

УДК 621.539.376

# ОЦЕНКА ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПОДВЕРЖЕННЫХ АСИММЕТРИЧНОМУ НАГРУЖЕНИЮ

**А. В. Желдубовский**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

E-mail: creep@inmech.kiev.ua

**А. Д. Погребняк**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

E-mail: creep@inmech.kiev.ua

**М. Н. Регульский**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник

E-mail: creep@inmech.kiev.ua

**А. Т. Сердитов**

Кандидат технических наук, доцент\*\*

E-mail: Serditov ot@gmail.com

**Ю. В. Ключников**

Кандидат технических наук, доцент\*\*

E-mail: Klyuchnikov\_yu@mail.ru

**П. В. Кондрашев**

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: kondrashev@ukr.net

\*Отдел механики ползучести

Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины

ул. П. Нестерова, 3, г. Киев, Украина, 03057

\*\*Кафедра лазерной техники и физико-технических технологий

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

*Розглядається методика розрахунку запасу міцності деталей машинобудівних конструкцій, які піддаються спільному впливу статичних і циклічних навантажень. Основна увага приділяється оцінці максимальних граничних напруг, характерних для асиметричного навантажування конструкційних матеріалів, з урахуванням концентрації напружень як одного з основних факторів, притаманних реальним конструктивним елементам*

*Ключові слова: запас міцності, статичні, циклічні навантаження, максимальні напруження, асиметричне навантаження*

*Рассматривается методика расчета запаса прочности деталей машиностроительных конструкций, подверженных совместному воздействию статических и циклических нагрузок. Основное внимание уделяется оценке максимальных предельных напряжений, характерных для асимметричного нагружения конструкционных материалов, с учетом концентрации напряжений как одного из основных факторов, присущих реальным конструктивным элементам*

*Ключевые слова: запас прочности, статические, циклические нагрузки, максимальные напряжения, асимметричная нагрузка*

## 1. Введение

Создание машиностроительных конструкций тесно связано с необходимостью совершенствования методов расчета на прочность. Эта задача особенно актуальна применительно к деталям, подверженным воздействию циклических нагрузок, вызывающих преждевременное разрушение в связи с развитием процесса усталости металла. Результаты исследования сопротивления усталости посвящены многочисленным трудам отечественных и зарубежных ученых [1 – 7]. Экспериментально установлено, что характеристики сопротивления усталости конструкционных материалов существенно зависят от многих факторов, в первую очередь от условий и характера нагружения, в частности от асимметрии действующих нагрузок, а также концентрации напряжений. В связи с этим, методы расчета элементов конструкций на прочность должны отражать проявление конструктивных, тех-

нологических и эксплуатационных факторов и учитывать их влияние.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Расчеты на прочность деталей машин базируются на сопоставлении определяемых запасов прочности с допускаемыми их величинами, выступающими в качестве нормативных характеристик. Величины допускаемых напряжений и запасов прочности устанавливаются, как правило, на основе систематизации обширного фактического материала по конструированию, детального анализа эксплуатации созданных конструкций, исследования свойств применяемых материалов. Запас прочности  $n$  детали определяется как отношение предельных (максимальных) напряжений  $\sigma_{max}$ , характеризующих несущую способность матери-

ала, к напряжениям  $\sigma_d$ , действующим в деталях в эксплуатационных условиях, т.е.

$$n = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_d} \quad (1)$$

При простых видах циклического нагружения, например при растяжении-сжатии или изгибе,  $\sigma_{max}$  представляет собой предел выносливости детали при растяжении-сжатии или изгибе, определенный путем испытаний лабораторных полированных образцов с учетом влияния различного рода факторов. Напряжения  $\sigma_d$ , возникающие в проектируемых элементах конструкций в процессе эксплуатации, устанавливаются на основе опыта эксплуатации конструкций, подобных проектируемой, путем расчета или тензометрирования. Учитывая существенное влияние концентрации напряжений и асимметрии циклического нагружения на характеристики сопротивления усталости, возникает необходимость в уточнении методики определения максимальных напряжений в материале при воздействии указанных факторов с целью повышения точности прочностных расчетов. Рассмотрим метод оценки запаса прочности детали, подверженной воздействию асимметричного циклического нагружения с учетом концентрации напряжений. Необходимость учета асимметрии нагружения в прочностных расчетах машиностроительных конструкций была сформулирована в 30-х годах прошлого столетия [8]. Решение этой задачи требует проведения большого объема трудоемких экспериментальных исследований. В связи с этим предпринимались попытки косвенного определения необходимых для расчета характеристик. В качестве первых предложений косвенного учета влияния асимметрии нагружения на допускаемые напряжения при воздействии циклических нагрузок явились рекомендации использования линейной зависимости максимального напряжения цикла от его среднего напряжения, т.е. зависимости Гудмана [2, 6]. Несколько позже было предложено использовать для определения допускаемых напряжений при одноосном напряженном состоянии диаграмму Смита [8].

Диаграмма Смита характеризует зависимость максимального напряжения от среднего напряжения цикла. Линии 1 [8] отражают параболическую зависимость максимальных напряжений асимметричного цикла от статической компоненты (зависимость Гербера); линии 2 – линейную зависимость Гудмана [8]. В работе [9] предложена схематизированная диаграмма Смита, представленная двумя прямолинейными отрезками  $AB$  и  $BD$ . Первый отражает пределы усталости при асимметричном нагружении, второй – предел текучести исследуемого материала. Построение схематизированной диаграммы предполагает экспериментальное определение предела усталости при симметричном цикле  $\sigma_r$ , предела усталости при отнулевом цикле – при изменении напряжений от нуля до максимума  $\sigma_0$  и предела текучести  $\sigma_y$ . Для использования в расчетной практике диаграммы Смита в ней необходимо также отразить влияние концентрации напряжений как одного из важнейших факторов, определяющих характеристики сопротивления усталости материала. При асимметричном нагружении учет концентрации на-

пряжений осуществляется через снижение амплитуды циклических напряжений  $\sigma_r$  согласно выражению:

$$\sigma_{rH} = \frac{\sigma_r}{k_\sigma} \quad (2)$$

где  $k_\sigma$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

На диаграмме Смита влияние концентрации напряжений осуществляется за счет уменьшения амплитуд асимметричного цикла путем умножения их на

величину  $\frac{1}{k_\sigma}$ , что отражает линия  $A'B'$ . В этом случае

запасом прочности при асимметричном нагружении считается отношение напряжения по диаграмме Смита к максимальному напряжению, действующему в детали с учетом концентрации напряжений и других факторов, влияющих на сопротивление материала циклическим нагрузкам. Детальная методика использования диаграммы Смита для оценки запаса прочности детали при асимметричном нагружении приведена в работе [9]. Вместе с тем, как показывает опыт, ни один из известных подходов не обеспечивает точности расчетов запаса прочности из-за отсутствия учета взаимного влияния основных факторов, определяющих предельное состояние конструкционных материалов под действием циклических нагрузок, в частности, асимметрии цикла нагружения и концентрации напряжений. В работах [10 – 12], предложены модели предельного состояния конструкционных материалов в форме степенной трансцендентной функции. Применительно к одноосному асимметричному нагружению модели записываются в виде выражений:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} - \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} - \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\xi = 0, \quad (4)$$

где  $\lambda$  и  $\xi$  – коэффициенты чувствительности материала к асимметрии нагружения, определяемые путем разрешения соотношений и относительно них. Таким образом, задаваясь комбинацией напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_m$  асимметричного цикла, определяем значения  $\lambda$  и  $\xi$ . С этой целью предпочтительно воспользоваться соотношением  $\sigma_r$  и  $\sigma_m$ , отражающим отнулевой цикл, при котором  $\sigma_r = \sigma_m$ . При этом условии более четко проявляется реакция материала на совместное воздействие статических и циклических напряжений. В этом случае для определения значений  $\lambda$  и  $\xi$  получаем выражения вида:

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_r^0 - \lg \sigma_n}{\lg \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B} \right) \right]} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\lg \frac{\sigma_r^0}{\sigma_n} - \lg \frac{2}{\pi}}{\lg \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m^0}{\sigma_B} \right) \right]}. \quad (5)$$

Здесь  $\sigma_r^0$  и  $\sigma_m^0$  – амплитуда и статическая компонента отнулевого цикла напряжений в базовом единичном эксперименте ( $\sigma_r^0 = \sigma_m^0$ );  $\sigma_n$  и  $\sigma_B$  – предел

ограниченной усталости при симметричном цикле нагружения, соответствующий долговечности  $n^0$  в базовом эксперименте, и предел прочности соответственно. Соотношения напряжений  $\sigma_r^0$  и  $\sigma_m^0$  выбираются таким образом, чтобы разрушение испытуемых образцов происходило в области многоциклового усталости ( $n \geq 10^5$  циклов). При определении значений  $\lambda$  и  $\xi$ , которые по сути являются материальными константами исследуемого материала, в базовом эксперименте целесообразно испытать 2-3 образца, что обеспечит надежность его определения. Опыт предварительных расчетов показал, что зависимость, как правило, хорошо описывает предельное состояние пластичных материалов, зависимость – малопластичных, хрупких материалов.

### 3. Цель и задачи исследования

Рассчитать запас прочности конструктивных элементов машиностроительных конструкций, подверженных совместному воздействию статических и циклических нагрузок.

### 4. Расчет предельных амплитуд напряжений

Для расчета зависимости максимальных (предельных) амплитуд напряжений  $\sigma_r$  от статической составляющей цикла напряжений  $\sigma_m$  воспользуемся моделями предельного состояния и . При этом максимальные (предельные) амплитуды  $\sigma_r$  приобретают смысл  $\sigma_{max}$  в выражении для коэффициента запаса прочности. Значения величин, необходимых для расчета предельных диаграмм-пределов прочности  $\sigma_B$ , пределов ограниченной усталости  $\sigma_n$ , характеристик напряжений от нулевого цикла, параметров  $\lambda$  и  $\xi$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения величин  $\sigma_B, \sigma_n, \lambda, \xi$

Материал	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_r^0$	$\sigma_m^0$	$\sigma_n$	$\lambda, \xi$
Сталь Э10	368,4	142,2	142,2	202,5	1,40 ( $\lambda$ )
Сталь 1Х2М	532,0	230,1	245,2	278,9	1,68 ( $\xi$ )
Сплав ВЖЛ12У	900,0	200,0	200,0	287,5	0,52 ( $\xi$ )

На рис. 1, в качестве примера, представлены расчетные диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений (линии) углеродистой, легированной сталей и жаропрочного сплава, испытанных при асимметричном нагружении, которые сопоставлены с результатами экспериментальных исследований (точки).

Предельная диаграмма стали Э10 рассчитывалась с использованием зависимости (3), стали 1Х2М и сплава ВЖЛ12У – зависимости . Экспериментальные данные заимствованы из работ [10, 13, 14]. Выполненные построения показали удовлетворительное согласование рассчитанных диаграмм предельных амплитуд напряжений с экспериментальными данными. Характер-

ной особенностью моделей и, в отличие от известных зависимостей, является то обстоятельство, что они, обладая определенной гибкостью, позволяют описать достаточно надежно предельное состояние широкого круга конструкционных материалов, отличающихся различными механическими свойствами. Модели и позволяют также учесть влияние концентрации напряжений на предельное состояние материалов совместно с асимметрией цикла нагружения путем их преобразования в следующие зависимости:

$$\frac{\sigma_{rH}}{\sigma_{nH}} - \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\sigma_{rH}}{\sigma_{nH}} - \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\xi = 0. \tag{7}$$

где  $\sigma_{rH}$  и  $\sigma_{nH}$  – пределы ограниченной усталости при асимметричных и симметричном циклах, соответственно. Показатель степени  $\lambda$ , исходя из , определяется по данным базового единичного эксперимента в условиях отнулевого цикла напряжений при испытании образцов с концентратором напряжений исследуемой геометрии и расчета по формуле:

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_{rH}^0 - \lg \sigma_n}{\lg \left[ \cos \left( \frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B} \right) \right]}, \tag{8}$$

Аналогично определяется значение показателя  $\xi$  из выражения . Естественно, что геометрия концентратора напряжений в базовом эксперименте должна отвечать геометрии концентратора напряжений в проектируемой детали. Рис. 2 отражает иллюстрацию использования моделей для расчета и построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений образцов ряда конструкционных материалов с концентраторами напряжений.

Данные, необходимые для расчета предельных диаграмм, представлены в табл. 2. Экспериментальные данные заимствованы из работ [15, 16].

Таблица 2

Исходные данные для расчета предельных диаграмм

Материал	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_r^0$	$\sigma_m^0$	$\sigma_n$	$\xi$
Сталь 2, гладкий образец	754,4	203,9	203,9	220,7	1,74
Сталь 2, надрез	754,4	111,9	111,9	137,3	0,74
Сталь Э16, гладкий образец	1275,3	441,4	441,4	569,0	1,00
Сталь Э16, надрез	1863,9	236,6	236,6	264,7	0,87
Сталь St52, гладкий образец	579,8	153,7	153,7	178,1	1,17
Сталь St52, надрез	579,8	106,0	106,0	119,6	1,02

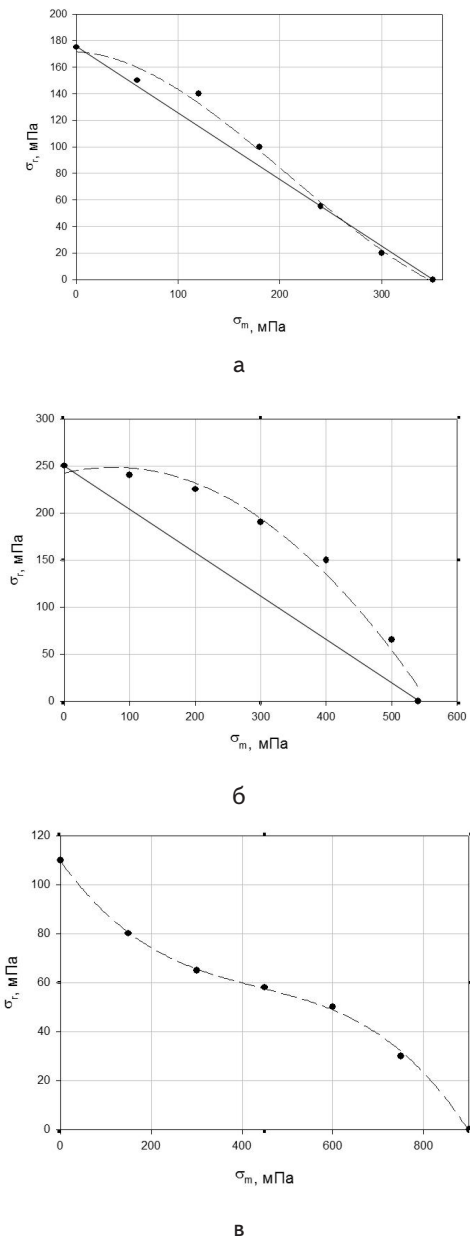


Рис. 1. Зависимости максимальных (предельных) амплитуд напряжений  $\sigma_r$  от статической составляющей цикла напряжений  $\sigma_m$ : а – стали Э10, б – стали 1Х2М, в – жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ12У в условиях одноосного асимметричного циклического растяжения-сжатия

В данном случае также получено хорошее согласование результатов расчета предельных амплитуд цикла напряжений (линии) с использованием модели (7) с экспериментальными данными (точки). Погрешность расчета предельных амплитуд асимметричного цикла напряжений, как правило, не превышает 10 %. Сравнительный анализ вариантов описания предельного состояния конструкционных материалов (Гудмана, Зодерберга, Гербера, Одинга и др.) и предложенного в работах [10 – 12] показал преимущество последнего в обеспечении точности расчетных оценок предельных амплитуд цикла напряжений при асимметричном нагружении. Это позволяет в выражении (1) для оценки запаса прочности при расчетах несущей способно-

сти деталей машин напряжение  $\sigma_{max}$  выразить через напряжение  $\sigma_{rH}$ , обеспечивающее учет асимметрии нагружения и концентрации напряжений, что способствует повышению надежности расчетов на прочность создаваемых конструкций. При этом выбор напряжения  $\sigma_{rH}$  согласовывается с предполагаемыми величинами напряжений асимметричного нагружения в эксплуатационных условиях. Модели (6) и (7) позволяют также рассчитать некоторый диапазон значений запаса прочности  $n$  и осуществить выбор необходимого значения  $n$ , учитывая особенности условий нагружения в эксплуатации. При необходимости, используя разработанную методику, можно учесть при определении запаса прочности влияние масштабного фактора, коррозионной среды и других факторов.

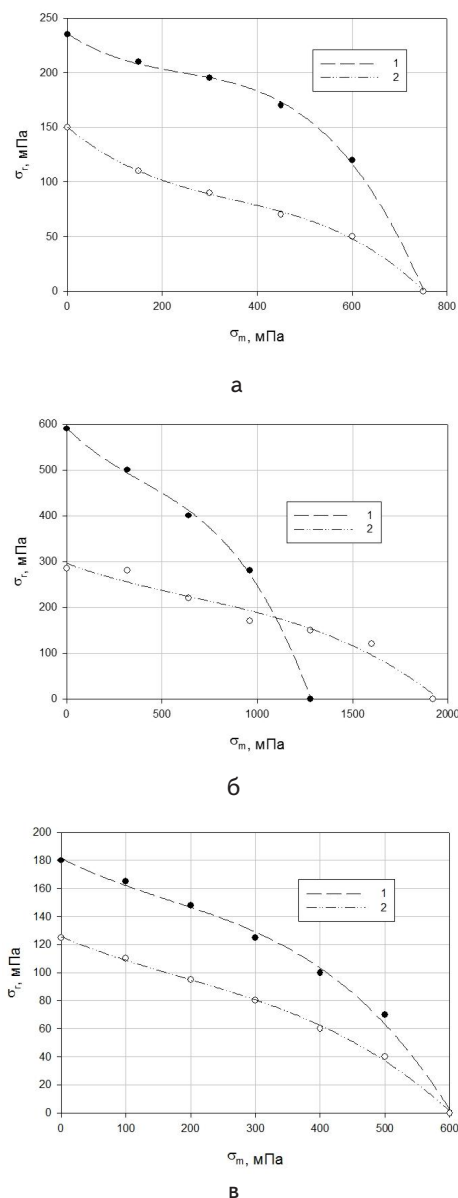


Рис. 2. Зависимости максимальных (предельных) амплитуд напряжений  $\sigma_r$  от статической составляющей цикла напряжений  $\sigma_m$ : 1 – гладких, 2 – надрезанных образцов: а – стали 2, б – стали Э16, в – стали St52 в условиях одноосного асимметричного циклического растяжения-сжатия

---

## 5. Выводы

---

Предложена методика оценки запаса прочности, используемая в расчетной практике элементов конструкций, подверженных асимметричному циклическому нагружению, с учетом концентрации напряжений, ха-

рактерной для создаваемых конструкций. В основу разработанной методики заложены модели предельного состояния, базирующиеся на степенных трансцендентных функциях. Модели обеспечивают достаточно корректное описание экспериментальных данных при минимальном объеме предварительных исследований.

---

## Литература

1. Афанасьев, Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов [Текст] / Н. Н. Афанасьев // Киев: Изд-во АН УССР.- 1953.- 128 с.
2. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов [Текст] / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена.- М.: Машиностроение.- 1964.- 276 с.
3. Гаф, Г. Дж. Усталость металлов [Текст] / Пер. с англ. под ред. Н. А. Шапошникова. М.-Л.: Гл. редакция литературы по черной металлургии. 1935.- 304 с.
4. Давиденков, Н. Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов [Текст] / Избр. труды: В 2-х томах.- Киев: Наук. думка, 1981.- Т. 1.- 704 с.
5. Иванова, В. С. Усталостное разрушение металлов [Текст] / М.: Металлургиздат, 1963.- 258 с.
6. Форрест, П. Усталость металлов [Текст] / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена.- М.: Машиностроение, 1968.- 352 с.
7. Хейвуд, Р. Б. Проектирование с учетом усталости [Текст] / Пер. с англ. под ред. чл.-кор. АН СССР И.Ф.Образцова.- М.: Машиностроение, 1969.- 504 с.
8. Soderberg, C. R. Factor of safety and working stresses [Текст] / Trans. ASME.- 1930.- (30).-С. 13-28.
9. Серенсен, С. В. Определение запаса прочности при расчете деталей машин [Текст] / Вестник машиностроения, 1943.- № 6.- С. 6-14.
10. Голуб, В. П. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении [Текст] / В. П. Голуб, А. Д. Погребняк. - Киев: Наук. думка, 1994.- 228 с.
11. Голуб В. П., Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении [Текст] / В. П. Голуб, В. И. Крижановский, А. Д. Погребняк // Прикл. механика, 2004, т. 40, № 11.- С. 106-116.
12. Голуб В. П. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении-сжатии [Текст] / В. П. Голуб, В. И. Крижановский, А. Д. Погребняк, Е. С. Кочеткова // Прикл. механика, 2006, т. 42, № 1.- С.48-58.
13. Кузьменко В. А., Влияние частоты нагружения, температуры и асимметрии цикла на выносливость теплостойких сталей 1Х2М и Х18Н9. Сообщение 1 [Текст] / В. А. Кузьменко, И. А. Троян, Я. И. Цимбалистый и др. // Пробл. прочности.- 1981.- №2.- С. 30-36.
14. Цимбалистый, Я. И. Исследование неупругости и усталости металлов при асимметричных циклах высокочастотного растяжения-сжатия [Текст]: Автореф. дис. к-та техн. наук.- Я. И. Цимбалистый; Киев, 1977.- 20 с.
15. Подзолов, И. В. Расчет допускаемых напряжений для черных металлов в машиностроении (Действительный запас прочности) [Текст] / И. В. Подзолов // Изд. 3-е, перераб. и дополн.- М.: Оборонгиз.- 1947.- 486 с.
16. Ужик, Г. В. Прочность сталей при одновременном действии постоянных и переменных нагрузок [Текст] / Г. В. Ужик // Изв. АН СССР. ОТН.- 1949.- №5.- С. 657-665.