)$ от максимального напряжения, где tH – глубина упрочнения.

Подповерхностные напряжения в переходной зоне (при минимальной глубине упрочнения) можно определить через местные ККН вдоль оси, перпендикулярной к поверхности края масляного отверстия. Эти функции $\gamma_{B-мест.}$ и $\gamma_{T-мест.}$ имеют различную форму по причине различия в градиентах напряжений.

На поверхностях могут применяться ККН γ_B и γ_T . Местные ККН $\gamma_{B-мест.}$ и $\gamma_{T-мест.}$ уменьшаются с глубиной. Относительные градиенты напряжений на поверхности зависят от типа концентратора напряжений, однако для краев масляных отверстий шатунной шейки они могут быть упрощены до $4/D_o$ при изгибе и $2/D_o$ при кручении. В таком случае местные ККН являются функцией глубины t :

$$\gamma_{B-мест.} = (\gamma_B - 1) \cdot e^{\frac{-4t}{D_o}} + 1 \quad (3.2-1)$$

$$\gamma_{T-мест.} = (\gamma_T - 1) \cdot e^{\frac{-2t}{D_o}} + 1 \quad (3.2-2)$$

3.3 Критерий допустимости

Критерий допустимости конструкции коленчатых валов основывается на соответствии усталостной прочности. В главе 2.4 настоящей части соотношение эквивалентного знакопеременного напряжения и усталостной прочности сравнивается с критерием допустимости $Q > 1,15$ для краев масляных отверстий, галтелей шатунных шеек и галтелей рамовых шеек коленчатых валов, изготовленных из стали. Этот критерий также должен распространяться на области с поверхностной обработкой, вне зависимости от того, анализируется поверхность или переходная зона.

4. Индукционная закалка

Обычно в технических требованиях к твердости указывают диапазон величин поверхностной твердости, т.е. минимальное и максимальное значения, минимальную и максимальную протяженность в пределах галтели или по всей галтели, а также минимальную и максимальную глубину вдоль контура галтели. При этом применяются шкалы значений твердости по Виккерсу в диапазоне HV0,5...HV5.

Глубина индукционной закалки определяется как глубина, на которой твердость материала составляет не менее 80 % от минимальной заданной поверхностной твердости.

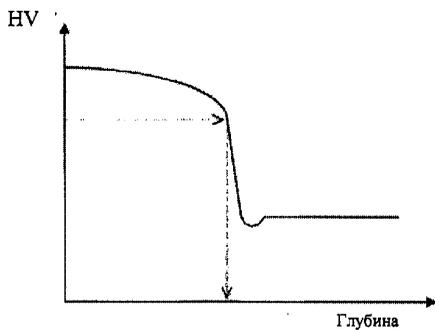


Рис. 4-1. Типовой график зависимости твердости от глубины. Стрелки указывают на глубину закалки

Показан возможный характер распределения твердости в зоне перехода к сердцевине; показанная зона снижения твердости может оказаться «слабой» точкой: в ней может быть снижена местная прочность и могут возникнуть остаточные напряжения растяжения.

При упрочнении одних только шатунных или рамовых шеек минимальное расстояние до галтели должно назначаться с учетом влияния напряжений растяжения в зоне термического влияния (см. рис. 4.-2).

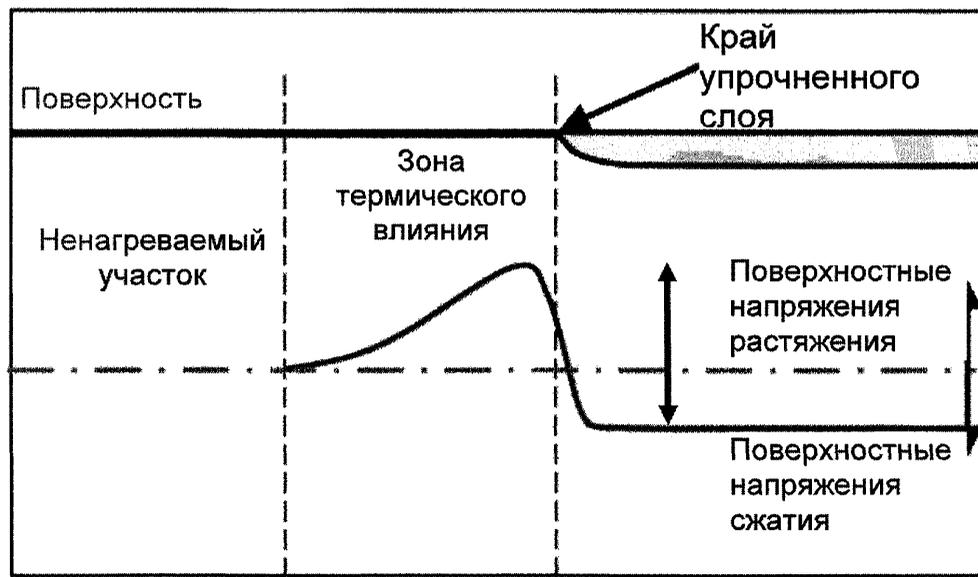


Рис. 4 -2. Остаточные напряжения вдоль поверхности шатунной шейки и галтели

Если профиль «твердость-глубина» и остаточные напряжения неизвестны или не заданы, можно принять следующее:

профиль твердости включает два слоя (см. рис. 4-1):

постоянная твердость от поверхности до переходной зоны;
постоянная твердость от переходной зоны до сердцевины;

остаточные напряжения в твердой зоне составляют 200 МПа (сжатие);

твердость переходной зоны – 90% от твердости сердцевины, в случае отсутствия неравномерного падения твердости в зоне перехода к сердцевине, показанной на рис. 4-1;

максимальное остаточное напряжение (по фон Мизесу) в переходной зоне составляет 300 МПа (растяжение).

Если края упрочнения шатунной или рамовой шейки находятся близко к галтели, то должно учитываться влияние остаточных напряжений растяжения. Если минимальное расстояние между краем упрочнения и началом галтели в более чем в 3 раза превышает максимальную глубину упрочнения, то такое влияние можно не учитывать.

4.1 Местная усталостная прочность

Индукционно закаленный коленчатый вал будет испытывать усталость либо на поверхности, либо в зоне перехода к сердцевине. Усталостная прочность (для поверхности и для переходной зоны) может быть рассчитана по результатам испытаний на усталостную прочность полноразмерного коленчатого вала согласно Приложению IV. В случае с переходной зоной, появление усталости может произойти либо под поверхностью (т.е. под твердым слоем), либо на поверхности там, где заканчивается закалка.

Испытания, проведенные только на материале сердцевины, не считаются репрезентативными, поскольку они не учитывают остаточные напряжения растяжения в переходной зоне.

В качестве альтернативы, усталостная прочность поверхности для коленчатых валов, изготовленных из стали может быть определена эмпирически как описано далее (где HV – это поверхностная твердость по Виккерсу). В уравнении (4.1-1) заложено консервативное значение, которое предполагает, что усталостная прочность учитывает влияние остаточного напряжения. Результирующее значение применимо при коэффициенте асимметрии цикла напряжений $R = -1$:

$$\sigma_{\text{Поверх.}} = 400 + 0.5 \cdot (HV - 400) \quad [\text{МПа}] \quad (4.1-1)$$

Следует отметить, что влияние среднего напряжения у индукционно закаленных сталей может быть значительно выше, чем у закаленных и отпущенных.

Усталостную прочность в переходной зоне без учета неравномерного падения твердости в зоне перехода к сердцевине, показанной на рис. 4-1 следует определять по уравнению, приведенному в 2.4.9 настоящей части. Для галтелей рамовых и, соответственно, шатунных шеек действует следующая формула:

$$\sigma_{\text{Пн.з., ш.ш.}} = \pm K \cdot (0.42 \cdot \sigma_B + 39.3) \cdot \left[0.264 + 1.073 \cdot Y^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \cdot \sqrt{\frac{1}{Y}} \right] \quad (4.1-2)$$

где:

$Y = D_G$ и $X = R_G$ для галтели рамовой шейки,
 $Y = D$ и $X = R_H$ для галтели шатунной шейки,
 $Y = D$ и $X = D_0/2$ для края масляного отверстия.

Влияние остаточного напряжения в (4.1-2) не учитывается.

При анализе усталости подповерхностного слоя (ниже упрочненного слоя) неучет остаточных напряжений растяжения следует учесть путем вычета 20 % от полученного выше значения. Эти вычитаемые 20 % соответствуют влиянию среднего напряжения в легированной закаленной и отпущенной стали с остаточным напряжением растяжения 300 МПа. Для сталей низкой прочности данная процентная величина должна быть выше.

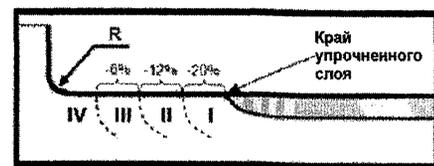
Если достоверно известно, что остаточные напряжения ниже, то следует учитывать их фактическое значение.

При анализе усталости поверхности вблизи зоны упрочнения – т.е. в зоне термического влияния (см. рисунок 42.) – влияние остаточных напряжений растяжения может быть учтено вычитанием определенной процентной величины (согласно табл. 4.1) из значения, рассчитанного по вышеприведенной формуле.

Таблица 4.1

Влияние остаточных напряжений растяжения на заданном расстоянии между краем упрочненной зоны и галтелью

I.	0...1,0 макс. глубин закалки:	20%
II.	1,0...2,0 макс. глубин закалки:	12%
III.	2,0...3,0 макс. глубин закалки:	6%
IV.	3.0 и больше макс. глубин закалки:	0%



5. Азотирование

В технических требованиях к твердости должен быть указан диапазон величин поверхностной твердости (минимум и максимум) и минимальное и максимальное значение глубины. В настоящем разделе рассматривается только газовое азотирование. При этом применяются шкалы значений твердости по Виккерсу в диапазоне HV0,5...HV5.

Для целей настоящего раздела глубина азотирования tN определяется как глубина, на которой твердость материала превышает твердость сердцевины на 50 HV.

Профиль закалки должен быть назначен вплоть до самой сердцевины. Если он неизвестен, его можно определить эмпирически по следующим формулам:

$$HV(t) = HV_{сердц.} + (HV_{поверхн.} - HV_{сердц.}) \cdot \left(\frac{50}{HV_{поверхн.} - HV_{сердц.}} \right)^{\left(\frac{t}{t_N} \right)^2} \quad (5)$$

где:

t – местная глубина,

$HV(t)$	–	твердость на глубине t ,
$HV_{сердц.}$	–	твердость сердцевины (минимальная),
$HV_{поверхн.}$	–	поверхностная твердость (минимальная),
tN	–	наименьшая глубина азотирования.

5.1 Местная усталостная прочность

Важно отметить, что при азотировании коленчатого вала усталость возникает либо на поверхности, либо в зоне перехода к сердцевине. Поэтому усталостную прочность можно определить проведением испытаний, как указано в Приложении IV.

В качестве альтернативного варианта, для коленчатых валов, изготовленных из стали поверхностную усталостную прочность (главное напряжение) для материала с поверхностной твердостью не менее 600 HV можно консервативно определить эмпирическим путем:

$$\sigma_{f_{поверх.}} = 450 \text{ МПа} \quad (5.1-1)$$

Использование зависимости (5.1-1) допустимо при использовании предположения о том, что усталостная прочность учитывает влияние остаточного напряжения на поверхности, а коэффициент асимметрии цикла напряжений $R = -1$.

Усталостная прочность в переходной зоне может быть определена по уравнению в 2.4.9 настоящей части. Для галтелей шатунных и, соответственно, рамовых шеек действует следующая формула:

$$\sigma_{f_{п.з., ш.ш.}} = \pm K \cdot (0.42 \cdot \sigma_B + 39.3) \cdot \left[0.264 + 1.073 \cdot Y^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \cdot \sqrt{\frac{1}{X}} \right] \quad (5.1-2)$$

где:

$Y = D_G$ и $X = R_G$ для галтели рамовой шейки,
 $Y = D$ и $X = R_H$ для галтели шатунной шейки,
 $Y = D$ и $X = D_G/2$ для края масляного отверстия.

Влияние остаточного напряжения в (5.1-2) не учитывается.

В отличие от индукционно-закаляемых, азотируемые изделия не имеют столь четко выраженной зоны перехода к сердцевине. При высоком уровне остаточных напряжений сжатия на поверхности, уравновешивающие их напряжения растяжения в сердцевине умеренны вследствие небольшой глубины. При анализе усталости подповерхностного слоя неучет остаточных напряжений растяжения в зоне перехода и ниже нее можно не принимать во внимание ввиду равномерного профиля изменения твердости при азотировании.

Несмотря на то, что в общем случае расчет следует выполнять по всему профилю изменения твердости, он может быть ограничен и более простым подходом – анализом поверхности и определением условной точки перехода, за которую может быть принята глубина, на которой значение местной твердости приблизительно на 20 HV выше твердости сердцевины. При этом в расчетах необходимо использовать свойства материала сердцевины, а напряжения в месте перехода к сердцевине можно

рассчитывать по формулам для местных ККН и используя $t = 1,2 tN$.

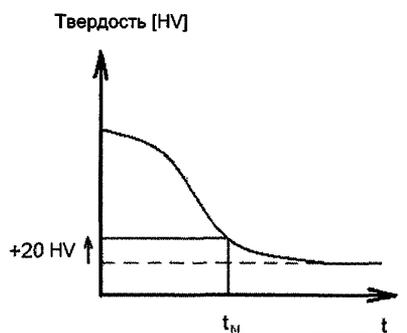


Рис. 5.1. Эскиз условной точки перехода по глубине (t)

6. Холодная формовка

Преимуществом поверхностного упрочнения чеканкой или холодной обкатки галтелей является создание остаточного напряжения сжатия на сильно нагружаемых участках. Притом, что остаточные поверхностные напряжения определяются рентгенографическим методом, а остаточные подповерхностные напряжения — нейтроннографическим, достоверно оценить местную усталостную прочность невозможно, в связи с чем её необходимо определять испытаниями на усталость с учётом требований Приложения IV.

Такое испытание, как правило, выполняется с четырехточечным изгибом при коэффициенте асимметрии цикла напряжений $R = -1$. По результатам испытаний определяется изгибная усталостная прочность, поверхностная или подповерхностная, в зависимости от режима разрушения, принимаемая в качестве репрезентативной усталостной прочности для данного вида нагружения в зоне галтели.

Соотношение крутильной и изгибной усталостной прочности в зоне галтели может значительно отличаться от отношения равного $\sqrt{3}$, применяемого в критерии фон Мизеса. Это вызвано тем, что глубина влияния формовки, достаточная для исключения появления изгибной подповерхностной усталости, может оказаться недостаточной для исключения подповерхностной усталости при кручении, а также эффектом увеличения сильно нагруженной области.

Результаты, полученные при испытании полноразмерного коленчатого вала, могут быть применены для коленчатых валов других размеров при условии, что их материал с учетом количества легирующих элементов и процесса термообработки относится к одному и тому же типу и что выполняется формовка, позволяющая добиться схожего уровня остаточных напряжений сжатия как на поверхности, так и в глубине материала, т. е. протяженность и глубина холодной формовки должны быть пропорциональны радиусу галтели.

6.1 Поверхностное упрочнение чеканкой с использованием шара

Усталостная прочность может быть определена при проведении испытаний полноразмерного коленчатого вала или эмпирическими методами, если они обеспечивают большую консервативность. Если исследуются и изгибная, и крутильная усталостная прочность, и оказывается, что их соотношение отличается от $\sqrt{3}$, то

применение критерия фон Мизеса следует исключить.

Если исследуется только изгибная усталостная прочность, то крутильную усталостную прочность нужно оценивать консервативно. Если изгибная усталостная прочность оказывается на x % выше усталостной прочности неупрочненного материала, то крутильную усталостную прочность следует принимать не более чем на $2/3$ от x % выше таковой у неупрочненного материала.

После чеканки самое высокое остаточное напряжение сжатия образуется в подповерхностном слое. Поэтому, в зависимости от пробной нагрузки при испытаниях на усталость и от градиента напряжений, в поверхности могут создаваться рабочие напряжения выше уровня местной усталостной прочности. Это может вызывать в ходе испытаний на усталость появление небольших волосных трещин, которые из-за характерного профиля остаточного напряжения сжатия не будут распространяться при дальнейших циклах нагружения и (или) при дальнейшем небольшом увеличении пробной нагрузки в связи с тем, что высокие остаточные напряжения сжатия под поверхностью останавливают развитие небольших поверхностных трещин (см. линию градиентной нагрузки 2 на рис. 6.1).

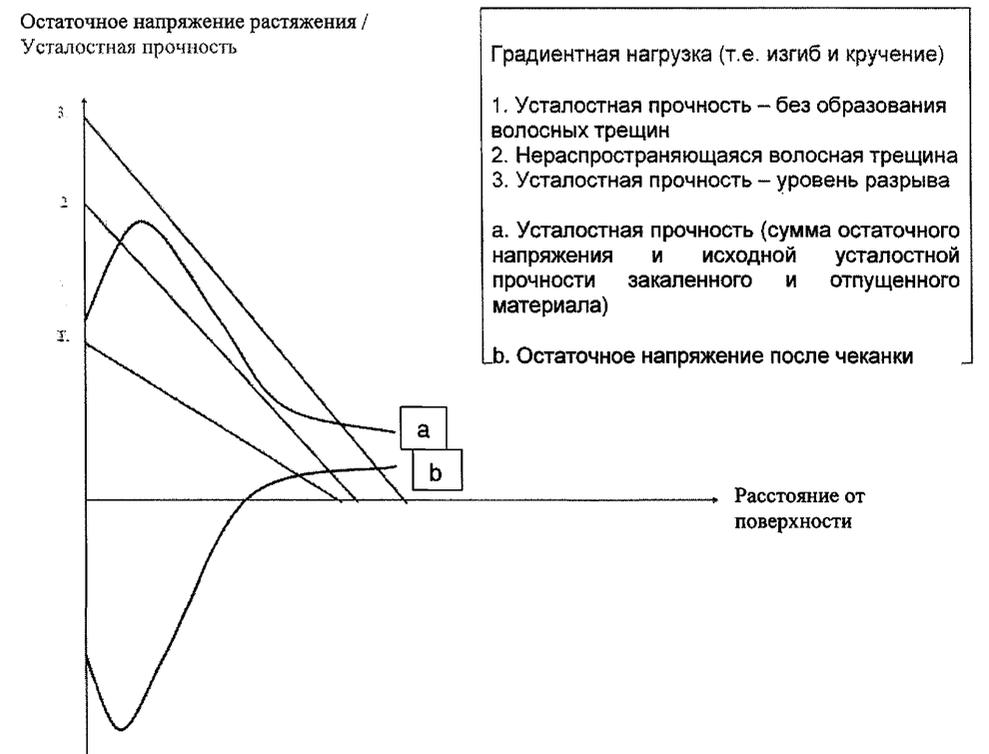


Рис. 6.1. Рабочие и остаточные напряжения под поверхностью после чеканки. Прямые линии 1...3 обозначают возможные градиенты напряжений, вызванных нагрузкой

При усталостных испытаниях полноразмерного коленчатого вала эти небольшие волосные трещины не должны рассматриваться как способные вызвать разрушение. Для определения уровня разрушающих нагрузок следует учитывать только те трещины,

которые вызваны усталостью и при этом способны привести к разрушению (при которых нужно прекращать испытание). Это так же применимо к случаю чеканки индукционно-закаленных галтелей.

В целях увеличения усталостной прочности индукционно-закаленных галтелей коленчатых валов их можно чеканить после индукционной закалки и отпуска до необходимой поверхностной твердости. В этом случае может потребоваться назначение усилия удара при чеканке в зависимости от твердости поверхностного слоя, а не от предела прочности основного материала. Влияние на усталостную прочность галтелей индукционной закалки с последующей чеканкой определяется по результатам испытаний полноразмерного коленчатого вала.

6.1.1 Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам

Сведения об изменении усталостной прочности при использовании поверхностного упрочнения чеканкой могут быть использованы при расчете других коленчатых валов при условии выполнения следующих требований:

размер шара, отнесенный к радиусу галтели вала, должен отличаться не более чем на ± 10 % от прошедшего испытание коленчатого вала;

область вала, подвергнутая поверхностному упрочнению должна быть эквивалентна аналогичной области испытанного вала, либо превышать ее;

угловая протяженность контура галтели, отнесенная к радиусу галтели, должна отличаться не более чем на ± 15 % от прошедшего испытание коленчатого вала и должна быть расположена так, чтобы охватывать зону концентрации напряжений при работе двигателя;

применяется аналогичный материал с учетом количества легирующих элементов и процесса термообработки;

скорость подачи шаров должна находиться в той же пропорции к радиусу;

усилие, прилагаемое к шару, должно быть пропорционально твердости исходного материала (если твердости различаются);

усилие, прилагаемое к шару, должно быть пропорционально квадрату его радиуса.

6.2 Холодная обкатка

Усталостная прочность может быть определена при проведении испытаний полноразмерного коленчатого вала или эмпирическими методами, если они обеспечивают большую консервативность. Если исследуются и изгибная, и крутильная усталостная прочность, и оказывается, что их соотношение отличается от $\sqrt{3}$, то применение критерия фон Мизеса следует исключить.

Если исследуется только изгибная усталостная прочность, то крутильную усталостную прочность нужно оценивать консервативно. Если изгибная усталостная прочность оказывается на $x\%$ выше усталостной прочности неупрочненного материала, то крутильную усталостную прочность следует принимать не более чем на $2/3$ от $x\%$ выше таковой у неупрочненного материала.

6.2.1 Применение имеющихся результатов к аналогичным коленчатым валам

Сведения об изменении усталостной прочности при использовании поверхностного упрочнения холодной обкаткой могут быть использованы при расчёте других коленчатых валов при условии выполнения следующих требований:

область вала, подвергнутая поверхностному упрочнению должна быть эквивалентна аналогичной области испытанного вала, либо превышать ее;

угловая протяженность контура галтели, отнесенная к радиусу галтели, должна отличаться не более чем на $\pm 15\%$ от прошедшего испытание коленчатого вала и должна быть расположена так, чтобы охватывать зону концентрации напряжений при работе двигателя;

применяется аналогичный материал с учетом количества легирующих элементов и процесса термообработки;

усилие, прилагаемое к ролику, должно рассчитываться так, чтобы обеспечить как минимум такую же относительную (т.е. отнесенную к радиусу галтели) глубину обработки.

РУКОВОДСТВО ПО РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В КРАЯХ МАЯСЛЯНЫХ ОТВЕРСТИЙ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Содержание

1. 1. Общие положения
2. Требования к модели
 - 2.1 Рекомендации для элементной сетки
 - 2.2 Материал
 - 2.3 Критерии качества элементной сетки
 - 2.3.1 Критерий главных напряжений
 - 2.3.2 Критерий осредненности/неосредненности напряжений
3. Случаи нагрузки и оценка уровня напряжений
 - 3.1 Кручение
 - 3.2 Изгиб

1. Общие положения

Целью данного анализа является описание применения – вместо аналитического расчета – метода конечных элементов (МКЭ) для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН) в краях масляных отверстий. Аналитический метод основывается на эмпирических формулах, полученных из результатов тензометрии или поляризационно-оптических измерений различного круглого проката. Использование этих формул за пределами их применимости по любому из параметров может привести к ошибкам и в том, и в другом направлении, поэтому рекомендуется использовать МКЭ.

ККН, рассчитанный в соответствии с положениями настоящего документа, определяется как отношение напряжений, рассчитанных МКЭ, к номинальным напряжениям, рассчитанным аналитическим методом.

При использовании метода для проведения расчетов в соответствии с требованиями главы 2.4 настоящей части, следует выполнять расчет главных напряжений.

Анализ должен проводиться в рамках линейно-упругой конечно-элементной модели; во всех случаях нагружения следует применять единичные нагрузки соответствующей величины.

Рекомендуется проверять элементную точность используемого конечно-элементного решателя, например, посредством моделирования простой геометрии с последующим сравнением напряжений, полученных из МКЭ, с результатами аналитического расчета.

Вместо МКЭ может также использоваться метод граничных элементов.

2. Требования к модели

Основные рекомендации и допущения при построении конечно-элементной модели представлены в 2.1. Законченная конечно-элементная модель должна соответствовать одному из критериев, представленных в 2.3.

2.1 Рекомендации для элементной сетки

Чтобы обеспечить качество сетки, конечно-элементную модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений следует строить в соответствии со следующими рекомендациями:

модель должна описывать один полноценный кривошип от осевой линии одного рамового подшипника до осевой линии соседнего рамового подшипника.

Вблизи краев используются элементы следующих типов:

- 10-узловые четырехгранные элементы;
- 8-узловые шестигранные элементы;
- 20-узловые шестигранные элементы.

Вблизи краев масляных отверстий используются следующие характеристики сетки:

максимальный размер элемента $a = r/4$ по всей галтели края и в направлении масляного отверстия (в случае использования 8-узловых шестигранных элементов они должны быть еще меньшего размера для соответствия критериям качества элементной сетки).

Рекомендуемые размеры элементов в направлении глубины галтели:

толщина первого слоя равна размеру элемента a ;
толщина второго слоя равна размеру элемента $2a$;
толщина третьего слоя равна размеру элемента $3a$.

Как правило, остальная часть кривошипа должна обеспечивать численную устойчивость решателя.

Сверления и отверстия, предназначенные для облегчения конструкции, следует моделировать.

Применение подмоделей допускается при соблюдении требований применяемого программного обеспечения.

2.2 Материал

В главе 2.4 настоящей части не рассматриваются такие свойства материалов, как модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (ν). Для анализа МКЭ эти параметры материала необходимы, поскольку сначала рассчитывается упругие деформации, а из них через модуль Юнга и коэффициент Пуассона рассчитываются напряжения. Следует использовать достоверные значения свойств материалов, либо взятые из документации, либо измеренные на представительных образцах материалов.

Для стали рекомендуются следующие значения: $E = 2,05 \times 10^5$ МПа и $\nu = 0,3$.

2.3 Критерии качества элементной сетки

Если используемая элементная сетка не соответствует ни одному из нижеуказанных критериев для определения коэффициентов концентрации напряжений в исследуемой области, должен быть проведен повторный расчет с использованием более мелкой сетки.

2.3.1 Критерий главных напряжений

Качество сетки должно быть подтверждено посредством проверки составляющей напряжения, нормальной к поверхности радиуса края масляного отверстия. При главных напряжениях σ_1 , σ_2 и σ_3 должно выполняться следующее требование:

$$\min(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) < 0.03 \cdot \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

2.3.2 Критерий осредненности / неосредненности напряжений

Критерий осредненности / неосредненности напряжений основывается на отслеживании неоднородностей в напряжениях, определяемых на элементах галтели при расчете ККН:

неосредненные узловые напряжения, рассчитываемые на каждом элементе, соединенном с тем или иным узлом, должны отличаться менее чем на 5 % от 100 % осредненного узлового напряжения на этом узле в исследуемой области.

3. Случаи нагрузки и оценка уровня напряжений

При определении ККН взамен аналитического способа, описываемого в 2.4 настоящей части, расчеты должны быть выполнены для нижеследующих случаев нагружения.

3.1 Кручение

Конструкция подвергается воздействию чистым кручением. Деформация торцевых поверхностей модели подавляется.

Крутящий момент прилагается к центральному узлу на оси коленчатого вала. Этот узел работает как главный узел с шестью степенями свободы и жестко соединен с остальными узлами торцевой поверхности.

Такие граничные условия и условия нагружения применимы как для рядных, так и V-образных двигателей.

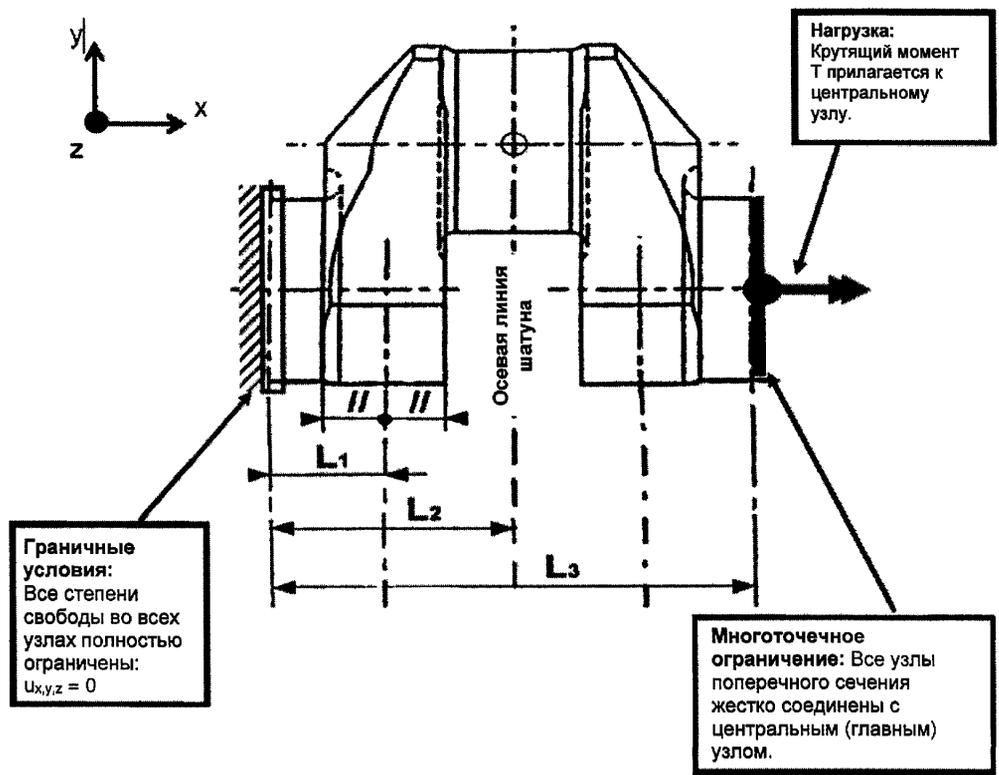


Рис. 3.1. Граничные условия и условия нагружения для случая нагружения кручением

На всех узлах на краю масляного отверстия получены главные напряжения, из которых взято максимальное значение для последующего расчета коэффициента концентрации напряжений:

$$\gamma_T = \frac{\max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)}{\tau_N}$$

где номинальное крутильное напряжение τ_N на шатунной шейке определено по 2.4.5.1 настоящей части при крутящем моменте T :

$$\tau_N = \frac{T}{W_p}$$

3.2 Изгиб

Конструкция подвергается воздействию чистым изгибом. Деформация торцевых поверхностей модели подавляется.

Изгибающий момент прилагается к центральному узлу на оси коленчатого вала. Этот узел работает как главный узел с шестью степенями свободы и жестко соединен с остальными узлами торцевой поверхности.

Такие граничные условия и условия нагружения применимы как для рядных, так и V-образных двигателей.

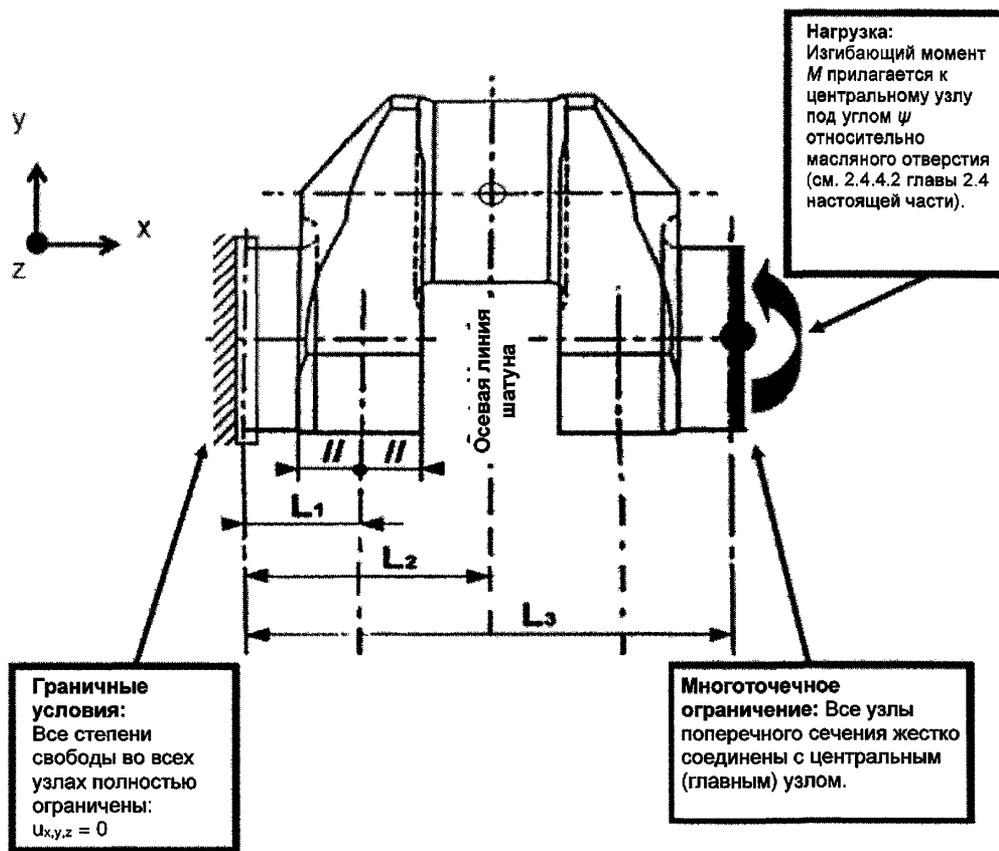


Рис. 3.2. Граничные условия и условия нагружения для случая воздействия чистым изгибом

На всех узлах на краю масляного отверстия получены главные напряжения, из которых

взято максимальное значение для последующего расчета ККН:

$$\underline{\gamma_B = \frac{\max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)}{\sigma_N}}$$

где номинальное изгибное напряжение σ_N на шатунной шейке определено по 2.4.4.2 главы 2.4 настоящей части при изгибающем моменте M :

$$\underline{\sigma_N = \frac{M}{W_e}}$$

6.3 ЯКОРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Пункты 6.3.1 - 6.3.4 заменяются следующим текстом:

«6.3.1 Общие требования.

6.3.1.1 Проектирование, изготовление и испытание брашпилей должны выполняться в соответствии с приемлемыми стандартами, правилами и нормами. Чтобы считаться приемлемыми, такие стандарты, правила и нормы должны содержать критерии для нагрузок, рабочих характеристик и испытаний.

Следующие документы, содержащие информацию о конструктивных характеристиках, стандарте соответствия, результатах технического анализа и особенностях конструкции (по мере необходимости), должны быть представлены на рассмотрение (см. 1.2.3.2 настоящей части):

-конструктивные характеристики брашпиля, сведения о якоре и якорной цепи, глубина якорной стоянки, критерии эффективности, стандарт соответствия;

-схема устройства брашпиля с указанием всех компонентов якорной (швартовой) системы, таких как приводной двигатель, валопровод, цепная звездочка, якоря и якорные цепи, швартовые лебедки, тросы и тросоукладчики, если они входят в состав механизма брашпиля, тормоза, органы управления и т.п.;

-размеры, материалы, сведения о сварных соединениях для всех передающих крутящий момент (валы, шестерни, муфты, соединительные болты и т. п.) и несущих нагрузку (подшипники вала, цепная звездочка, шкивы, барабаны, фундаментные рамы и т. п.) компонентов брашпиля и лебедки, в том числе о тормозах, цепном стопоре (при наличии) и фундаменте;

сведения о гидравлической системе, в том числе:

схема трубопроводов и расчетное давление в системе;

расположение и уставки предохранительных клапанов;

спецификации материалов труб и оборудования;

применимые типовые соединения труб;

технические данные о гидравлических двигателях.

электрическая однолинейная схема с указанием характеристик кабелей, контроллера двигателя, номинального значения тока или уставки защитных устройств (по применимости);

описание устройств и приборов управления и контроля;

результаты технического анализа передающих крутящий момент и несущих нагрузку компонентов, подтверждающие их соответствие признанным стандартам, правилам или нормам. Результаты технического анализа зубчатых передач должны соответствовать признанным стандартам;

документы и сведения об электродвигателях брашпиля и соответствующих передаточных механизмах номинальной мощностью 100 кВт и выше;

расчеты, подтверждающие, что приводной двигатель брашпиля способен обеспечить скорость подъема, необходимое непрерывное тяговое усилие и перегрузочную способность, предоставляются, если испытания нагрузкой и на определение перегрузочной способности брашпиля в сборе на заводе не проводились (см. 5.10.3.7 части IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов);

информация о порядке эксплуатации и технического обслуживания брашпиля приводится в руководстве по эксплуатации судна.

6.3.2 Материалы и изготовление.

6.3.2.1 Материалы.

Материалы, используемые для изготовления передающих крутящий момент и несущих нагрузку компонентов брашпелей, должны соответствовать части XIII «Материалы» или национальным или международным стандартам на материалы. Предлагаемые материалы должны быть указаны на конструкторских чертежах и одобрены для применения в конкретной конструкции. Все материалы должны иметь сертификат изготовителя и иметь прослеживаемую связь до сертификатов изготовителя.

6.3.2.2 Сварные соединения.

Сварные соединения должны быть указаны на конструкторских чертежах и одобрены в рамках одобрения конструкции брашпиля. Технологические процессы сварки и сварщики должны быть одобрены в соответствии с требованиями части XIV «Сварка». Расходные сварочные материалы должны иметь свидетельство об одобрении сварочных материалов. Объем неразрушающего контроля сварных швов и послесварочной термообработки (если таковая предусмотрена) должны быть указаны и представлены для рассмотрения.

6.3.3 Конструкция.

Вне зависимости от требований выбранного стандарта соответствия необходимо соответствие следующим требованиям. Вместо проведения технического анализа и представления его результатов на рассмотрение, одобрение механической конструкции брашпиля может основываться на

результатах типового испытания, и в таком случае для рассмотрения должна быть представлена методика проведения такого испытания.

6.3.3.1 Механическая конструкция.

6.3.3.1.1 Проектные нагрузки:

Нагрузки при удержании. Должны быть произведены расчеты для демонстрации того, что при удержании (один якорь, тормоз полностью включен, муфта цепной звездочки расцеплена) при нагрузке, составляющей 80 % от установленной минимальной разрывной прочности якорной цепи, максимальное напряжение в каждом несущем нагрузке компоненте не будет превышать предела текучести (условного предела текучести 0,2 %) материала. В случае установок, оборудованных цепным стопором, в расчетах может использоваться значение, равное 45 % от установленной минимальной разрывной прочности цепи;

Инерционные нагрузки.

Конструкция приводного механизма, включающего приводной двигатель, редукторы, подшипники, муфты, валы, цепную звездочку и соединительные болты, должна рассчитываться с учетом динамических воздействий при внезапном начале и прекращении движения приводного двигателя или якорной цепи, с тем, чтобы обеспечить уменьшение инерционных нагрузок.

6.3.3.1.2 Непрерывное тяговое усилие.

Приводной двигатель брашпиля должен иметь возможность обеспечивать в течение не менее чем 30 мин непрерывное тяговое усилие Z_{cont1} в зависимости от категории и диаметра d цепи:

Категория цепи	Z_{cont1}	
	H	$кгс$
1	$37,5d^2$	$3,82d^2$
2	$42,5d^2$	$4,33d^2$
3	$47,5d^2$	$4,84d^2$
Единица измерения d	$мм$	$мм$

Значения, приведенные в таблице выше, применимы при использовании обычных бесштоковых якорей и глубине якорной стоянки до 82,5 м.

При глубине якорной стоянки больше 82,5 м непрерывное тяговое усилие Z_{cont2} составляет:

$$Z_{cont2}[H] = Z_{cont1}[H] + (D - 82,5) \times 0,27d^2$$

или

$$Z_{cont2}[кгс] = Z_{cont1}[кгс] + (D - 82,5) \times 0,0275d^2$$

где

D — глубина якорной стоянки, м.

Массы якорей принимаются равным значениям, приведенным в разд. 3 части III «Устройства, оборудование и снабжение». Кроме того, значение Z_{cont} предусматривает одновременный подъем одного якоря и учитывает влияние плавучести и КПД клюза (принимаемого равным 70 %). В целом напряжение на каждом передающем крутящий момент компоненте не должно составлять более 40 % предела текучести (условного предела текучести 0,2 %) материала в данных условиях нагружения.

6.3.3.1.3 Перегрузочная способность.

Приводной двигатель брашпиля должен обладать способностью обеспечивать временно необходимую перегрузку для выполнения отрыва якоря от грунта. Такая временная перегрузочная способность, или «кратковременное тяговое усилие» должна составлять не менее 1,5 непрерывного тягового усилия в течение не менее чем 2 мин. В это время скорость допускается ниже нормальной.

6.3.3.1.4 Скорость выбирания.

Средняя скорость выбирания якорной цепи во время подъема якоря и цепи должна составлять не менее 0,15 м/с. Во время испытаний скорость должна измеряться на длине двух смычек цепи, начиная с момента, когда как минимум три смычки (длиной 82,5 м или 45 морских сажений) и якорь находятся в погруженном и подвешенном состоянии.

6.3.3.1.5 Тормозная способность.

Тормозная способность тормоза брашпиля должна быть достаточной для затормаживания движения якоря и якорной цепи во время вытравливания цепи. При отсутствии в конструкции цепного стопора тормоз должен обеспечивать тормозной момент, достаточный, чтобы выдерживать тяговое усилие, составляющего 80 % от установленной минимальной разрывной прочности якорной цепи без необратимой деформации несущих элементов и проскальзывания тормоза. При наличии цепного стопора может использоваться значение, равное 45 %.

6.3.3.1.6 Цепной стопор.

При наличии цепного стопора он вместе со своими принадлежностями должен быть рассчитан на то, чтобы выдерживать, без наступления необратимой деформации, нагрузку, составляющую 80% от установленной минимальной разрывной прочности якорной цепи (см. 3.6.1.3 части III «Устройства, оборудование и снабжение»).

6.3.3.1.7 Опорная конструкция.

Информацию о корпусных опорных конструкциях для брашпиля и цепных стопоров см. в разд. 3 и 4 части III «Устройства, оборудование и снабжение».

6.3.3.2 Гидравлические системы.

При использовании для привода брашпиля гидравлических систем последние должны соответствовать требованиям разд. 7 настоящей части.

6.3.3.3 Электрические системы.

6.3.3.3.1 Электродвигатели.

Электродвигатели должны соответствовать требованиям 5.6 части XI «Электрическое оборудование» и должны поставляться со свидетельством РС по форме, предусмотренной Номенклатурой объектов технического наблюдения Регистра. Двигатели, подвергающиеся воздействию погодных условий, должны иметь соответствующие их расположению кожухи, а также иметь минимальную степень защиты согласно 2.4.4.2 части XI «Электрическое оборудование». В случае использования редукторов они должны соответствовать требованиям гл.4.2 части IX «Механизмы», а редукторы мощностью 100 кВт и выше должны быть сертифицированы.

6.3.3.3.2 Электрические цепи.

Электрические цепи двигателей должны быть защищены, согласно 8.3 части XI «Электрическое оборудование», а сечения кабелей должны выбираться в соответствии с 16.8.2 части XI «Электрическое оборудование». Электрические кабели, проложенные в местах, подверженных воздействию морской воды, должны быть снабжены эффективной защитой от механических повреждений.

6.3.3.4 Защита механических компонентов.

Для защиты механических деталей, в том числе корпусов компонентов, должна быть предусмотрена подходящая система защиты, ограничивающая частоту вращения и крутящий момент на приводном двигателе. Необходимо продумать средства удержания обломков, которые могут образовываться при серьезном повреждении приводного двигателя вследствие повышения частоты вращения при неконтролируемом вытравливании цепи, особенно если в качестве приводного выступает аксиально-поршневой гидравлический двигатель.

6.3.3.5 Муфты.

Брашпили должны быть оборудованы разобщительными муфтами между цепной звездочкой и приводным валом. Муфты с гидравлическим и электрическим приводом сцепления должны иметь возможность ручного расцепления.

6.3.4 Испытания и маркировка.

Брашпили должны проходить освидетельствование инспектором во время производства на заводах-изготовителях на соответствие утвержденной документации и при приемочных испытаниях в соответствии с 5.10.3 части IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов.

Испытания на борту судна и маркировка брашпильей должны производиться в соответствии с.3.3.2 Руководства по техническому наблюдению за постройкой судов.».

Пункт 6.3.5.1 заменяется следующим текстом:

«**6.3.5.1** Должна быть произведена проверка прочности деталей крепления механизма к судовому фундаменту, в том числе и защиты от волнового воздействия с учетом 1.4.6.1 части VIII «Системы и трубопроводы» (см. 6.3.5.3 — 6.3.5.8). Требование не распространяется на нефтеналивные и навалочные суда, построенные в соответствии с требованиями части XVIII «Общие правила по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов» и части XIX «Дополнительные требования к контейнеровозам и судам, перевозящим грузы преимущественно в контейнерах»).».

Российский морской регистр судоходства
Правила классификации и постройки морских судов
Часть IX
Механизмы

Ответственный за выпуск *А. В. Зухарь*
Главный редактор *М. Р. Маркушина*
Редактор *С. А. Кротт*
Компьютерная верстка *И. И. Лазарев*

Подписано в печать 03.10.17. Формат 60 × 84/8. Гарнитура Тайме.
Тираж 150. Заказ № 2017-15

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/