



# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 620.178.3

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук; Е.С. ТАРАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

С.А. ТЮРИН, канд. техн. наук

ПО «Гомсельмаш», Республика Беларусь

## О ПОЛНОЙ КРИВОЙ УСТАЛОСТИ

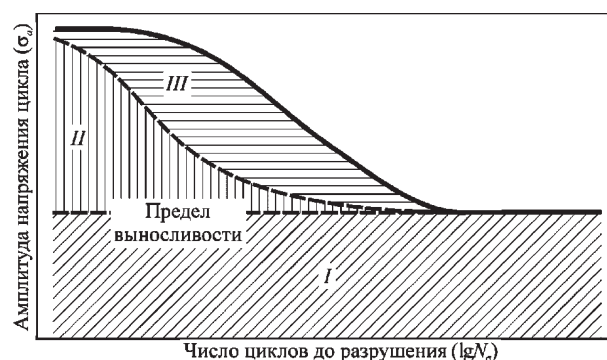
Дан обзор и проанализированы методы схематизации полной кривой усталости на базе до  $10^7$  циклов и до  $10^9$  циклов. Показано, что вопрос о ее построении является дискуссионным. Для экспериментальной проверки принята обобщенная схематизация полной кривой усталости, предложенная в работе [17]. В статье сформулированы основные методические принципы проведения корректных усталостных испытаний (в широком диапазоне изменения долговечности). Их реализация привела к построению обобщенной кривой, состоящей из 4-х участков: квазистатической (I), малоцикловой (II), многоцикловой (III) и высокоресурсной (IV) усталости. В работе дается анализ полученных результатов. В частности, показано, что аппроксимация участков известным степенным уравнением дает приемлемую оценку усталостной долговечности. Предложено систему основных параметров предельного состояния характеризовать двумя числами ( $\sigma_{lim}(N_{lim})$ ), которые определяют как значение предела усталости ( $\sigma_{lim}$ ) для данного участка, так и долговечность ( $N_{lim}$ ), при которой он достигается.

**Ключевые слова:** механическая, квазистатическая, малоцикловая, многоцикловая, высокоресурсная усталость, полная кривая усталости, образец, предел выносливости, долговечность (число циклов до разрушения)

Процессы накопления усталостных повреждений и разрушения лимитируют работоспособность наиболее ответственных узлов современных машин и оборудования [1–3]. Особая опасность явления усталости была осознана еще в середине XIX века (достаточно вспомнить знаменитые опыты А. Веллера, проведенные в 1850–1860 годах). К середине 20-х годов XX века были накоплены обширные сведения о закономерностях усталостного разрушения, которые обобщены, например, в работе [4]. Одной из важнейших задач по изучению механической усталости стало получение и графическое представление результатов испытаний. Было установлено, что кривая усталости, построенная в координатах циклические напряжения  $\sigma$  — число циклов до разрушения  $N_\sigma$ , есть наиболее полная интегральная характеристика свойств сопротивления усталости. В этой связи выполнены многочисленные экспериментальные исследования и их анализ (см., например, [5–11]), в результате которых дано обобщенное представление о так называемой «полной кривой усталости». Такие кривые строили на базе  $10^7$  циклов, поскольку считалось, что именно на этой базе удастся установить (физичес-

кий) предел выносливости — критическое напряжение, которое является границей между зоной усталостного разрушения и областью выносливости материала (т.е. его неразрушением). Это означает, что ниже предела выносливости обнаруживается область неограниченной долговечности. Типичная схематизация такой полной кривой усталости представлена на рисунке 1, опубликованном в начале 30-х годов XX века [6].

Согласно рисунку 1, при повторно-переменных нагружениях материала на диаграмме усталости

Рисунок 1 — Диаграмма усталости (на базе  $10^7$  циклов)

различают три области. В области I не происходит разрушения, но возможны изменения характеристик и структуры материала. Зона II является областью перенапряжений, в которой могут обнаружиться значительные изменения характеристик материала и микротрещины в структуре образца. В зоне III ожидается появление макротрещин, развитие которых ведет к усталостному разрушению.

Упрощенная схематизация подобных диаграмм дана в 1975 году [12]; она представлена на рисунке 2 в виде кривой усталости, состоящей из трех участков. Один из них (I) определяется значением напряжения, равного пределу прочности при растяжении. К тому времени было хорошо известно, что если образец, нагруженный таким напряжением, не разрушится в 1-ом цикле, то он выдержит без разрушения по меньшей мере несколько десятков или даже сотен циклов (точка перегиба кривой усталости имеет долговечность  $N_{\sigma_B}$ ). Другой из них (участок III) тоже параллелен оси абсцисс и соответствует значению (физического) предела выносливости  $\sigma_{-1}$ ; долговечность  $N_{\sigma_{-1}}$  определяет вторую точку перелома кривой усталости. Участки I и III соединяются прямой II.

Аппроксимация кривой усталости между указанными точками перегиба прямой линией II (на базе  $10^7$  циклов) является не вполне корректной. Неоднократно было экспериментально показано, что кривая усталости имеет сложный характер. В качестве примера дадим рисунок 3 [8]. Его изучение показывает также, что в пределах базы  $10^7$  циклов участки I и III (см. рисунки 1, 2) не являются параллельными оси абсцисс. По экспериментальным данным [7] кривая усталости имеет два первых наклонных участка, но выходит на горизонталь после  $10^6$  циклов (рисунку 4). Все это означает, что требуется более тщательная схематизация полной кривой усталости. Один из вариантов такой схематизации представлен на рисунке 5 [10].

На этом рисунке полная кривая усталости построена в диапазоне нагрузок от предела прочности до предела усталости. На основе анализа опубликованных работ на ней выделяется ряд характерных

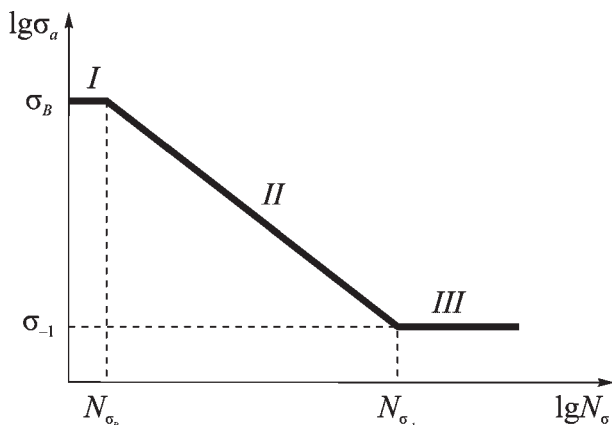


Рисунок 2 — Схема полной кривой усталости (на базе  $10^7$  циклов)

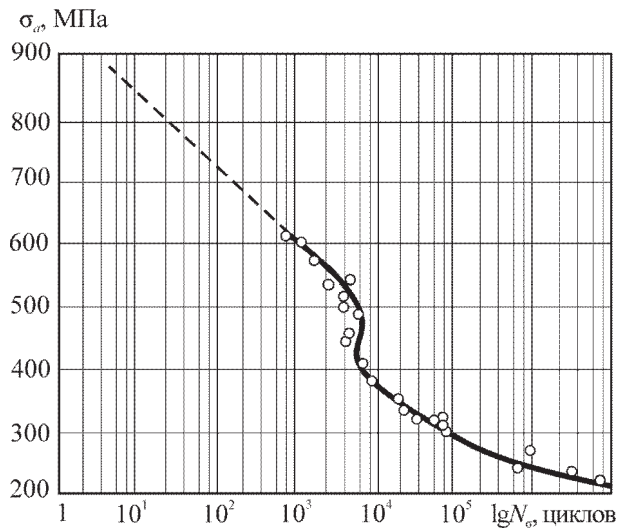


Рисунок 3 — Диаграмма усталости углеродистой стали при симметричном изгибе плоских образцов

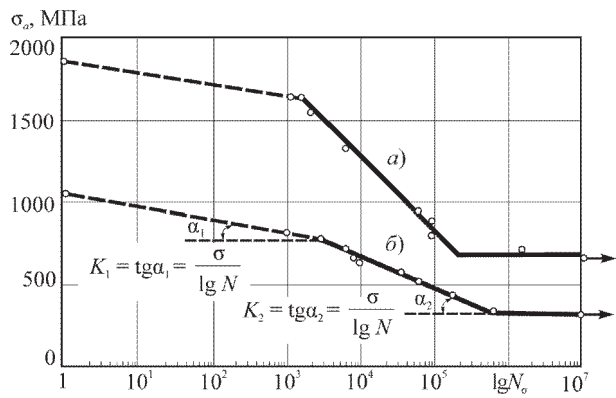


Рисунок 4 — Диаграммы усталости при симметричном изгибе: а — сталь аустенитного класса типа 322 «W»; б — сталь конструкционная N E8630

участков и перегибов. Вся кривая усталости в первую очередь подразделяется на две основные области: малоцикловой (АБВГ) и многоцикловой (ДЕЖ) усталости. Границей между этими областями является напряжение, равное динамическому пределу

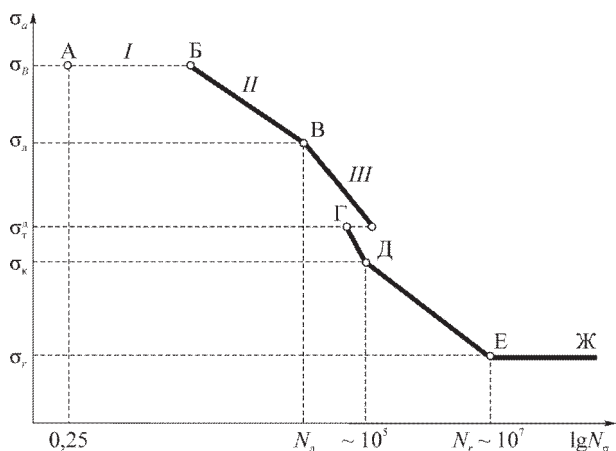


Рисунок 5 — Схематическое изображение полной кривой усталости:  $\sigma_{-1}$  — напряжение верхнего разрыва (первый вид разрыва),  $\sigma_{-1}^{\text{II}}$  — напряжение нижнего разрыва (второй вид разрыва),  $\sigma_k$  — критическое напряжение (третий вид разрыва)

текучести ( $\sigma_T^D$ ), определенному при скорости нагружения усталостных испытаний.

В малоцикловой области в случае одноосного нагружения можно выделить три характерных участка. На участках *I* и *II* разрушение носит квазистатический характер с образованием шейки в месте излома (в условиях кручения и изгиба шейка не образуется). На участке *III* на поверхности разрушения уже отчетливо можно выделить зону усталостного излома.

Между областями малоцикловой и многоцикловой усталости находится переходная область, к которой относятся усталостные разрушения между напряжениями  $\sigma_T^D$  и  $\sigma_{к.}$ . Напряжение  $\sigma_T^D$  может совпадать с динамическим пределом текучести. К области многоцикловой усталости относятся усталостные разрушения при напряжениях ниже переходной области. Ниже области многоцикловой усталости в диапазоне напряжений  $\sigma < \sigma_{к.}$  лежит область безопасных повреждений. Между отдельными участками или областями кривой усталости можно наблюдать переходные зоны, в которых меняется ее наклон или появляется разрыв (см. рисунок 5).

Как следует из сделанного выше краткого обзора, сложный вопрос о схематизации полной кривой усталости является дискуссионным и не вполне разрешенным.

Хотя, как указывалось выше, долгое время считалось, что после  $10^7$  циклов нагружения (при напряжениях, меньших предела выносливости  $\sigma_{-1}$ ) усталостное разрушение невозможно, практика показала, что это не так. Например, разрушение деталей двигателей и турбин обнаруживалось и после наработки  $10^8$  циклов (рисунок 6) [13]. И тогда пришло время тщательных экспериментальных исследований усталостной долговечности в диапазоне  $10^7 \dots 10^{10}$  циклов; анализ многих из них дан в книге [12]. В литературе появился новый термин: высокоресурсная усталость [14], или гигаусталость [13].

Исследования в области гигаусталости потребовали разработки новых методов высокочастотных испытаний [15], поскольку при «обычных» усталостных испытаниях с частотой 600 ... 6000 ц/мин достичь долговечности порядка  $10^9$  циклов практически нереально. И тогда возникли две очередные проблемы. Во-первых, в многоцикловой и высокочастотной областях испытаний применяются прин-

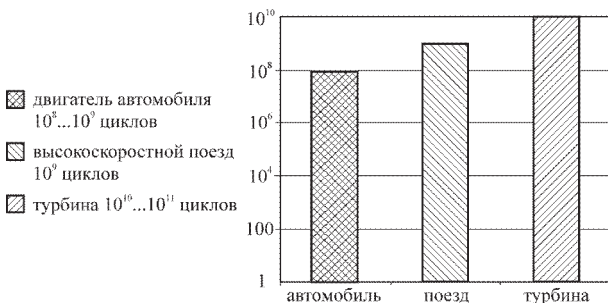


Рисунок 6 — Усталостная долговечность типичных машин и узлов

ципально различные способы силовозбуждения. Представление о том, какие способы возбуждения циклических нагрузок в усталостных установках используются для тех или иных диапазонов частот, дает схема, показанная на рисунке 7 [16]. К высоким частотам в усталостных испытаниях относят обычно те, которые находятся в незаштрихованном поле. Верхняя граница этого поля, приходящаяся на десятки кГц, определена из условия необходимости высокочастотных испытаний.

Возбуждение циклических напряжений в испытуемом элементе на обычных и низких частотах в большинстве случаев осуществляется в нерезонансном режиме. При высокочастотных испытаниях, наоборот, используется, как правило, резонансный режим возбуждения. На схеме полосой с горизонтальными линиями отмечено то, что данный способ возбуждения используется в нерезонансном, а полосой с вертикальными черточками — в резонансном режиме возбуждения циклических нагрузок. Описание рассматриваемых способов возбуждения высокочастотных циклических нагрузок, а также литература по их использованию в конкретных усталостных установках (наряду с обзором результатов усталостных испытаний на высоких частотах) приведены в [15]. И тогда полную кривую усталости приходится получать, например, при испытаниях на двух частотах (рисунок 8) [13], т.е. на двух разных испытательных установках и следовательно, двух разных типоразмерах образцов.

Во-вторых, критерии достижения предельного состояния образцов оказываются различными в разных областях по числу циклов нагружения (рисунок 9) [13].

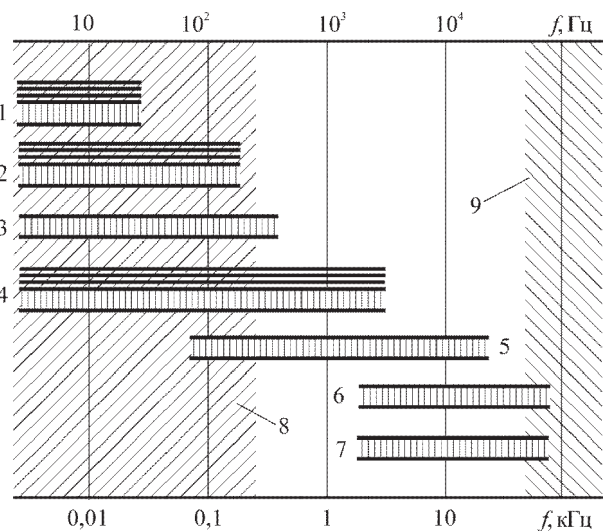


Рисунок 7 — Способы возбуждения циклических нагрузок в зависимости от частоты испытаний: 1 — механическое и гидравлическое силовозбуждение; 2 — электрогидравлическое силовозбуждение; 3 — электромагнитное силовозбуждение; 4 — электродинамическое силовозбуждение; 5 — пневматическое и акустическое силовозбуждение; 6 — магнитоэлектрическое силовозбуждение; 7 — пьезоэлектрическое силовозбуждение; 8 — низкочастотные испытания; 9 — верхняя граница реализуемых высокочастотных испытаний

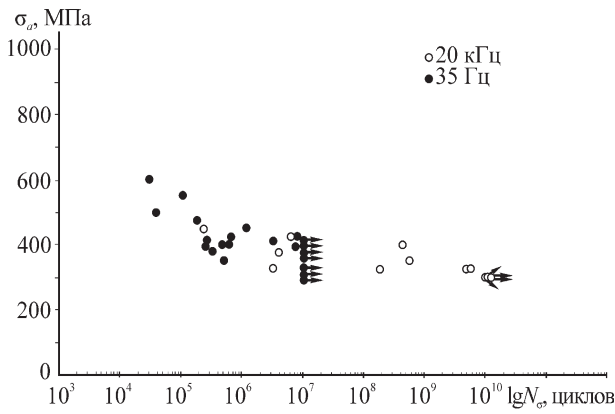


Рисунок 8 — Кривая усталости чугуна с шаровидным графитом, построенная при испытаниях образцов на двух частотах

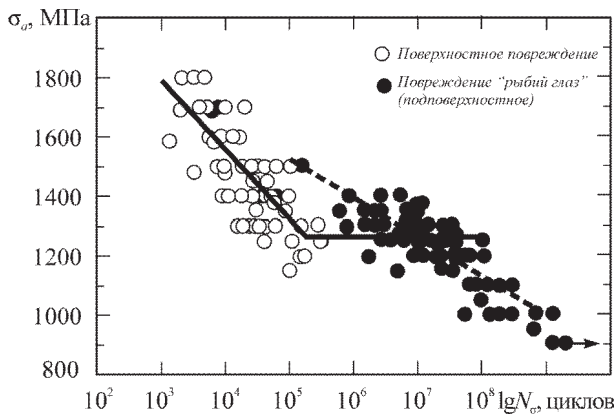


Рисунок 9 — Кривая механической усталости стали SUJ2, построенная по различным критериям достижения предельного состояния

Обобщение подобных экспериментальных данных привело некоторых исследователей к заключению, что полная кривая усталости, построенная в интервале от 1 до  $10^9$  циклов, может быть схематизирована так, как это представлено на рисунке 10 [7].

Авторы работы [17] сделали попытку дать обобщенную схематизацию полной кривой усталости (до базы  $10^9$ ), учитывая накопленный опыт анализа многочисленных и многообразных результатов усталостных испытаний. Согласно этой работе, на полной кривой усталости обнаруживаются четыре (*I, II, III, IV*) характерных участка, представляемые обычно отрезками прямой линии с различным углом наклона  $\alpha$  к оси абсцисс (рисунок 11).

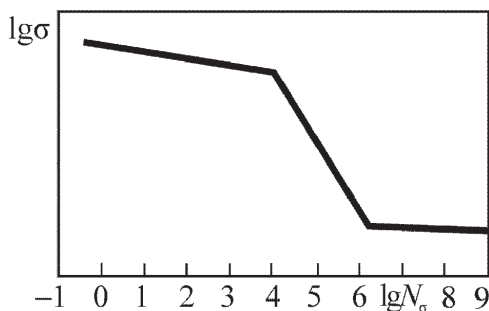


Рисунок 10 — Общий характер кривой  $\lg \sigma - \lg N_\sigma$

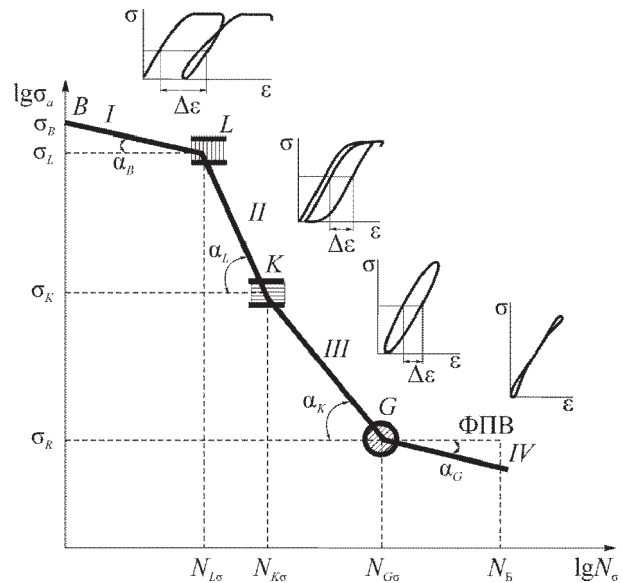


Рисунок 11 — Обобщенная схема полной кривой механической усталости

Для области *I* квазистатической усталости характерно относительно большое изменение долговечности при малом изменении напряжения. Разрушение здесь обусловлено, в случае испытания мягкой стали, развитием больших пластических деформаций: зависимость  $\sigma - \epsilon$  в одном цикле нагружения представляет собой открытую петлю пластического гистерезиса. Долговечность образцов обычно составляет от нескольких десятков до нескольких сотен (иногда до тысячи) циклов.

Для области *II* малоциклового усталости характерно, наоборот, относительно небольшое изменение долговечности при значительном снижении напряжения. Разрушение в этом случае обусловлено процессом упругопластического деформирования: зависимость  $\sigma - \epsilon$  в одном цикле нагружения представляет собой незамкнутую петлю упругопластического гистерезиса. Малоцикловая усталость наблюдается в диапазоне долговечности примерно  $10^3 \dots 10^4$  циклов.

Для кривой *III* многоциклового усталости угол наклона  $\alpha_K$  меньше, чем угол наклона  $\alpha_L$  кривой малоциклового усталости, но обычно больше, чем угол наклона  $\alpha_{B7}$  кривой квазистатической усталости. Разрушение здесь обусловлено накоплением неупругих деформаций: зависимость  $\sigma - \epsilon$  представляет собой замкнутую петлю механического гистерезиса. Поскольку микропластичность, развивающаяся в отдельных структурных составляющих материала, оказывается ответственной за усталостное разрушение в этой области, оно носит квазихрупкий характер: испытываемый образец не обнаруживает измеримой остаточной деформации. Однако электронномикроскопическое исследование усталостных изломов при многоциклового усталости показало наличие механизмов и вязкого, и хрупкого разрушения. Долговечность при многоциклового



усталости заключена ориентировочно в интервале  $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$  циклов.

Область *IV* высокоресурсной усталости (испытания на воздухе при комнатной температуре) реализуется лишь для материалов с нестабильной структурой. Если структура испытуемого материала не подвержена деформационному старению, то на кривой усталости обнаруживается горизонтальный участок, соответствующий (физическому) пределу выносливости (ФПВ, см. пунктирную линию на рисунке 11). Петля механического гистерезиса в области *IV* вырождается: зависимость  $\sigma-\varepsilon$  оказывается практически пропорциональной, хотя и с возможными особенностями (вторичными петлями) в начале и в конце одного цикла нагружения. Разрушение здесь обусловлено нанопластичностью и носит, как правило, хрупкий характер; долговечность превышает  $10^7$  циклов.

В зонах перехода от одной области к другой обычно обнаруживают два разрыва кривой усталости (зоны *K*, *L*), наличие которых свидетельствует о смене преимущественного механизма разрушения.

Если полная кривая усталости реализуется так, как показано на рисунке 11, то ясно, что ее аналитическое описание не может быть представлено в виде единого уравнения. С другой стороны, поскольку участки *I-IV* полной кривой усталости, построенной в двойных логарифмических координатах, являются прямыми линиями, то их можно описать простейшим степенным уравнением

$$\sigma^{m_\sigma} N_\sigma = C_\sigma = \text{Const} \quad (1)$$

со своими (для каждого участка) параметрами  $m_\sigma$  и  $C_\sigma$ . Найти их нетрудно, если известны координаты точек *L*, *K* и *G*. В некоторых экспериментах перелом кривой усталости в точке *K* не обнаруживается, и тогда участки *II* и *III* аппроксимируют одной плавной линией.

Исходя из изложенного, можно предложить систему параметров сопротивления усталости, определяемых и по напряжениям, и по долговечности (таблица 1).

Прошло немало лет, прежде чем была поставлена задача экспериментальной проверки схемы полной кривой усталости, представленной на рисунке 11. Чтобы это сделать, потребовалось, прежде всего, избавиться от всех методических погрешностей предыдущих испытаний в широком диапазоне долговечности (от  $N_\sigma = 1$  до  $10^8 \dots 10^9$  циклов). Это означало, что для всей серии планируемых испытаний следует: 1) принять единый типоразмер образцов, изготовленных из одного материала; 2) все испытания провести на одной машине (с определенным способом силового возбуждения); 3) испытания в малоцикловой, многоцикловой и высокоресурсной областях провести при единой (неизменяемой) частоте; 4) наконец, принять одинаковый критерий достижения пре-

Таблица 1 — Система предельных характеристик сопротивления усталости

По напряжениям		По долговечности
$\sigma_L$	Предел квазистатической усталости	$N_L$
$\sigma_K$	Предел малоцикловой усталости	$N_K$
$\sigma_G$	Предел многоцикловой усталости	$N_G$
$\sigma_D$	Ограниченный предел высокоресурсной усталости (гигаусталости)	$N_D$

дельного состояния для всех режимов и условий усталостных испытаний.

Результаты таких испытаний приведены на рисунках 12 и 13.

Для построения этой кривой проведены испытания серии образцов, изготовленных из легированной стали 18ХГТ ( $\sigma_B = 1700$  МПа, твердость — 58 ... 62 HRC после цементации на глубину ~1 мм). Образцы изготовлены по технологии, применяемой для производства зубчатых колес из стали 18ХГТ номенклатуры ПО «ГОМСЕЛЬМАШ». Тем самым результатам испытаний придается практически важное значение. Испытания проведены при чистом изгибе с вращением образцов круглого сечения (рисунок 14) на машине типа UBM фирмы Walter+Bai AG (рисунок 15).

Частота вращения образцов при испытаниях составляла 3000 мин<sup>-1</sup>. Испытания проводили непрерывно до достижения предельного состояния. Критерием предельного состояния было принято разделение образца на две части (усталостный излом).

Всего испытано: 20 образцов на усталость и 1 образец на растяжение (на разрывной машине марки LFV-100.1).

На графике (см. рисунок 12) отчетливо устанавливаются, в соответствии с рисунком 11, четыре характерных участка (*I* — квазистатическая усталость, *II* — малоцикловая усталость, *III* — многоцикловая усталость, *IV* — высокоресурсная усталость), а также координаты характерных точек ( $\sigma_B$  — предел прочности,  $\sigma_L$  — предел квазистатической усталости,  $\sigma_K$  — предел малоцикловой усталости,  $\sigma_G$  — предел многоцикловой усталости,  $\sigma_D$  — предел высокоресурсной усталости).

На рисунке 13 представлена полная кривая усталости, построенная в относительных координатах  $\sigma_a / \sigma_B - N / 10^9$ . Ее характер принципиально повторяет полную кривую усталости в обычных координатах (см. рисунок 12) с теми же ее характерными участками.

Численные значения координат характерных точек кривой усталости *B*, *L*, *K*, *G*, *D*, показателей

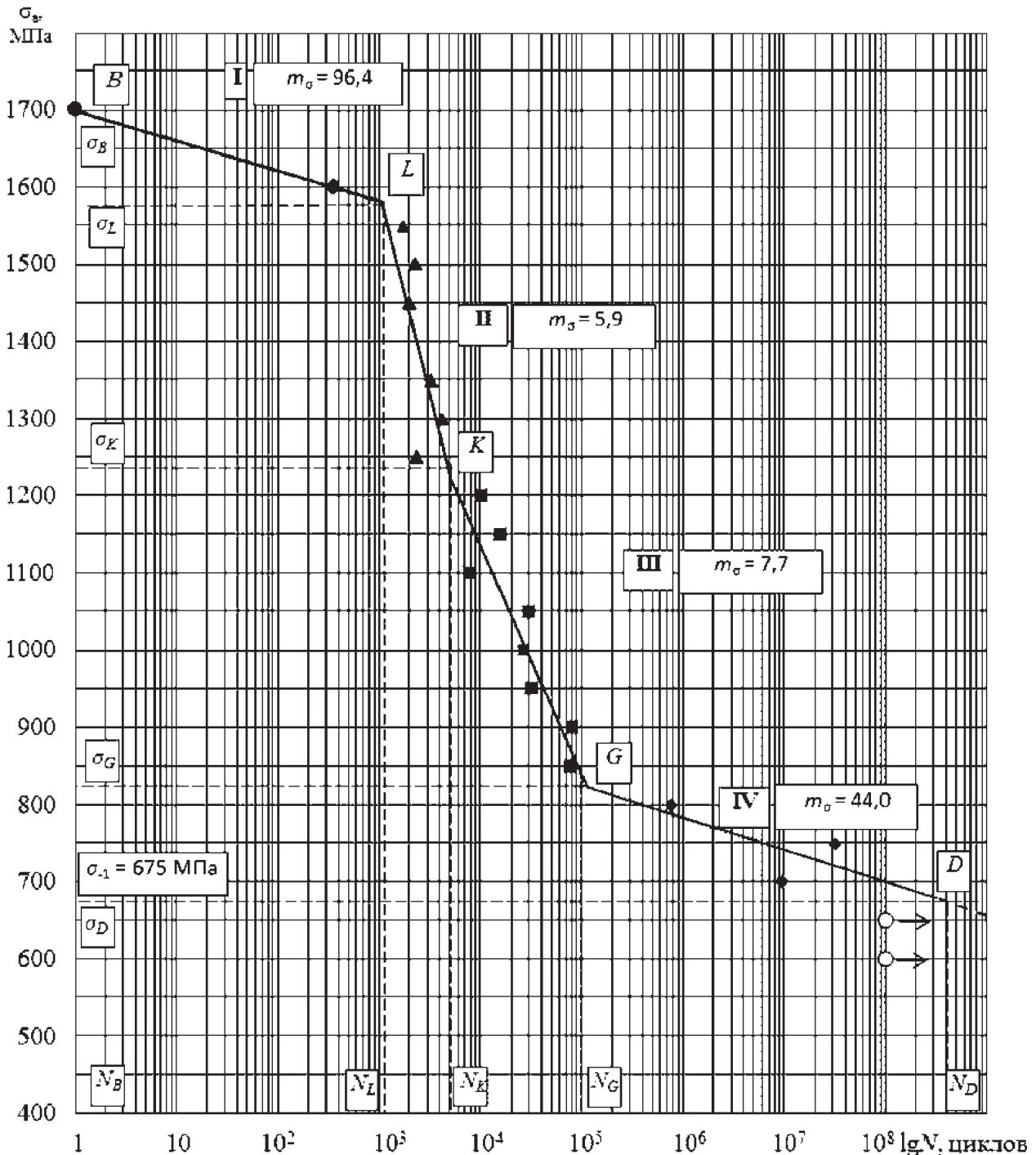


Рисунок 12 — Полная кривая механической усталости образцов стали 18ХГТ

наклона левой ветви кривой усталости  $m_\sigma$  на каждом из четырех участков приведены в таблице 2.

В таблице 3 представлены результаты аппроксимации опытных данных уравнением типа (1) с оценкой погрешностей.

В таблице 4 представлены фотографии характерных изломов образцов, выбранные для каждого из участков полной кривой усталости. Видно, что характер излома меняется с изменением нагрузки и количества циклов до разрушения образца. Различие особенно заметно для образцов из участка I и участка IV. Результаты исследований

повреждаемости и характера изломов на разных участках полной кривой усталости будет дан в последующей нашей работе.

Анализ изложенных выше экспериментальных данных приводит к следующим основным заключениям.

1. В данной работе, по имеющимся сведениям, впервые выполнено экспериментальное построение полной кривой механической усталости по результатам испытаний образцов одного материала в одинаковых условиях на базе  $10^8$  циклов.

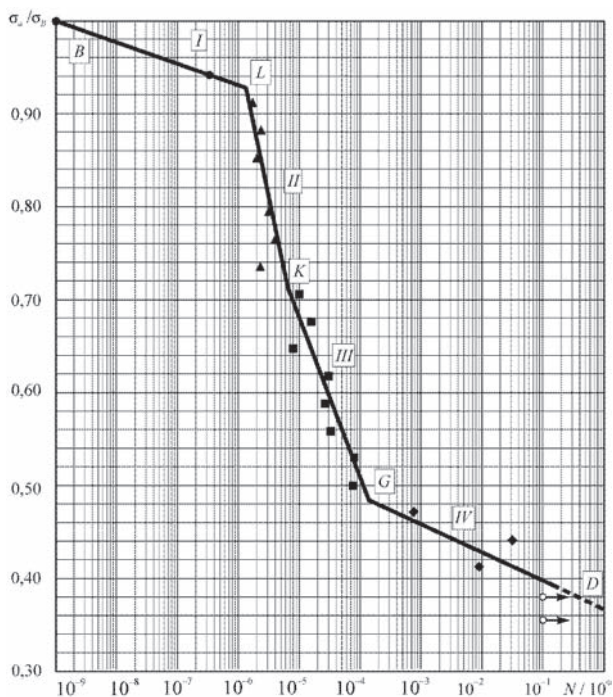


Рисунок 13 — Полная кривая механической усталости стали 18ХГТ, построенная в относительных координатах

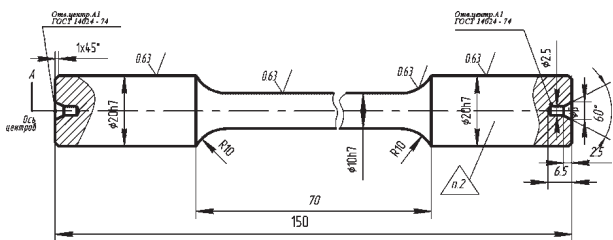


Рисунок 14 — Образец для испытаний на механическую усталость при чистом изгибе

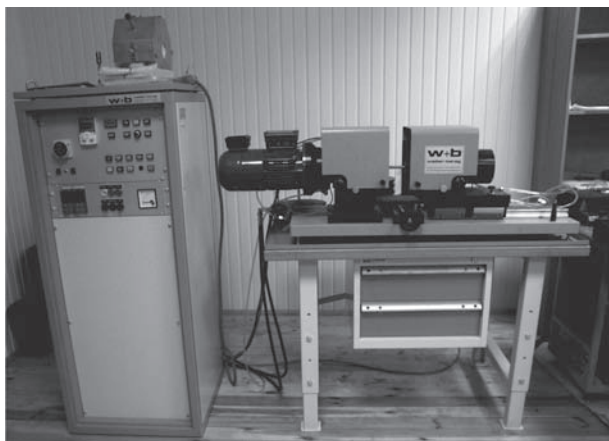


Рисунок 15 — Машина UBM для испытаний на механическую усталость при чистом изгибе с вращением

2. Разработана и реализована методика таких испытаний, базирующаяся на следующей совокупности процедур и условий: 1) для всей серии испытаний, содержащей 21 образец, принят их единый типоразмер: диаметр 10 мм и рабочая длина 70 мм; 2) все образцы изготовлены из од-

ной марки стали (18ХГТ) по технологии, принятой для производства зубчатых колес номенклатуры ПО «ГОМСЕЛЬМАШ»; 3) все испытания проведены на одной машине с грузовым силовозбуждением по схеме чистого изгиба с вращением; 4) испытания в малоцикловой, многоцикловой и высокоресурсной областях проведены при одинаковой (неизменяемой) частоте: 3000 мин<sup>-1</sup>; 5) принят и реализован единый критерий достижения предельного состояния для всех режимов и условий испытаний: усталостное разрушение (разделение образца на 2 части); 6) не допускалось остановки машины при испытаниях в период до достижения предельного состояния или до принятой базы испытаний; при отказах в электропитании результаты испытаний аннулировались; 7) все испытания проведены в условиях комнатной температуры (21 ± 3 °С).

3. Полная кривая усталости, построенная по результатам таким образом проведенных испытаний, имеет 4 характерных участка (см. рисунок 12). Представление этой кривой в относительных координатах (см. рисунок 13) позволяет установить, что на базе 10<sup>8</sup> циклов разрушающее напряжение составляет примерно 40 % от предела прочности; повторно-переменные нагрузки, следовательно, обуславливают падение прочности стали на ~60 %.

4. Показано, что аппроксимация всех участков известным степенным уравнением (1) правомерна и имеет удовлетворительную погрешность (см. таблицу 3).

5. Предложено в отличие от традиционного подхода, характеризовать предельное состояние не одним из двух параметров (см. таблицу 1), а двумя параметрами совместно (см. таблицу 2).

Таблица 2 — Численные значения основных характеристик сопротивления усталости

Участок	Обозначение	$s_L(N_L)$	$m_{s(I)}$	$Ds_{(I)}$	$DN_{(I)}$
I	Численное значение	1575(1,2·10 <sup>3</sup> )	96,4	125	1,2·10 <sup>3</sup>
	Обозначение	$s_K(N_K)$	$m_{s(II)}$	$Ds_{(II)}$	$DN_{(II)}$
II	Численное значение	1230(4,8·10 <sup>3</sup> )	5,9	345	3,6·10 <sup>3</sup>
	Обозначение	$s_G(N_G)$	$m_{s(III)}$	$Ds_{(III)}$	$DN_{(III)}$
III	Численное значение	825(1,1·10 <sup>5</sup> )	7,7	405	6,2·10 <sup>4</sup>
	Обозначение	$s_D(N_D)$	$m_{s(IV)}$	$Ds_{(IV)}$	$DN_{(IV)}$
IV	Численное значение	675(4,1·10 <sup>8</sup> )	44,0	150	4,09·10 <sup>8</sup>

Таблица 3 — Погрешность аппроксимации опытных данных уравнением типа (1)

Участки	Уравнение типа (1)	$\sigma$ , МПа	$N_{\text{эксп}}$ , цикл	$N_{\text{расч}}$ , цикл	Погрешность $\Delta N$ , %
Участок I	$N_{\sigma} = 1,2 \cdot 10^3 \left( \frac{1575}{\sigma} \right)^{96,4}$	1700	1	0,8	+20
		1600	346	263	+23
Участок II	$N_{\sigma} = 4,8 \cdot 10^3 \left( \frac{1230}{\sigma} \right)^{5,9}$	1550	1 724	1 227	+28
		1500	2 296	1 489	+35
		1450	1 979	1 818	+8
		1350	3 258	2 772	+14
		1300	4 193	3 463	+17
		1250	2 342	4 364	-86
Участок III	$N_{\sigma} = 1,1 \cdot 10^5 \left( \frac{825}{\sigma} \right)^{7,7}$	1200	10 351	6 143	+40
		1150	15 746	8 525	+45
		1100	7 900	12 005	-51
		1050	30 395	17 176	+43
		1000	26 775	25 008	+6
		950	32 169	37 120	-15
		900	79 203	56 288	+28
		850	78 236	87 410	-11
Участок IV	$N_{\sigma} = 4,1 \cdot 10^8 \left( \frac{675}{\sigma} \right)^{44,0}$	800	759 369	232 375	+69
		750	31 755 035	3 976 072	+87
		700	9 467 986	82 762 976	-88

Так, например, для участка II малоциклового усталости предельное состояние описывается величиной  $\sigma_K(N_K) = 1230 (4,8 \cdot 10^3)$ , что означает:  $\sigma_K = 1230$  МПа,  $N_K = 4,8 \cdot 10^3$  циклов.

б. Показано, что характерный диапазон разрывающих напряжений ( $\Delta\sigma$ ) существенно раз-

личен на разных участках полной кривой усталости, и он изменяется от  $\Delta\sigma_{(I)} = 125$  МПа до  $\Delta\sigma_{(III)} = 405$  МПа. При этом диапазоны изменения  $\Delta\sigma$  сопоставимы для I и IV участков с одной стороны, для II и III участков с другой стороны. А по долговечности картина иная: самым продолжительным является участок IV, тогда как продолжительность участков I, II и III — одного порядка (см. таблицу 2).

7. Авторы считают, что схематизация полной кривой усталости, представленная на рисунках 11, 12 и 13, не является законченной; напротив, это — лишь начало обобщающих исследований. По нашему мнению, большой практический интерес представляет и детализация каждого из участков (см. рисунок 5).

8. В работе впервые доказана адекватность теоретической схематизации и экспериментальной конкретизации полной кривой механической усталости.

9. Получен полный комплекс характеристик прочности и долговечности стали 18ХГТ, принятой для изготовления зубчатых колес; они могут быть использованы для расчета зубчатых колес на усталость при изгибе.

#### Список литературы

1. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. в 2 т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с.; Т. 2. — 825 с.
2. Fatigue Damage of Materials. Experimental and Analysis // Ed. by: A. Varvani-Farahani, Ryerson University, Canada and C.A. Brebbia; Wessex Institute of Technology, UK. — 2003. — 528 p.
3. Lalanne, C. Fatigue Damage / C. Lalanne. ISTE –Wiley. — 2009.

Таблица 4 — Фото характерных изломов образцов для каждого из участков полной кривой усталости

	Статическое разрушение: $\sigma_B = 1700$ МПа, $N_{\sigma} = 1$ цикл
	Квазистатическое разрушение: $\sigma_a = 1600$ МПа, $N_{\sigma} = 346$ циклов
	Малоцикловое разрушение: $\sigma_a = 1300$ МПа, $N_{\sigma} = 4193$ циклов
	Многоцикловое разрушение: $\sigma_a = 1050$ МПа, $N_{\sigma} = 30395$ циклов
	Высокоресурсное разрушение: $\sigma_a = 750$ МПа, $N_{\sigma} = 31\,755\,035$ циклов



4. Gouth, H.J. The fatigue of metals / H.J. Gouth. — London, 1926.
5. Miner, M.A. in «Metal Fatigue» / ed. by G Sines. and J.L. Waisman. — N.Y.-Toronto-Lnd., 1959. — Pp. 278—289.
6. French, H.J., Trans. Am. Soc. Steel Treating, 21, 899 (1933).
7. Zambrow, I.L., Fontana, M. Trans. Am. Soc. Met., 480, 1949.
8. E. Czerold u. K. Trauchte. Arch. Eisenhüttenwesen, H. 5/6, S. 175.
9. Марковец, М.И. Об уравнении диаграммы усталости / М.И. Марковец // Прочность металлов при переменных нагрузках: материалы 3-го совещания по усталости металлов, 5—9 марта 1962 г.). — М.: Изд-во Академии наук, 1963. — С. 157—164.
10. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. — М.: Metallurgy, 1965. — 456 с.
11. Гусенков, А.П. Об условиях усталостного и квазистатического разрушения при малом числе циклов нагружения / А.П. Гусенков, В.В. Ларионов // Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения. — М.: Наука, 1967. — С. 83—92.
12. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
13. Bathias, C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / C. Bathias, P.C. Paris. — New York: Marcel Dekker, 2005. — 304 p.
14. Сосновский, Л.А. Механика усталостного разрушения: словарь-справ. / Л.А. Сосновский. — Гомель: ТРИБОФАТИКА, 1994. — Т. 1. — 328 с.; Т. 2. — 340 с.
15. Усталостные испытания при высоких частотах нагружения / В.А. Кузьменко [и др.]. — Киев: Наук. думка, 1979. — 336 с.
16. Кузьменко, В.А. Усталостные испытания конструкционных материалов на высоких звуковых и ультразвуковых частотах нагружения / В.А. Кузьменко // Механическая усталость металлов: материалы VI Междунар. коллоквиума. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 330—336.
17. Сосновский, Л.А. О полной кривой усталости / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1995. — № 5. — С. 33—34.

---

Sosnovskiy L.A., Taranova E.S., Turin S.A.

#### About full fatigue curve

The review is given and methods of a schematization of full fatigue curve on base to  $10^7$  cycles and to  $10^9$  cycles are analysed. It is shown that the question on its construction is debatable. For experimental check the generalised schematization of full fatigue curve offered in work [17] is accepted. In article the basic methodical principles of carrying out of correct fatigue tests (in a wide range of change of durability) are formulated. Their realisation has led to construction of the generalised curve consisting of 4 sites: quasistatic (*I*), smallcyclic (*II*), multicyclic (*III*) and high-resource (*IV*) fatigue. In work the analysis of the received results is given. In particular, it is shown that approximation of sites by the known sedate equation states a comprehensible estimation of fatigue durability. It is offered to characterise system of key parametres of a limiting condition two numbers ( $\sigma_{lim}(N_{\sigma_{lim}})$ ) which define as value of fatigue strength ( $\sigma_{lim}$ ) for this site, and durability ( $N_{\sigma_{lim}}$ ) at which it is reached.

Поступила в редакцию 20.04.2012.