

НКАП — СССР

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ
им. П. И. Баранова

62.9.13

Т 78

ТРУДЫ ЦИАМ

№ 91

ОБ УТОМЛЯЕМОСТИ СТАЛИ
ПРИ ПОВТОРНЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

БАХАРЕВ В. М.

Республіканская
навукова-тэхнічная
бібліятэка

НКАП — ОБОРОНГИЗ — 1945

Д В О

В работе освещены результаты экспериментальных исследований прочности конструкционных сталей в условиях неустановившихся режимов переменных напряжений. Выяснены условия эквивалентности различных режимов в связи с вопросами расчета и испытания на прочность динамически нагруженных деталей.

1. Введение
2. Экспериментальные исследования
3. Результаты исследований
4. Заключение

С. 1

ОБ УТОМЛЯЕМОСТИ СТАЛИ ПРИ ПОВТОРНЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

Введение

Практика эксплуатации машин и соответствующие испытания на прочность показали, что детали могут работать без усталостных разрушений и в том случае, если амплитуда переменных напряжений иногда превышает предел усталости.

В настоящее время становится все более актуальным вопрос об утомляемости металла в связи с влиянием перегрузок, недогрузок и периодов прекращения действия переменных напряжений («отдыха»). Изучение утомляемости металла связано с дальнейшим углублением расчета деталей применительно к условиям эксплуатации.

В настоящей работе освещены результаты исследований прочности сталей при переменных напряжениях с изменяющейся амплитудой¹, а также изложены некоторые соображения относительно использования этих данных для оценки прочности деталей и материалов.

ПОВРЕЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

В литературе широко освещены вопросы изменения прочности материала при переменных перегрузках. Френч [1]², Коммерс [2], Мюллер-Шток, Герольд, Шульд [3] предложили методы механических испытаний, при которых о повреждении материала судят, с одной стороны, по величине напряжений, приводящих к усталостному излому, с другой, — по числу циклов, выдерживаемых до разрушения.

Мюллер-Шток и его соавторы предложили определять повреждение материала в результате определенного числа перегрузок по изменению числа циклов, выдерживаемых этим материалом, на некотором другом «контрольном» напряжении. Для вычисления величины повреждения ими предложена формула

$$S = \frac{N_0 - N_k}{N_0} 100\%,$$

где N_0 — число циклов, выдерживаемых на контрольном напряжении образцами, которые не подвергались перенапряжениям; N_k — то же для образцов, подвергавшихся перенапряжениям.

В качестве контрольного напряжения авторы предлагают брать очень высокое перенапряжение. В опытах, произведенных с мягкой углеродистой сталью, имеющей предел усталости при изгибе 22 кг/мм^2 и временное сопротивление $\sigma_b = 37 \text{ кг/мм}^2$, в качестве контрольного напряжения ими было

принято напряжение $\sigma_k = 32 \text{ кг/мм}^2$. По мнению авторов столь большое перенапряжение имеет преимущество перед меньшими, так как процесс понижения прочности повышенными напряжениями протекает пропорционально числу циклов и, следовательно, может служить удобной мерой при измерении повреждения.

На рис. 1 графически изображены зависимости величин повреждения от отношения числа циклов повреждающего напряжения к числу циклов этого напряжения, необходимому для разрушения неповрежденных образцов. Кривые, изображающие

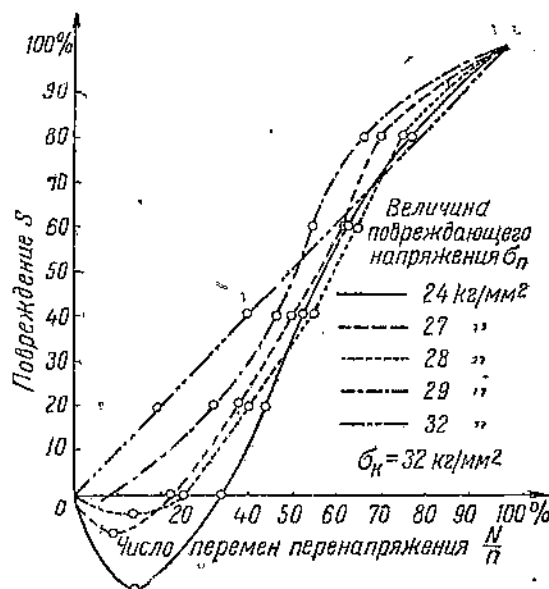


Рис. 1. Кривые повреждения в зависимости от числа циклов перегрузки.

рост повреждения, указывают на то, что его нарастание различно для различных величин перенапряжений, причем наибольшее различие имеет место в начале кривых повреждения.

При малых значениях величин повреждения первые их десятки тысяч перемен приводят даже к «упрочнению», которое выражается в том, что образцы, подвергавшиеся перенапряжениям, на контрольном напряжении выдерживают больше перемен напряжения, чем образцы, не подвергавшиеся перенапряжениям. Это упрочнение исчезает по мере увеличения величины перенапряжений и числа их перемен. Предельное число перемен, не вызывающее повреждения, как и при опытах Френча, уменьшается с увеличением величины перенапряжения.

После того как упрочнение исчерпается, начинается «повреждение», которое растет со скоростью, близкой к постоянной, почти до самого разрушения. Перед началом разрушения скорость

¹ Эти исследования проведены автором в лаборатории ЦИАМ под руководством академика Серенкина-Г. В.

² Цифры в прямых скобках означают ссылки на литературный источник.

ПРОВЕРЕН
532

роста повреждения несколько замедляется. Однако результаты этих исследований являются условными, так как форма полученных кривых и величины повреждений зависят от выбора величины контрольного напряжения. Если за величину контрольного напряжения взять другое, например, меньшее напряжение, равное 28 кг/мм^2 , то все кривые, изображающие рост повреждения, имели бы меньшую кривизну, а кривая, соответствующая повреждающему напряжению 28 кг/мм^2 , обратилась бы в прямую.

Автор произвел ряд опытов при повторном изгибе по исследованию изменения прочности под воздействием перенапряжений как при больших, так и при меньших контрольных напряжениях. Результаты этих опытов представлены на рис. 2

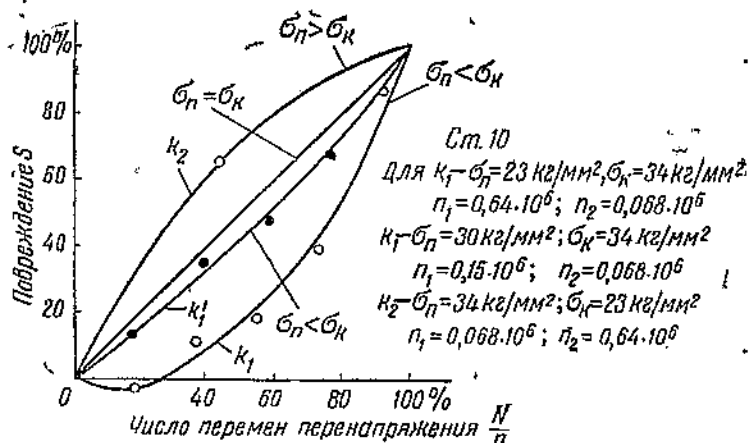


Рис. 2. Кривые повреждения для стали марки Ст. 10.

и 3. Что касается кривой повреждения для стали марки Ст. 10, в случае, когда контрольное (σ_k) напряжение больше повреждающего (σ_n), то ее форма совпадает с формой кривых, полученных Мюллер-Штоком.

Подобная кривая для стали 18ХНВА указывает на то, что способность к упрочнению этой стали во много раз больше, чем мягкой углеродистой стали.

Кривые повреждения, полученные из опытов в случае $\sigma_n > \sigma_k$, имеют другую форму, чем предыдущие. Во-первых, в этом случае повреждение начинается для углеродистой стали сразу же, с началом действия перенапряжений; для хромоникелевой стали ход кривой позволяет предполагать упрочнение, но если оно и есть, то очень незначительное. Во-вторых, в этом случае кривые указывают, что скорость процесса повреждения постепенно замедляется до самого разрушения образца.

Влияние перенапряжений на усталостную кривую мягкой углеродистой стали изучено Мюллер-Штоком [3]. Результаты этих опытов приведены на рис. 4. Каждая из усталостных кривых получена испытанием на усталость партии образцов, поврежденных определенным числом перенапряжений $\sigma_n = 32 \text{ кг/мм}^2$. Кривые показывают, что не только предел усталости, но и все ограниченные пределы усталости непрерывно понижаются с увеличением числа циклов перенапряжений.

Обобщая результаты исследований, сделанных на малоуглеродистых сталях, можно ход процесса повреждения, или, вернее, изменение прочности при переменных нагрузках, представить следующим образом. Предел усталости под действием

небольших перенапряжений вначале медленно понижается или даже несколько повышается, а затем наступает его снижение; перед самым разрушением наступает быстрое уменьшение предела усталости. Процесс снижения прочности при более

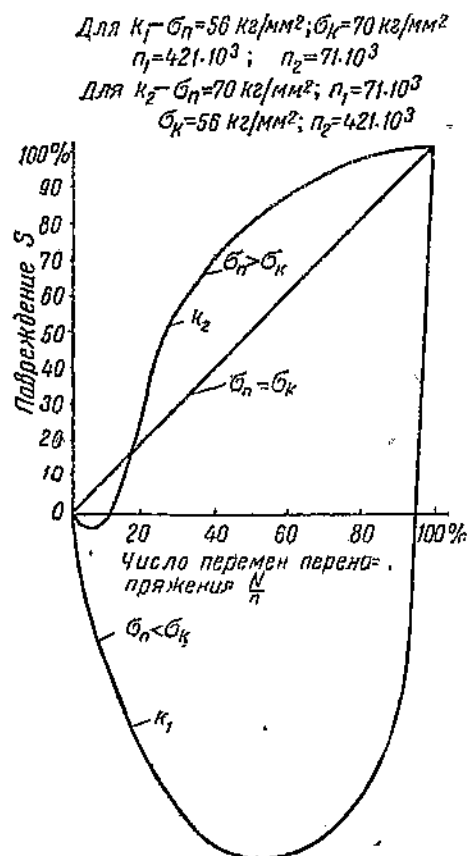


Рис. 3. Кривые повреждения для стали 18ХНВА.

высоких перенапряжениях происходит более равномерно. В этом случае повышения прочности стали не наблюдается.

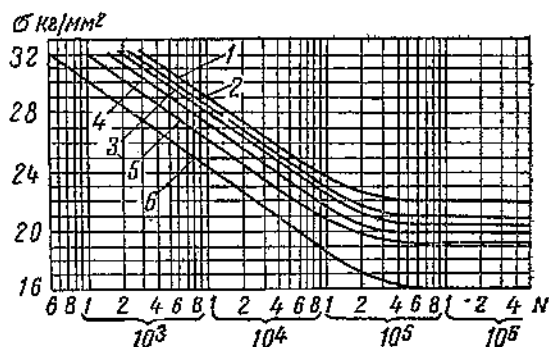


Рис. 4. Кривые усталости для образцов из стали 0,05% С, поврежденных перенапряжением $\sigma=32 \text{ кг/мм}^2$.

1—неповрежденные; 2—поврежденные $5 \cdot 10^3$ циклами; 3—поврежденные $10 \cdot 10^3$ циклами; 4—поврежденные $15 \cdot 10^3$ циклами; 5—поврежденные $20 \cdot 10^3$ циклами; 6—поврежденные $25 \cdot 10^3$ циклами (по Мюллер-Штоку).

Повреждение, оцениваемое величиной S, в случае $\sigma_k > \sigma_n$ выражается S-образной кривой, которая по мере увеличения σ_n выпрямляется, при $\sigma_k = \sigma_n$ обращается в прямую, а затем в выпуклую кривую, лежащую выше этой прямой (см. рис. 2).

Немногочисленные опыты о повреждаемости перенапряжениями высокоуглеродистых сталей, улучшенных, закаленных и в образцах с концентрацией напряжения позволяют только утверждать, что в этих сталях процессы повреждения материала протекают более неравномерно, чем в малоуглеродистых сталях, в особенности в начале повреждения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧИСЛА ЦИКЛОВ ДЛЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО РЕЖИМА С ПОСТОЯННОЙ АМПЛИТУДОЙ

В предыдущем параграфе было выяснено, что изменение прочности материала в результате действия перенапряжений, с одной стороны, зависит от величины повреждающей нагрузки, а с другой, — по-разному сказывается при действии последующих переменных нагрузок, приводящих материал к разрушению.

Далее было произведено исследование условий эквивалентности повреждения различными режимами перегрузок, принимая за критерий эквивалентности совпадение кривых усталости. При этом предполагалось, что эти условия получат наиболее простую форму, если напряжение σ_e режима с постоянной амплитудой выбрать таким, чтобы равные части (периоды) общего числа циклов напряжений (приводящих к разрушению при нагрузке с постоянной амплитудой, эквивалентной многоступенчатой нагрузке) давали по возможности одинаковые изменения прочности.

Можно предполагать, что это условие будет удовлетворять с достаточной для практического использования точностью, если для величины σ_e взять среднюю из величин всех амплитуд многоступенчатой нагрузки с учетом ее «веса». Вес каждой амплитуды принят пропорциональным числу циклов напряжений данной амплитуды, приводящих образец к разрушению (вычисляется по кривой Велера). Тогда для вычисления напряжения σ_e получается выражение

$$\sigma_e = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i \frac{N_i}{n_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}}, \quad (A)$$

где σ_i — величина амплитуды i -й ступени (рис. 5);
 N_i — число повторений σ_i на i -й ступени;
 n_i — число перемен σ_i , разрушающее образец;
 m — число ступеней.

Суммирование производится в пределах одного периода изменения амплитуды.

Если же амплитуда изменяется не ступенчато, а плавно (рис. 6), то предыдущее изменение примет вид

$$\sigma_e = \frac{\int_0^N \frac{\sigma dN}{n}}{\int_0^N \frac{dN}{n}}. \quad (B)$$

Для вычисления этого интеграла необходимо иметь аналитические выражения усталостной кривой $n=f(\sigma)$ и кривой изменения амплитуды $N=\varphi(\sigma)$.

Если таковые отсутствуют, то на основании их графических изображений можно произвести приближенное вычисление σ_e . Интегрирование производится в пределах одного периода изменения амплитуды.

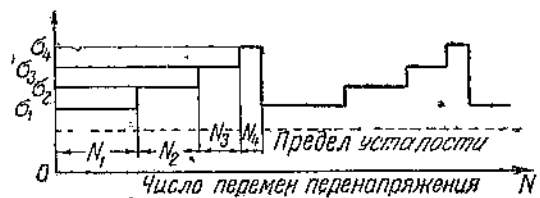


Рис. 5. Схема ступенчатого изменения амплитуды напряжений.

Для выяснения вопроса о влиянии последовательности действия напряжений с различной амплитудой на условия усталостного разрушения было проведено определение чисел циклов, необходи-



Рис. 6. Схема непрерывного изменения амплитуды напряжений.

мых для разрушения при нагружении образцов по различным схемам изменения амплитуды напряжений. Изменение амплитуды в пределах одного периода было принято одноступенчатое согласно

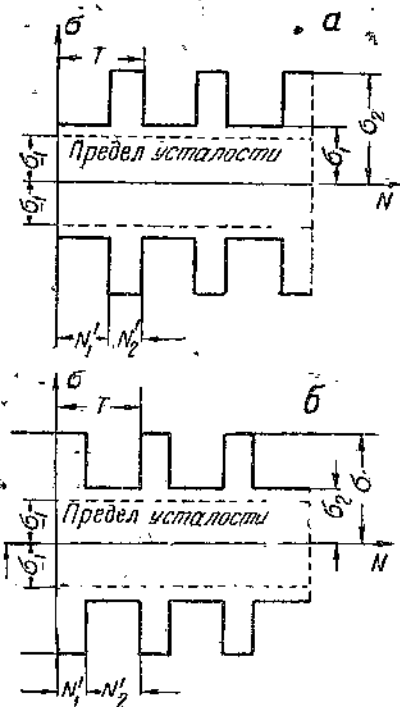


Рис. 7. Схема одноступенчатого изменения амплитуды напряжений.

схеме рис. 7. При этом в одном случае (рис. 7, а) период начинался с действия напряжений меньшей амплитуды, а потом действовали напряжения с большей амплитудой. В другом случае (рис. 7, б)

порядок изменения напряжений был принят обратным. Число периодов λ было принято: $\lambda=1$, $\lambda=10$ и $\lambda=40$.

Результаты испытаний наносились в относительных координатах $\frac{N_1}{n_1}$, $\frac{N_2}{n_2}$, где N_1 — общее число циклов действия напряжений с амплитудой σ_1

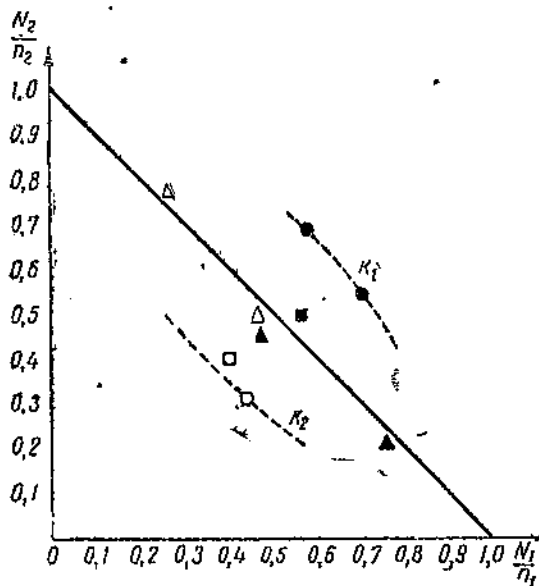


Рис. 8. Графики результатов испытаний стали марки Ст. 10 при различных схемах изменения амплитуды напряжений.

(σ_1 — напряжения, действующие в начале периода); N_2 — общее число циклов действия напряжений с амплитудой σ_2 (σ_2 — напряжения, действующие в конце периода), после которого образец разрушается; n_1 — число циклов напряжений с амплитудой

Это подтверждается результатами экспериментов, проведенных на образцах из стали Ст. 10 на переменный изгиб. На рис. 8 приведены эти результаты. Каждая точка получена как среднее из испытаний трех-пяти образцов. Зачерненные точки соответствуют схеме изменения амплитуды напряжений по рис. 7, а, точки незачерненные — по рис. 7, б. Точки, обозначенные кружками, получены при непрерывном действии сначала напряжения одной амплитуды, а потом другой — до разрушения образца, т. е. при одном периоде изменения амплитуды ($\lambda=1$); точки, обозначенные квадратиками, получены для случая, когда амплитуда напряжения за время разрушения образца изменялась 10 раз ($\lambda=10$), а точки, отмеченные треугольниками, соответствуют сорокакратному изменению амплитуды ($\lambda=40$). На рис. 8 видно, что при $\lambda=10$ точки, соответствующие кривым K_1 и K_2 , лежат далеко от прямой $\frac{N_1}{n_1} + \frac{N_2}{n_2} = 1$, причем точка, со-

ответствующая схеме 7, а, заметно придвинулась к этой прямой.

При $\lambda=40$ для обоих случаев точки находятся настолько близко к прямой, что соответствующую зависимость можно считать прямолинейной. Это позволяет получить формулу для приближенного вычисления числа периодов изменения напряжений, выдерживаемых образцом до разрушения при его нагружении по одноступенчатой схеме, если только число λ изменения амплитуды достаточно велико за время разрушения образца.

Обозначая через N'_1 число перемен напряжения σ_1 за один период изменения амплитуды, а через N'_2 число перемен напряжения σ_2 за то же время и предполагая линейную зависимость $\frac{N_1}{n_1} + \frac{N_2}{n_2} = 1$,

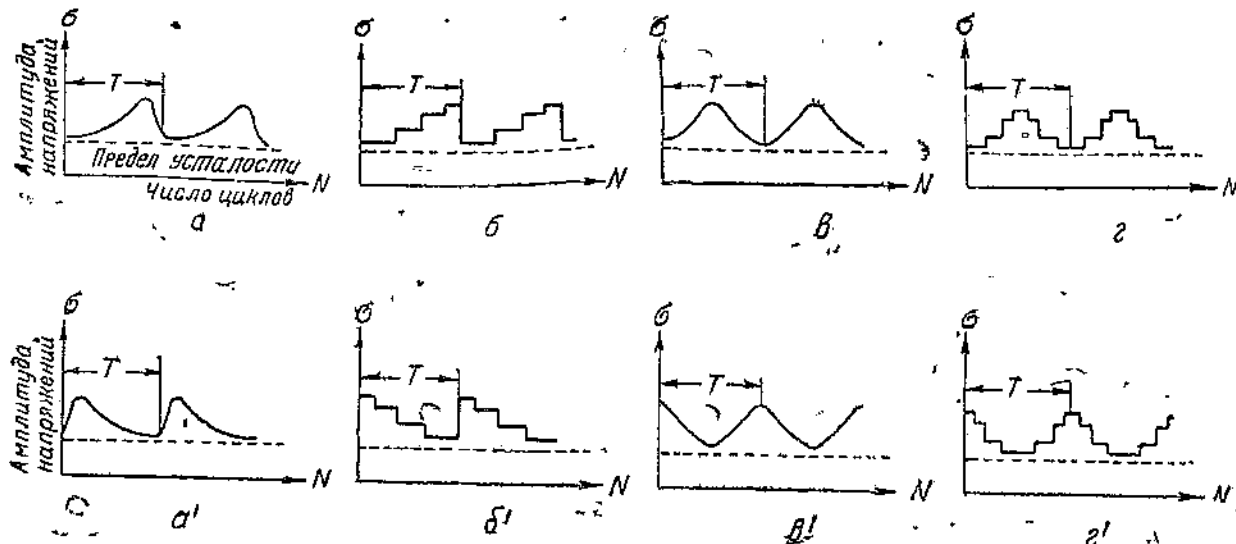


Рис. 9. Различные схемы изменения амплитуд напряжений.

дой σ_1 , приводящее материал к разрушению при непрерывности действия (определяется как абсцисса соответствующей кривой Велера); n_2 — то же самое для напряжений с амплитудой σ_2 .

Если число периодов λ изменения амплитуды за время разрушения образца будет столь большим, что действие одного периода не скажется значительно на всей работе образца за время разрушения, то тогда различие между работой материала по схеме нагружения а или б (рис. 7) исчезает.

можно написать уравнение этой прямой в таком виде:

$$\lambda \cdot \left(\frac{N'_1}{n_1} + \frac{N'_2}{n_2} \right) = 1,$$

так как

$$N_1 = \lambda N'_1 \text{ и } N_2 = \lambda N'_2.$$

Аналогичные соображения можно привести и относительно работы материала при многоступенчатом или плавном изменении нагрузки.

Если число периодов изменения нагрузки за время работы образца мало и не превышает 10—15, то режимы нагрузки, при которых в периоде действуют сначала нагрузки с меньшей амплитудой, а потом с большей (рис. 9, а, б, в, г), менее опасны, чем режимы нагрузок с обратным порядком изменения амплитуд напряжения (рис. 9, а', б', в', г').

Если же период уменьшить за счет уменьшения числа циклов на каждой ступени нагрузки, сохраняя величины амплитуд напряжения и соотношение между циклами, то можно предположить, что порядок чередования напряжения в пределах периода не имеет значения для продолжительности работы образца. Обозначим также через λ число периодов изменения амплитуд за время разрушения образца, через N'_i — число циклов напряжения σ_i за период, а через n_i — число циклов того же напряжения, необходимое для разрушения

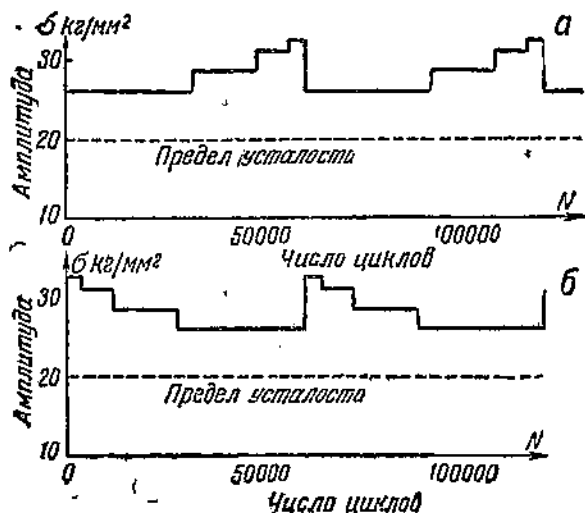


Рис. 10. Схема изменения амплитуд напряжений с большим периодом для стали марки Ст. 10.

образца при непрерывном его нагружении напряжением σ_i . Тогда λ найдем из условия

$$\lambda \left(\frac{N'_1}{n_1} + \frac{N'_2}{n_2} + \dots + \frac{N'_k}{n_k} \right) = 1, \quad (B)$$

откуда общее число циклов

$$N = \lambda (N'_1 + N'_2 + \dots + N'_k).$$

Эти соображения подтвердились результатами экспериментов, проведенных на образцах из стали марки Ст. 10 на машине DVL.

При режиме, изображенном на рис. 10, а (т. е. для случая, когда в периоде меньшие напряжения преобладают большим), образцы выдерживали до разрушения в среднем 353000 перемен напряжения или $\lambda \approx 6$ периодам. При обратном же порядке чередования амплитуд число перемен напряжения снизилось до $N=314000$, а число периодов до $\lambda \approx 5$.

Когда же период был уменьшен в 4 раза (рис. 11, а), то образцы до разрушения выдерживали в среднем 266000 перемен ($\lambda=18$) при режиме, изображенном на рис. 11, а и 270000 перемен ($\lambda=18$) при режиме, изображенном на рис. 11, б. Вычисления, произведенные для этих режимов по формулам (А) и (В), дают

$$N = 315000 \text{ и } \lambda = 21. \quad (Г)$$

Анализируя результаты этих экспериментов и сопоставляя их с расчетными, можно отметить, что число периодов $\lambda=18$ изменения амплитуды напряжения за время разрушения оказалось достаточным, чтобы оба режима (рис. 11, а и б) дали приблизительно одинаковое изменение периодов на-

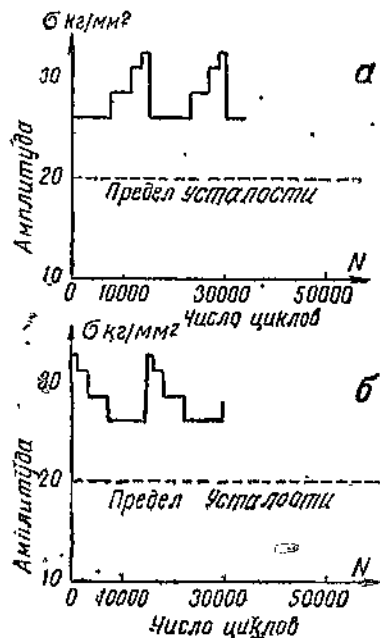


Рис. 11. Схемы изменения амплитуд напряжений с малым периодом для стали марки Ст. 10.

пряжения, необходимое для разрушения образца, и что предложенные формулы дают довольно близкие к экспериментальным величины N и λ (различие не превышает 15%).

Испытания же образцов по схемам, изображенным на рис. 12, дали следующие результаты:

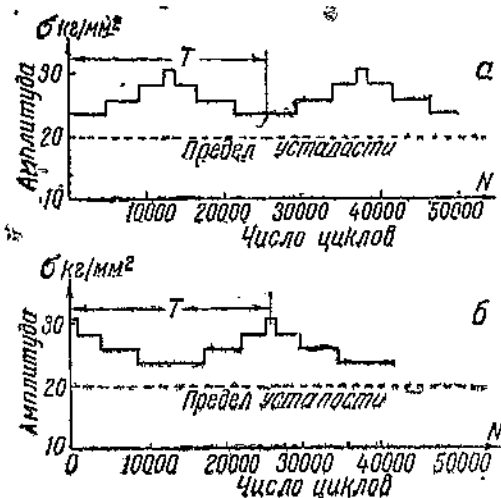


Рис. 12. Схемы изменения амплитуд напряжений при различной последовательности их изменения.

1) при нагружении образцов по схеме (рис. 12, а) общее число циклов напряжения, выдержанных образцом до разрушения, оказалось равным в среднем 335000; 2) при нагружении по схеме (рис. 12, б) оно получилось равным 301000; 3) вычисления по формулам (А) и (В) дали общее число циклов $N=318000$ и $\lambda=12,5$.

Отличие опытных результатов от расчетных данных меньше, чем в предыдущем опыте, и может быть объяснено рассеянием, свойственным усталостным разрушениям. Однако возможно также, что $\lambda=12$ еще недостаточно для того, чтобы полностью устранить разницу между влиянием режимов.

Необходимо также отметить, что для всех предыдущих расчетов использовалась усталостная кривая, которая была получена для большей точности не на пяти-восьми образцах (как это обычно принято при определении предела усталости), а на 20 образцах.

На основании условия (В) число периодов λ (с m ступенями изменения амплитуды каждый), приводящее образец к разрушению (при числе периодов большим 20—30), может быть вычислено при ступенчатом изменении нагрузки по формуле

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} \quad (Д)$$

и при плавном изменении нагрузки

$$\lambda = \frac{1}{\int_0^{N_T} \frac{dN}{n}} \quad (Е)$$

а общее число циклов напряжений для разрушения образца при многоступенчатом режиме нагрузки соответственно будет равно:

$$N_0 = \lambda \sum_{i=1}^m N_i = \frac{N_T}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} \quad (Ж)$$

где N_T — число циклов в одном периоде.

При непрерывном изменении напряжений

$$N_0 = \lambda \int_0^{N_0} dN = \lambda N_T = \frac{N_T}{\int_0^{N_T} \frac{dN}{n}} \quad (З)$$

Условие (В), экспериментально подтвержденное при больших значениях λ , свидетельствует о пропорциональности повреждения числу циклов перегрузочных напряжений.

Поэтому если материал подвергается действию эквивалентного перегрузочного напряжения, с постоянной амплитудой σ_0 , то, во-первых, необходимо, чтобы разрушение под влиянием этих напряжений наступило после числа циклов

$$n_0 = N_0 = \frac{N_T}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} = \lambda N_T \quad (И)$$

во-вторых, если материал подвергается действию переменных напряжений с меняющейся амплитудой действия λ' периодов (причем $\lambda' < \lambda$), то соответственное число циклов N' на эквивалентном напряжении с постоянной амплитудой составит

$$N' = n_0 \frac{\lambda'}{\lambda} = \lambda' n_0 \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i} \quad (К)$$

Выражения (А) и (К) позволяют определять величину амплитуды эквивалентного напряжения и число циклов его действия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Проверка условий эквивалентности в основном произведена на образцах из листовой стали марки Ст. 10; небольшая часть опытов произведена на образцах из стали 18ХНВА. Механические характеристики стали марки Ст. 10 после отжига при-

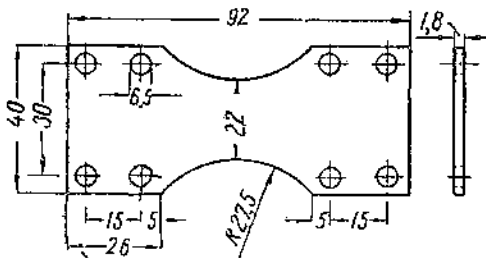


Рис. 13. Образец для испытания на переменный изгиб.

ведены в табл. 1. Испытания этой стали при переменных напряжениях производились на машине плоского повторного изгиба типа DVL, работающей по принципу постоянства амплитуды деформации на образцах, форма и размеры которых даны на рис. 13 и 14.

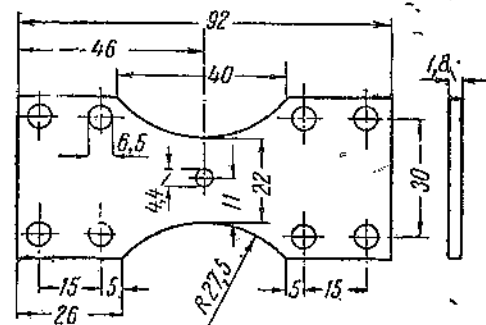


Рис. 14. Образец для испытания на переменный изгиб с концентрацией напряжений.

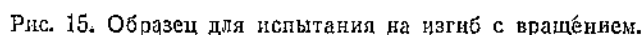
Образец, изображенный на рис. 13, применялся для проверки условий эквивалентности в случае отсутствия концентрации напряжений. Для проверки условий эквивалентности при наличии концентрации напряжений применялись образцы с просверленным отверстием (рис. 14). Отношение диаметра отверстия к ширине образца — $d:b = 1:5$. Окончательная отделка рабочих поверхностей образцов производилась наждачной бумагой, начиная от № 1 до 00 включительно.

Таблица 1

Марка стали	Предел текучести σ_s кг/мм ²	Временное сопротивление σ_b кг/мм ²	Коэффициент пластичности ψ	Твердость по Роквеллу H_{RC}	Предел усталости при изгибе σ_{-1} кг/мм ²
Ст. 10	22,1	31,5	50,4	28	21
18ХНВА	—	132	59,5	35	54

Окончательная отделка поверхности этих образцов производилась шлифовкой карборундовым камнем с крупностью зерна 60.

10/ 10/



На основании такой уточненной усталостной кривой расчет производился по формуле (А) напряжения с постоянной амплитудой, эквивалентной действию многоступенчатого режима. Число ступеней нагрузок в каждом периоде выбиралось равным 4—5, число циклов напряжений на каждой ступени стремились выбирать так, чтобы повреждения напряжениями различных амплитуд были равны между собой, при этом предполагалось, что это условие будет удовлетворяться при равенстве

абсолютное же число циклов на каждой ступени выбиралось из тех соображений, чтобы число периодов за время разрушения превышало 25—30, так как только при такой величине λ (как указано выше) порядок действия напряжений амплитудами не сказывается на величине повреждений.

Действительно, в последнем случае амплитуда напряжения с постоянной амплитудой, вычисленная по формуле (А), получает значение ближе к амплитуде доминирующего напряжения многоступенчатой нагрузки, и поэтому процессы повреждения, вызываемые эквивалентными нагрузками, будут между собой более сходны, чем при равенстве повреждений, вызываемых каждой ступенью нагрузки.

увеличению относительной погрешности отсчетов числа циклов повреждений, производимых при каждом изменении амплитуды.

В качестве минимальной амплитуды выбиралось напряжение, превышающее на 10—15% предел усталости и соответствующие по усталостной кривой 300 000—600 000 циклов. Экспериментирование с более низкими амплитудами представило бы большие трудности из-за повышенного разброса точек, имеющего место в нижней части усталостной кривой. Число циклов, повреждающего напряжения выбиралось таким образом, чтобы в образцах величины повреждения по Мюллеру заключались в пределах 10—70%.

Для проведения испытаний на прочность и для расчета желательного, чтобы эквивалентные режимы давали одинаковые степени повреждения по отношению возможно большего интервала величин перенапряжений. Поэтому проверка условий эквивалентности для основных испытаний производилась путем сопоставления усталостных кривых, полученных при испытаниях образцов, предварительно поврежденных эквивалентными режимами, причем усталостные кривые определялись в пределах от $30 \cdot 10^2$ — $50 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ циклов напряжений.

- На основании этих испытаний по методу Мюллера вычислялись величины повреждений и сравнивались между собой. Аналогично проверялась эквивалентность для тех испытаний, при которых полностью усталостные кривые получены не были. При испытаниях вычисление напряжений во всех случаях производилось по формуле

где M — изгибающий момент, а W — момент сопротивления для наименьшего сечения образца (нетто).

Для вычисления момента M условно использовались те показания динамометра, которые имели место при нагружении образца и которые в процессе работы первыми циклами напряжения могли понижаться. Это происходило по причине изменения ширины петли гистерезиса при нагружении образца перенапряжениями.

Так как снижение нагрузок имело место как на многоступенчатом режиме, так и при постоянной амплитуде, то предполагалось, что оно может быть

допущено для данных испытаний, носящих сравнительный характер. В качестве многоступенчатого режима выбран периодически изменяющийся пятиступенчатый режим, с возрастающими от ступени к ступени значениями напряжений. Значение напряжений, число их циклов на каждой ступени, а также число циклов, соответствующее по усталостной кривой каждому из этих напряжений, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ступень	Напряжение кг/мм ²	Число циклов напряжений на ступень	Число циклов по усталостной кривой	$\frac{N_i}{n_i}$
I	32,5	500	90 · 10 ³	0,556 · 10 ⁻²
II	28,6	700	126 · 10 ³	0,555 · 10 ⁻²
III	25,5	1300	240 · 10 ³	0,542 · 10 ⁻²
IV	24,0	2000	360 · 10 ³	0,556 · 10 ⁻²
V	23,0	3000	540 · 10 ³	0,556 · 10 ⁻²

Число периодов, необходимое для разрушения образца при таком режиме нагружения, равно:

$$\lambda = \frac{1}{\sum \frac{N_i}{n_i}} = 36.$$

Величина эквивалентного напряжения с постоянной амплитудой, рассчитанная по формуле (А), равна:

$$\sigma_e = \frac{\sum \sigma_i \frac{N_i}{n_i}}{\sum \frac{N_i}{n_i}} = 25,5 \text{ кг/мм}^2.$$

Соответствующее число циклов по кривой усталости составляет $n=240\,000$. Проверка эквивалентности производилась при повреждении следующими числами периодов многоступенчатой нагрузки:

$$\lambda' = \frac{\lambda}{2} = 18; \quad \lambda'' = \frac{\lambda}{3} = 12; \quad \lambda''' = \frac{\lambda}{6} = 6.$$

Им соответствуют числа циклов эквивалентной одноступенчатой нагрузки, рассчитанные по формуле (Б):

$$N' = 120\,000; \quad N'' = 80\,000; \quad N''' = 40\,000.$$

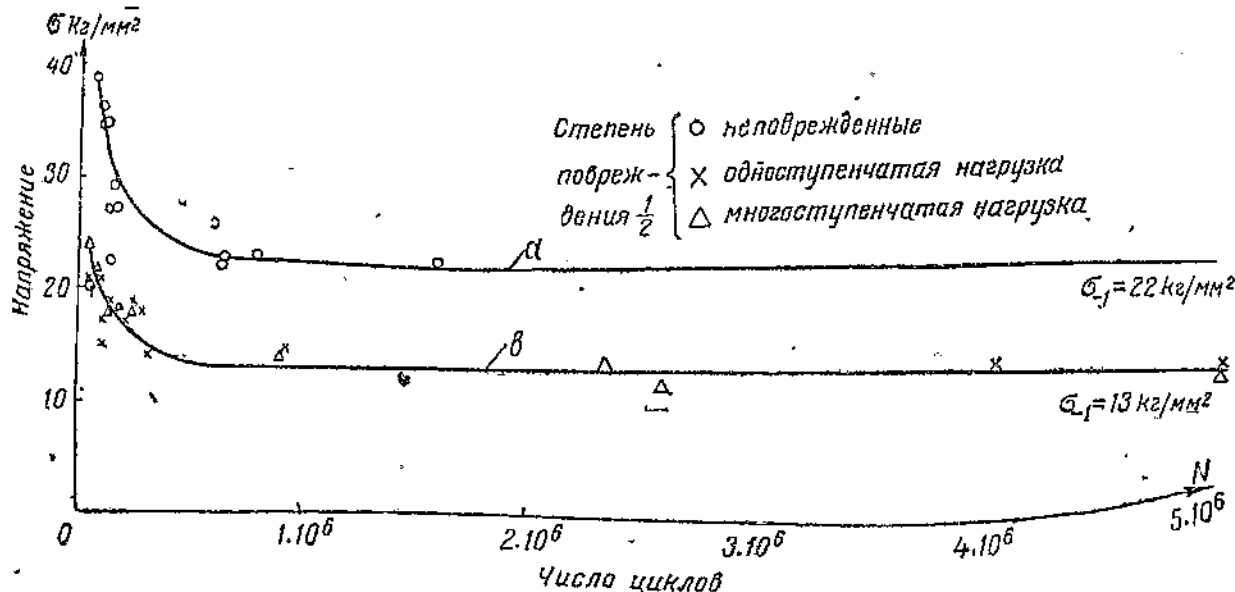


Рис. 16. Кривые усталости для гладких образцов из стали марки Ст. 10, поврежденных и не поврежденных перенапряжениями.

Для образцов, поврежденных $\lambda=18$ периодами многоступенчатой нагрузки, и образцов, поврежденных эквивалентным одноступенчатым режимом $N'=120\,000$, условия эквивалентности, проверены более подробно, чем для других степеней повреждения. Обе партии поврежденных этими режимами образцов затем подвергались испытанию на усталость по обычной методике.

На рис. 16 изображены результаты этих испытаний. Точки, полученные в результате испытаний обеих партий, хорошо укладываются на одну и ту же усталостную кривую, причем их рассеивание не превосходит тех, которые получились при испытании партий неповрежденных образцов (рис. 16, кривая а).

Для численного сравнения степеней повреждения, получаемых образцами на эквивалентных режимах, усталостная кривая b в двух точках подвергалась более подробным испытаниям. При контрольных напряжениях $\sigma_1=32,5 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma_2=23 \text{ кг/мм}^2$ испытано по четыре-пять образцов на обоих эквивалентных режимах. На основании средних результатов этих испытаний величины повреждения вычислены по формуле:

$$S = \frac{N_0 - N_k}{N_0} 100\%.$$

Результаты этих вычислений приведены в столбцах 7 и 8 табл. 3.

Таблица 3

№ по пор.	Число периодов, пробитых на многоступенчатом режиме	Число циклов на постоянном напряжении	Величины контрольных напряжений кг/мм ²	Среднее число циклов, выдержанных на контрольном напряжении		Величина повреждения, %		Расхождение, %
				после перегрузки с постоянной амплитудой	после многоступенчатой перегрузки	перегрузки с постоянной амплитудой	многоступенчатой перегрузки	
1	18	120000	32,5	38	44000	57,8	62,3	4,5
2	18	120000	23	158000	147000	70,6	72,8	+2,2
3	12	80000	23	292000	275000	46,0	49,1	-3,1
4	6	40000	23	392000	357000	27,4	34,0	+6,6

Наибольшее различие между величинами повреждений, созданных многоступенчатым режимом, и действием напряжений с постоянной амплитудой указывает на достаточную их эквивалентность. Проверка при других степенях повреждения ($\lambda''=12$, $\lambda''=6$) произведена только для одного значения контрольного напряжения $\sigma_k=23 \text{ кг/мм}^2$. Ее результаты приведены в табл. 3. Они указывают на вполне удовлетворительную эквивалентность режимов и при этих условиях.

При проверке эквивалентности на образцах Ст. 10 с поперечным отверстием расчет режимов сделан на основании усталостной кривой a , приведенной на рис. 17. В качестве многоступенчатого

Соответствующее число циклов по кривой усталости составляет $n_s = 180\,000$. Проверка эквивалентности производилась при повреждениях, создаваемых числами периодов многоступенчатой нагрузки $\lambda' = \frac{\lambda}{2} = 15$ и $\lambda'' = \frac{\lambda}{3} = 10$, и соответствующими им числами циклов эквивалентного одноступенчатого напряжения, рассчитанного по формуле (К) $N' = 90\,000$ и $N'' = 60\,000$. Поврежденные таким образом четыре серии по 6—8 образцов в каждой затем испытаны по обычной методике на усталость.

Результаты этих испытаний даны на рис. 17. Точки, полученные в результате испытаний каждой пары серий, поврежденных эквивалентными режи-

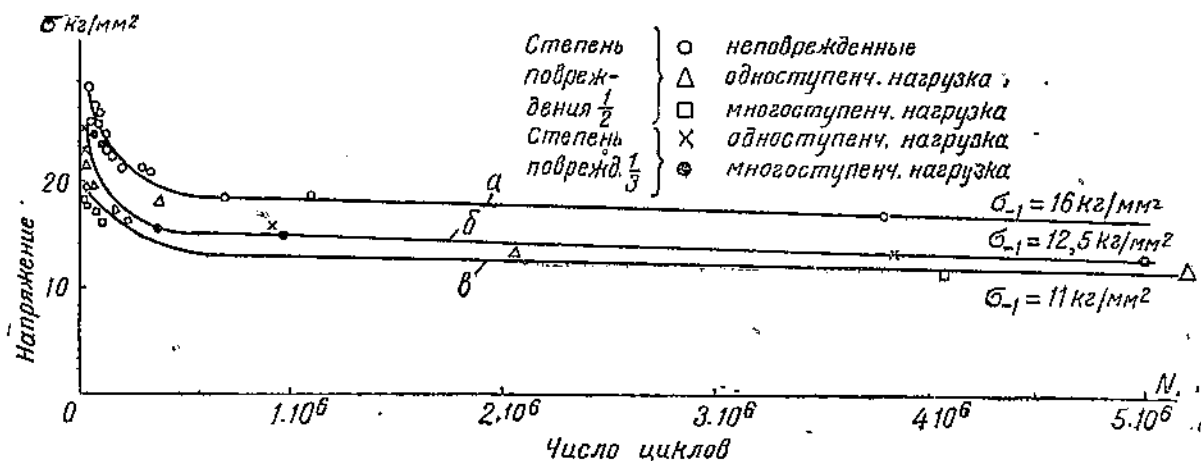


Рис. 17. Кривые усталости для образцов с отверстиями из стали марки Ст. 10, поврежденных и не поврежденных напряжениями.

режима выбрана четырехступенчатая периодически изменяющаяся нагрузка, данные которой приведены в табл. 4.

Таблица 4

Степень	Напряжения кг/мм²	Число циклов напряжения на i-й ступени N_i	Число циклов по усталостной кривой n_i	$\frac{N_i}{n_i}$
I	18,0	5800	700 000	0,00830
II	20,5	2200	270 000	0,00815
III	23,0	1000	120 000	0,00835
IV	26,0	500	60 000	0,00835

Число периодов, необходимое для разрушения образца при таком режиме нагружения, рассчитанное по формуле (Д), равно:

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} \approx 30.$$

Величина эквивалентного напряжения с постоянной амплитудой, рассчитанная по формуле (А), равна

$$\sigma_s = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i \frac{N_i}{n_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} \approx 22 \text{ кг/мм}^2.$$

мами, довольно хорошо укладываются на одну и ту же усталостную кривую. Это указывает на справедливость изложенных условий эквивалентности для образцов с концентрацией напряжений в широком диапазоне величин напряжений и при различных степенях повреждения.

Сравнивая усталостные кривые (рис. 17), полученные в результате испытаний образцов, поврежденных 10-ю периодами (кривая б) и 15-ю периодами (кривая в), с усталостной кривой для неповрежденных образцов (кривая а), можно отметить, что предел усталости до $\frac{\lambda}{3}$ уменьшается быстрее, чем при действии последующих периодов.

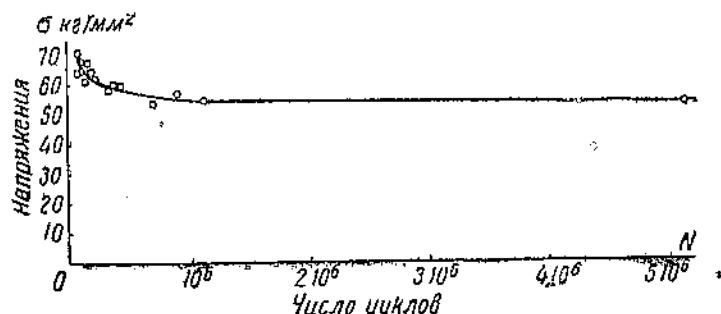


Рис. 18. Кривая усталости для прутков № 1 из стали 18ХНВА.

Проверка условий для стали 18ХНВА ограничивалась только сравнением степеней повреждения. Опыты производились на двух партиях образцов, изготовленных из двух разных прутков одной и той же плавки, но имеющих несколько отличающиеся друг от друга усталостные кривые (рис. 18

и 19). На образцах первой партии производилась проверка условий эквивалентности путем сравнения величин повреждения по Мюллеру.

На образцах второй партии сравнивались между собою нижние ветви усталостных кривых, полученных в результате испытаний двух серий образцов, одна из которых повреждена многоступенчатой перегрузкой, а другая — эквивалентным напряже-

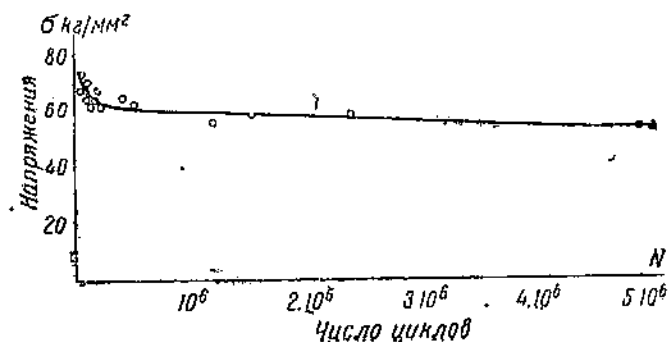


Рис. 19. Кривые усталости для прутков № 2 из стали 18ХНВА.

нием с постоянной амплитудой. В качестве многоступенчатой нагрузки для первой партии была взята трехступенчатая периодическая нагрузка; данные, ее характеризующие, помещены в табл. 5.

Таблица 5

Степень	Напряжение σ_i кг/мм²	Число циклов напряжений на i -й ступени N_i	Число циклов по усталостной кривой n_i	$\frac{N_i}{n_i}$
I	70	500	$60 \cdot 10^3$	0,00833
II	64,5	900	$109 \cdot 10^3$	0,00825
III	59	2800	$342 \cdot 10^3$	0,00820

Число периодов, необходимое для разрушения образца при таком режиме нагружения, рассчитанное по формуле (Д), равно:

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}} = 39,6.$$

Повреждение осуществлялось действием такой нагрузки при $\lambda' = 16$ периодов. Величина с постоянной амплитудой эквивалентных перенапряжений, вычисленная по формуле (А), оказалась равной:

$$\sigma_s = 64,5 \text{ кг/мм}^2.$$

Соответствующее число циклов по кривой усталости $n_s = 109\,000$, а число циклов этого напряжения, определенное по формуле (К), равно $N' = 44\,000$.

В качестве контрольного напряжения было взято напряжение $\sigma_k = 59 \text{ кг/мм}^2$. Средние результаты из испытаний семи образцов дали следующие величины повреждения: при повреждении многоступенчатой перегрузкой $S_1 = 82,7\%$; при повреждении эквивалентной перегрузкой с постоянной амплитудой $S_2 = 84,0\%$. В данном случае получена вполне

удовлетворительная степень совпадения величин повреждения, вызванных эквивалентными режимами.

Для проверки условий эквивалентности путем сравнения усталостных кривых в качестве многоступенчатой нагрузки была принята четырехступенчатая нагрузка. Данные, которые ее характеризуют, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Степень	Напряжения σ_i кг/мм²	Число циклов напряжений на i -й ступени N_i	Число циклов по усталостной кривой n_i	$\frac{N_i}{n_i}$
I	73,0	500	$51 \cdot 10^3$	0,0092
II	67,4	900	$85 \cdot 10^3$	0,0105
III	64,5	900	$155 \cdot 10^3$	0,0052
IV	62,0	1500	$300 \cdot 10^3$	0,0050

Число периодов, необходимое для разрушения образца при таком режиме, рассчитанное по формуле (Д), равно $\lambda = 32,7$. Для повреждения взято $\lambda' = 15$. Эквивалентное напряжение, рассчитанное по формуле (А), равно $\sigma_s = 67,4$, а число его периодов, эквивалентное 15 периодам, получилось равным $N = 39\,000$. При испытании образцов многоступенчатой нагрузкой на напряжениях, близких к пределу усталости, получалось столь большое рассеяние точек, что судить по ним об эквивалентности оказалось затруднительным.

ВЛИЯНИЕ „ОТДЫХА“ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПОВТОРНЫМ ПЕРЕГРУЗКАМ

Изучением вопроса о роли пауз на процессы утомления металлов при действии переменных напряжений занимался ряд исследователей.

Болекратом и Корнелиусом [5] испытания производились растяжением-сжатием при асимметричном цикле нагружения (коэффициент амплитуды положительный). На образцах диаметром 10—12,5 мм нагружение прерывалось на 6—8 час. после каждых 10% числа циклов, необходимых для разрушения при непрерывной нагрузке (в дальнейшем это число циклов обозначено через N). Результаты испытаний всех указанных выше материалов, за исключением мягкой стали, указывают на отсутствие влияния «отдыха» на усталостную кривую.

В качестве примера на рис. 20 приведены результаты испытаний хромоникелевой стали. Все точки, полученные при испытании с «отдыхом», разместились между двумя усталостными кривыми, ограничивающими область рассеяния, полученную при непрерывном испытании образцов. Образцы же из мягкой углеродистой стали, испытанные с «отдыхом», выдерживали в 10 раз больше циклов изменения напряжений, чем при непрерывном нагружении, и не разрушались (рис. 21).

В этом случае число выдержанных циклов нагружения достигало нескольких миллионов, поэтому здесь же может быть повышение первоначального предела усталости. Однако эти опыты не являются достаточно убедительными, так как благодаря сильной пластичности материала в образцах

получалось большое остаточное удлинение и образование шейки.

Дауэс, Герольд и Шульц [6] производили исследование влияния отдыха металла (образцы из

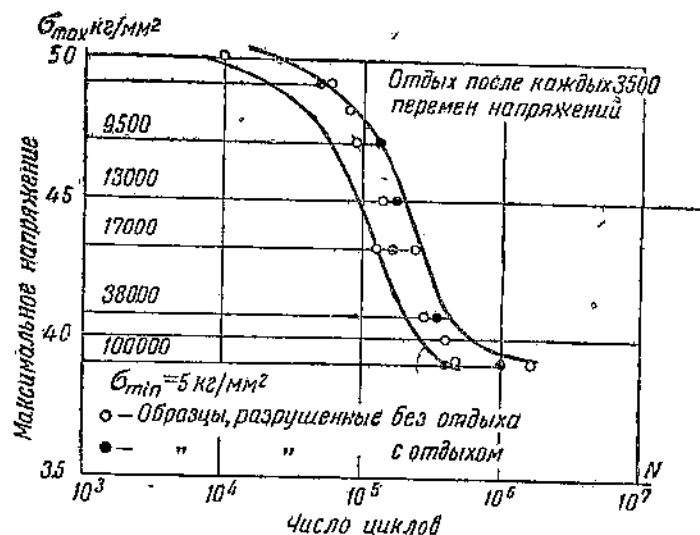


Рис. 20. Влияние пауз при действии переменных напряжений для хромоникелевой стали (по Боленрату и Корнелиусу).

углеродистой стали) на число циклов, необходимых для его разрушения при чистом изгибе с вращением. Испытанию подвергалась потенцированная

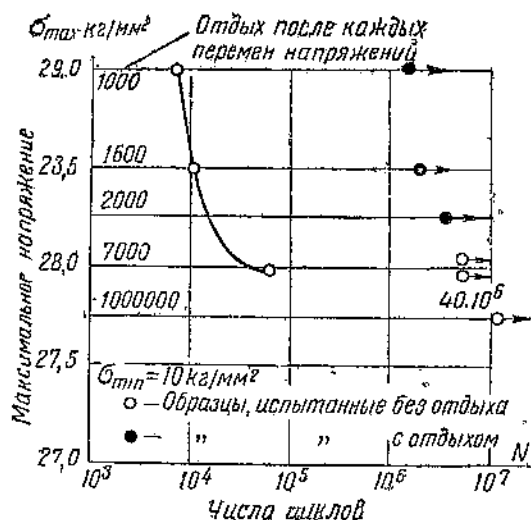


Рис. 21. Влияние пауз при действии переменных напряжений для углеродистой стали (по Боленрату и Корнелиусу).

холоднотянутая проволока из углеродистой стали с 0,7—0,8% С, механические характеристики и результаты испытаний которой помещены в табл. 7.

Таблица 7

Характеристика стали		Число циклов до разрушения при $\sigma = 55 \text{ кг/мм}^2$					
		без «отдыха»		продолжительность «отдыха» 1/2 суток		продолжительность отдыха 3 суток	
		после 1/5 N	после 1/10 N	после 1/5 N	после 1/10 N	после 1/5 N	после 1/10 N
содержание углерода %	временное сопротивление, кг/мм²	предел усталости при изгибе, кг/мм²					
0,7	152	32	65 000	73 000	96 000	82 000	100 000
0,8	156	36	56 000	—	78 000	95 000	84 000
0,8	156	26	65 000	—	92 000	80 000	91 000

Испытанию подвергались также проволоки из сталей с содержанием углерода 0,06% С и 0,42% С в отожженном состоянии, механические характеристики и результаты испытаний которых приведены в табл. 8 и 9. «Отдых» для стали с содержанием 0,7—0,8% С производился только при комнатной температуре, для стали с 0,42% С — при комнатной и повышенной температурах (нагрев до 140° С в масле), а для стали с 0,06% С — только при повышенной температуре.

Таблица 8

Содержание углерода %	Временное сопротивление кг/мм²	Предел усталости при изгибе кг/мм²	Напряжение при опытах с «отдыхом» кг/мм²
0,06	37,4	± 23	± 30
0,42	66,6	± 32	± 39

Таблица 9

Содержание углерода %	Условие «отдыха»		«Отдых» после переменных нагрузок по отношению к общему числу циклов	Увеличение числа циклов до разрушения, %
	продолжительность	температура ° С.		
0,42	3 дня	20	1/12	7
	1 мин.	140	1/12	21
	5 "	140	1/12	37
0,06	3 дня	140	1/12	206
	5 мин.	140	1/8	57
	5 "	140	1/6	90
	5 "	140	1/24	227

Результаты этих испытаний указывают, что для углеродистых сталей «отдых» повышает продолжительность службы материала при нагружении его переменными напряжениями. Это повышение продолжительности службы увеличивается с повышением температуры, при которой происходит отдых, а также с уменьшением числа циклов между перерывами для отдыха и с увеличением продолжительности отдыха.

Автором были произведены некоторые опыты по изучению влияния отдыха на число циклов напряжений N, необходимых для разрушения образца. Опыты производились на образцах прямоугольного сечения (2×22 мм), изготовленных из листовой стали марки Ст. 10 при симметричном цикле переменного изгиба на машине типа DVL.

Эти опыты привели к следующим результатам. Восьмичасовой «отдых» при комнатной температуре после каждых 1/10 N перемен напряжения ± 28 кг/мм² увеличивал N на 15%. Даже столь сильный отдых, как отдых при t=100° в воздухе в течение 8 час. после каждого нагружения 1/20 N перемен напряжения ± 34 кг/мм², дал повышение N всего на 20%.

Возможно, что если бы эти опыты проводились при постоянном напряжении, а не при постоянной деформации, то влияние «отдыха» сказалось бы сильнее, так как в этом случае вследствие восстановления упругих свойств за время «отдыха» об-

разцы, испытываемые с «отдыхом», нагружаются большими нагрузками, чем образцы, испытанные без «отдыха». Возможно также, что среда, в которой производилась выдержка при повышенных температурах, тоже оказывает существенное влияние на N .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При одно- и многоступенчатом изменении величины амплитуды переменных напряжений и малой смене периодов таких изменений повреждение перегрузками заметно зависит от последовательности действия напряжений различной величины. По мере увеличения числа периодов эта зависимость ослабевает, и для нескольких десятков периодов можно считать, что повреждение перегрузками не зависит от кривой изменения амплитуды напряжений во времени.

2. Для большого числа периодов изменения амплитуды переменных напряжений можно принять степень повреждения пропорциональной числу циклов перегрузочных напряжений на каждой ступени. Число периодов λ , необходимое для доведения материала до разрушения, может определяться из зависимости

$$\lambda \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i} = 1,$$

где N_i — общее число циклов при определенной амплитуде напряжений;

n_i — число циклов при той же амплитуде напряжений по усталостной кривой;

m — число ступеней изменения амплитуды.

3. Величина напряжения с постоянной амплитудой σ_s , действие которого эквивалентно влиянию напряжений с многоступенчатым изменением амплитуды, может определяться из выражения

$$\sigma_s = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i \cdot \frac{N_i}{n_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{n_i}}.$$

4. Испытания на усталость образцов гладких и с концентрацией напряжений из мягкой углеродистой стали и из стали высоколегированной 18ХНВА подтвердили изложенные условия эквивалентности перегрузочных режимов различных типов между собой.

5. Для легированных сталей паузы в действии переменных напряжений не сказываются заметно на числе циклов, необходимых для разрушения материала, и явление «отдыха» не проявляется. Для мягких углеродистых сталей «отдых» увеличивает число циклов до разрушения на 20% при опытах с постоянной амплитудой деформации. Нагрев во время пауз способствует увеличению числа циклов.

6. Установленные условия эквивалентности позволяют заменить испытания с многоступенчатым изменением амплитуды испытаниями с постоянной амплитудой, а также могут иметь значение для расчета прочности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. French H. J., Fatigue and hardening of Steels, Trans. Amer. Soc. Steel Treating, 1933, vol. 21, № 10, p. 899—946.

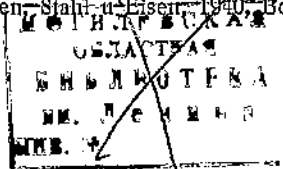
2. Kommers J. B., Overstressing and understressing in fatigue, Engineering, 1937, vol. 143, № 3724, p. 620—22, 676—78.

3. Müller—Stock H., Gerold E. und Schulz E. H., Der Einfluss einer Wechselvorbeanspruchung auf Biegezeit und Biegewechsel festigkeit von Stähle, Arch. Eisenhüttenwesen. 1938, Bd. 12, № 3, S. 141—8.

4. Гаф Г. Дж., Усталость металлов. Пер. с англ. М.-Л., ОНТИ, 1935, 304 стр. с илл.

5. Bollenrath F. u. Cornelius H. Der Einfluss von Betriebspausen auf die Zeit und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, VDI, 1940, vol. 84, № 18, S. 295—9.

6. Daeves K., Gerold E. u. Schulz E. H., Beeinflussung der Lebensdauer wechselbeanspruchter Teile durch Ruhepausen, Stahl u. Eisen, 1940, Bd. 60, № 5, S. 89—108.



СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	1
Повреждение материала при перенапряжениях	1
Определение амплитуды и числа циклов для эквивалентного режима с постоянной амплитудой	3
Экспериментальная проверка эквивалентности перегрузочных напряжений	6
Влияние „отдыха“ на сопротивляемость металлов повторным перегрузкам	10
Заключение	12
Литература	12

Редактор Г. А. Аристов

Г805947.
Печ. л. 1¹/₂.

Уч.-изд. л. 1,8.

Тип. зн. в печ. л. 40400.

Подп. к печати 3/XII 1945 г.
Цена 2 руб. Зак. 714/8219.

Типография Оборонгиза.