P27691
Ep. 48
Ep. 2

8.1

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
Серия А № 76 1956

Х. А. КУЛДМА
ДОЦЕНТ, КАНД. ТЕХН. НАУК

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1956

EP 6.7

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
Серия А № 76 1956

Х. А. КУЛДМА
ДОЦЕНТ, КАНД. ТЕХН. НАУК

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

P27691

ENSV Teaduste Akadeemia Raamatukogu

ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1956

ВВЕДЕНИЕ

В связи с дальнейшим непрерывным развитием машиностроения, вопросы усталостной прочности с учетом конструктивных, эксплуатационных и технологических факторов приобретают все большее и большее значение. При проектировании машин, работающих в условиях переменного нагружения, необходимо более точно оценивать кроме факторов, вызывающих разницу между действительными и номинальными напряжениями в детали, также те факторы, которые в данных конкретных условиях меняют основные для материалов показатели, полученные в лабораторных («стандартных») опытах. К настоящему времени не все такие факторы еще исследованы достаточно полно. Особенно мало данных о показателях усталостной прочности можно найти для области перенапряжений, хотя такие данные необходимы для расчетов деталей, долговечность которых сравнительно коротка и которые работают в т. н. области ограниченной долговечности. К таким деталям относятся и те, долговечность которых назначается короткой в целях достижения минимального веса и минимальных габаритов. Кроме того, расчет деталей на усталость по эквивалентным нагрузкам также основывается на данных, относящихся к области перегрузок.

Большинство опубликованных данных по усталостной прочности недостаточно полно отражает характер кривой усталости в области перенапряжений; в этих опытах при выявлении влияния разных факторов на сопротивление усталости (частота нагружения, чувствительность к концентрации напряжений, размеры деталей и т. п.) преследовалась главным образом цель получения значений для предела усталости, а не точное определение положения всей кривой, в том числе и положения наклонной, крутоспадающей части. Немногочисленные данные исследова-

ний в области перенапряжений не могут достоверно отразить характер крутоспадающей части кривой усталости.

Поэтому надо полагать, что изучение характера кривой усталости в области перенапряжений, выяснение факторов, определяющих положение кривых, а также уточнение методов расчета в области перенапряжений, являются вопросами актуальными и требующими своего решения. В рамках данной работы исследованы некоторые вопросы усталостной прочности сталей в условиях перенапряжений, что в некоторой степени может способствовать устранению затруднений, возникающих перед конструкторами машиностроителями при расчетах на усталостную прочность.

ГЛАВА I

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ В СВЯЗИ С ПРОЦЕССОМ УСТАЛОСТИ

Исследования усталостного процесса многими авторами ([1], [2], [3], [4], [5] и др.) дали возможность заключить, что течение процесса усталости определяется, в основном, двумя процессами — упрочнением и разупрочнением. Так же выяснилось, что наблюдаемые явления в образцах при циклическом и однократном нагружениях с качественной стороны сходны.

По данным экспериментальных исследований и по статистической теории усталостной прочности металлов Н. Н. Афанасьева можно заключить, что усталостные разрушения связаны с пластическими деформациями в отдельных зернах. Следовательно, усталостный процесс связан в первую очередь с теми факторами, которые влияют на сопротивление материала пластическим деформациям. Основными такими факторами являются скорость деформации и температура. Кроме того следует учесть, что различные напряженные состояния обуславливают различие и в сопротивлении пластическим деформациям.

В ходе пластического деформирования, как известно, происходят два процесса: упрочнение и отдых. Упрочнение возрастает при пластическом деформировании до некоторого предельного значения. Эффект отдыха, выражающийся в снижении сопротивления деформированию, зависит от времени и в большой мере также от температуры. Общий эффект процессов упрочнения и отдыха определяет действительную прочность. На величину упрочнения влияет существенным образом скорость деформирования, причем сопротивление пластическим деформациям возрастает с увеличением скорости деформирования. В металле, который представляет собою совокупность зерен, имеющих

различную ориентацию и, потому, в разных направлениях проявляющих различия в свойствах, происходит во время каждого цикла нагружения пластическое деформирование некоторого числа более слабых зерен. Поэтому можно предположить, что упрочнение и сопротивление пластическим деформациям, а следовательно, и возникновение усталостной трещины, зависит от скорости деформирования, т. е. и от частоты нагружения. Соответственно рассуждениям, сопротивление разрушению должно возрасти с увеличением частоты нагружения.

Получение конкретных количественных показателей и применение их в расчетах является трудной задачей. Одной из причин являются, конечно, большие методические трудности, возникающие при осуществлении различных скоростей деформирования, но еще более трудным является количественная оценка влияния процесса, сопровождающего упрочнение, — процесса отдыха.

Совместное действие упрочнения и отдыха рассмотрено в работах школы В. Д. Кузнецова и М. А. Большаниной [6], [7], [8].

Значительно больше, чем скорость деформирования оказывает влияние на механические свойства металлов второй фактор — температура. Хотя в данной работе изучается процесс усталости при комнатной температуре, но и здесь придется обратить большое внимание на влияние температуры. Большая часть работы деформирования обращается в тепло. Возникающее в единицу времени тепло, а, следовательно, и температура образца, тем больше, чем выше частота нагружения.

Ввиду того, что температура является существенным фактором, влияющим на интенсивность отдыха, следовательно и на общий результат взаимного действия упрочнения и отдыха, от которого зависит ход процесса усталости, можно прийти к выводу, что для лучшего понимания течения процесса усталости, очевидно, необходимо более конкретно изучить температурный режим в ходе переменного нагружения. Э. Кауфман [9], измерявший изменение температуры образца в ходе процесса усталости, нашел возможным выделить два интервала температур, при которых наблюдается резкое изменение в течении процесса — это интервалы синеломкости и рекристаллизации. По нашему мнению можно предположить, что изменение температуры существенно влияет на процессы,

предшествующие разрушению. Известное подтверждение такого мнения можно найти также в работе Л. А. Гликмана, В. А. Журавлева и Т. Н. Снежковой [10], где исследовалось изменение затухания при циклических напряжениях.

В соответствии с приведенными соображениями можно прийти к выводу, что частота нагружения является важным фактором, влияющим при данной величине нагрузки на все стадии течения процесса усталости.

До сих пор в методике усталостных испытаний, обычно, не обращалось особенного внимания на частоту нагружения, поэтому данных о влиянии частоты нагружения на усталостную прочность можно в литературе найти сравнительно мало; притом и эти данные часто противоречивы. Большинство работ, связанных с изучением влияния частоты, касается вопроса связи длительного предела усталости с частотой нагружения. Авторы ряда работ ограничиваются предположением, что частота до 6000 цикл/мин не влияет на усталостную прочность, расширяя тем самым данные, справедливые для напряжений, соответствующих пределу усталости. Однако для области перенапряжений подобное предположение не представляется обоснованным.

Из работ, посвященных вопросу влияния частоты на усталостную прочность, представляют наибольший интерес работы Г. В. Карпенко ([11], [12], [13] и др.) и работа В. А. Быкова [14], где влияние частоты рассматривается и для области перенапряжений. Но работы Г. В. Карпенко и его сотрудников связаны с изучением влияния поверхностно-активных и корродирующих сред; работа В. А. Быкова проведена над образцами, подвергнутыми плоскому изгибу, при частотах 16 и 500 цикл/мин. Полученные данные между собой не согласуются.

Так как при анализе аварийных случаев главным образом исходят из внешней картины усталостного излома, то ясно, что изучение влияния частоты перемен напряжений на усталостный излом представляет большой интерес для целей установления причин аварий. Однако данных о характере усталостных изломов в зависимости от частоты перемен напряжений в специальной литературе обнаружить не удалось.

В связи с вышесказанным можно прийти к следующим заключениям:

1. Количество стальных деталей, срок службы которых выбирается сравнительно коротким (меньшим той базы, которая принята при определении предела усталости) или которые рассчитываются по т. н. эквивалентным нагрузкам достаточно велико. Для расчета таких деталей необходимо пользоваться возможно более точными данными об усталостной прочности в подобных условиях работы.

2. До настоящего времени на область высших напряжений распространялись закономерности и данные, справедливые для длительного предела усталости (влияние частоты, влияние концентратора, данные об эффективном коэффициенте концентрации напряжений и о коэффициенте чувствительности и т. п.).

3. Частота переменного нагружения теснейшим образом связана со скоростью деформирования и температурой образца. Последняя в условиях испытаний при комнатной температуре зависит от свойств марки стали, формы и размеров образца и вида нагружения.

4. Данных о влиянии частоты на усталостную прочность сравнительно мало, особенно для условий работы в области перенапряжений.

ГЛАВА II

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Все усталостные испытания проводились на машинах НУ, серийно изготовляемых на Московском экспериментальном заводе испытательных машин и весов.

Для достижения различных частот перемен напряжений одна машина была переконструирована для получения чисел оборотов 340, 640 и 960 об/мин.

Усталостная прочность исследовалась при испытании образцов из следующих марок стали: 30, 45, 30Х и 45Х, причем две первые в нормализованном, а последние в улучшенном состоянии.

Испытаниям подвергались образцы как гладкие, так и с концентратором.

Форма гладких образцов соответствовала ГОСТу 2860—45, при диаметре образца в 7,52 мм. Поверхность образцов соответствовала 9 классу чистоты.

Концентратором являлся круговой надрез треугольного профиля. Угол профиля 60°, радиус закругления дна концентратора 0,1 мм, глубина концентратора 0,4 мм. Наименьший диаметр образца в месте концентратора был равен диаметру гладкого образца. Нарезание концентратора производилось на резьбошлифовальном станке.

Размеры образцов проверялись под инструментальным микроскопом.

Изменение температуры в образцах изучалось в зависимости от степени перегрузки и от частоты нагружения.

Для определения температуры образца была использована термопара константан — медь открытого типа. Проволоки (константан — диаметром 0,15 мм, медь — 0,30 мм) были сварены, в результате чего получился на месте сварки шарик диаметром примерно 0,6—0,8 мм. Такая термопара опиралась при измерении температуры на образец под действием собственного веса (вместе с держателем — 40 г) и скользила по вращающемуся образцу. Устройство позволяло производить измерения температур по всей длине образца.

Погрешности в измерении температур, вызванные теплотой трения термопары об образец и охлаждением спая вследствие случайного нарушения скользящего контакта, не превышали $\pm 3°$ С. Так как полученные данные были использованы только для сравнения температур в различных условиях работы, то такая точность оказалась для наших целей достаточной.

В различных условиях было испытано 20 серий образцов, из них 8 серий с концентраторами. Всего было испытано около 400 образцов. К образцам были приложены нагрузки, вызывающие достаточно широкий диапазон напряжений. Номинальные использованные напряжения достигли значений, приведенных в табл. 1.

Экспериментальные данные обрабатывались по методу А. К. Митропольского [15], [16].

Предел усталости определялся, как правило, на базе $10 \cdot 10^6$ циклов, а при низших частотах на базе $5 \cdot 10^6$ циклов.

Таблица 1

	Образцы	
	гладкие	с концентраторами
Сталь 30	$1{,}41\sigma_{-1}$	$2{,}86\sigma^{k}_{-1}$
Сталь 45	$1{,}36\sigma_{-1}$	$3{,}22\sigma^{k}_{-1}$
Сталь 30Х	$1{,}50\sigma_{-1}$	$3{,}62\sigma^{k}_{-1}$
Сталь 45Х	$1{,}29\sigma_{-1}$	$6{,}45\sigma^{k}_{-1}$

σ_{-1} — предел усталости для гладких образцов,
σ^{k}_{-1} — „ „ „ образцов с концентраторами.

ГЛАВА III

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ КРАТКИЙ АНАЛИЗ

1. Усталостная прочность и частота нагружения

Пределы усталости испытанных сталей (в кг/мм^2) приведены в табл. 2. (Пределы усталости равны для всех использованных частот.)

Таблица 2

Марка стали / Образцы	30	45	30Х	45Х
Гладкие	26,4	30,0	42,0	51,0
С концентраторами	16,8	15,6	17,4	18,6

На основе обработки экспериментальных данных каждой серии, получены корреляционные уравнения для кривых усталости, которые приведены в табл. 3. При этом исходили из прямолинейной зависимости между $lg\ \sigma$ (расчетное напряжение) и $lg\ N$ (число циклов до разрушения), т. е. приняв за основу формулу кривой усталости в виде $\sigma^m N = \text{const}$ (m — показатель степени, характеризующий наклон левой части кривой усталости).

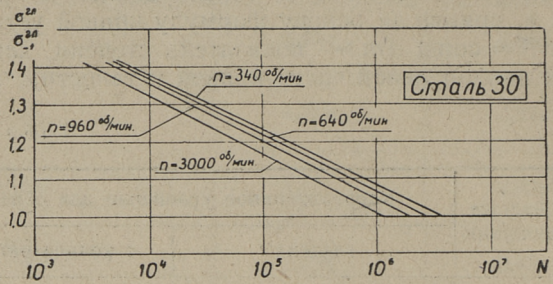
Таблица 3

Марка стали	Частота цикл/мин	Корреляционное уравнение для образцов	
		гладких	с концентраторами
30	3000	$X_y = -0{,}235\ Y_i + 12{,}234$	$X_y = -0{,}098\ Y_i + 7{,}839$
	960	$X_y = -0{,}241\ Y_i + 12{,}675$	—
	640	$X_y = -0{,}249\ Y_i + 13{,}006$	$X_y = -0{,}068\ Y_i + 6{,}571$
	340	$X_y = -0{,}258\ Y_i + 13{,}386$	—
45	3000	$X_y = -0{,}169\ Y_i + 10{,}576$	$X_y = -0{,}094\ Y_i + 7{,}690$
	960	$X_y = -0{,}173\ Y_i + 11{,}007$	—
	640	$X_y = -0{,}189\ Y_i + 11{,}699$	—
	340	$X_y = -0{,}194\ Y_i + 11{,}999$	$X_y = -0{,}080\ Y_i + 7{,}154$
30Х	3000	$X_y = -0{,}107\ Y_i + 10{,}471$	$X_y = -0{,}055\ Y_i + 7{,}260$
	340	$X_y = -0{,}075\ Y_i + 8{,}998$	$X_y = -0{,}039\ Y_i + 6{,}227$
45Х	3000	$X_y = -0{,}084\ Y_i + 10{,}110$	$X_y = -0{,}050\ Y_i + 6{,}965$
	340	$X_y = -0{,}055\ Y_i + 8{,}406$	$X_y = -0{,}029\ Y_i + 5{,}871$

Здесь Y_i — напряжение в образце,
X_y — среднее вероятное значение логарифма числа циклов до разрушения N.

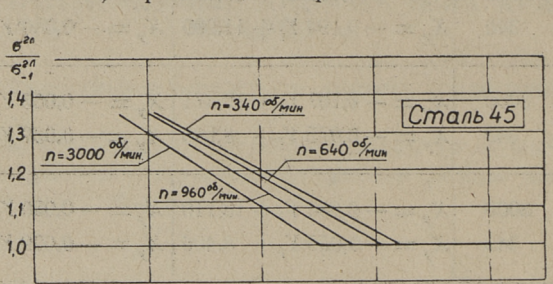
На фиг. 1 и 2 представлены кривые усталости для гладких образцов из нормализованных углеродистых сталей 30 и 45 при различных частотах перемен напряже-

ний. Сдвиг кривых при понижении частоты вправо показывает ясно, что при данных условиях опыта понижение частоты вызывает, как правило, увеличение усталостной прочности.



Фиг. 1. Кривые усталости при различных частотах. ($\sigma^{2л}$ — напряжение в гладком образце; $\sigma^{2л}_{-1}$ — предел усталости для гладких образцов).

Кривые усталости, полученные для улучшенных легированных сталей 30Х и 45Х, дают совсем иную картину (см. фиг. 5 и 6 — сплошные кривые). Здесь (при частотах 3000 и 340 цикл/мин) происходит пересечение наклонных ча-



Фиг. 2. Кривые усталости при различных частотах (обозначения см. фиг. 1).

стей кривых при сравнительно низких перенапряжениях (для стали 30Х — при напряжении 1,12 σ_{-1}, для стали 45Х — при напряжении 1,15 σ_{-1}). При дальнейшем увеличении перенапряжений увеличивается и различие в

сопротивлении усталостному разрушению; при меньшей частоте долговечность образцов увеличивается.

Кривые усталости для образцов гладких и с круговым надрезом при различных частотах нагружения представлены на фиг. 3—6. Здесь во всех исследованных случаях (за исключением стали 30Х) для образцов с концентраторами также происходит пересечение наклонных ветвей, но уже при значительно высших перенапряжениях.

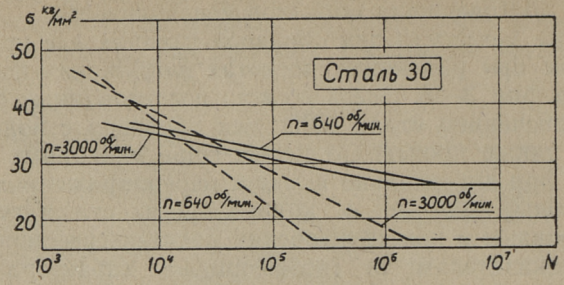
Подобные данные о кривых усталости могут быть использованы в конструкторских расчетах в основном по двум показателям: m (коэффициент, характеризующий наклон левой части кривой усталости) и N_0 (число циклов, соответствующее точке излома кривой усталости). N_0 находится в пределах 0,2—4,0 миллиона циклов. Здесь меньшие значения подходят для образцов с концентраторами при низших частотах, а высшие значения — для гладких образцов также при низших частотах. Полученные значения m представлены в таблице 4.

Таблица 4

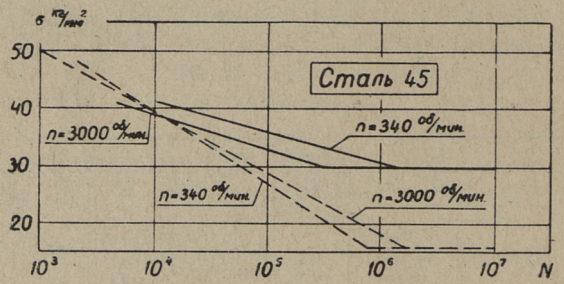
Марка стали	Частота перемен напряжений цикл/мин						
	3000		960	640		340	
	гладкие	с концентраторами	гладкие	гладкие	с концентраторами	гладкие	с концентраторами
30	17,4	7,0	19,0	18,2	6,4	19,4	—
45	14,0	7,4	13,6	13,5	—	17,5	6,4
30Х	13,5	4,6	—	—	—	8,7	3,5
45Х	12,1	4,4	—	—	—	7,9	3,3

По приведенным данным видно, что при понижении частоты перемен напряжений угол наклона левой части кривой усталости для гладких образцов из углеродистых сталей уменьшается, для всех других случаев, исследованных нами, угол наклона увеличивается.

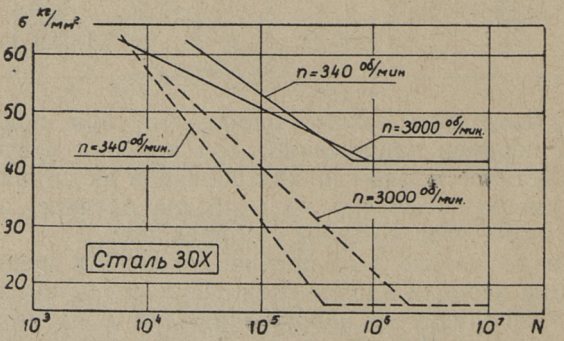
Изменение усталостной прочности сталей в зависимости от частоты перемен напряжений оценивалось как по изменению разрушающего напряжения, так и по изменению долговечности. Последний метод оправдывает себя больше, так как в расчетах придется исходить из проект-



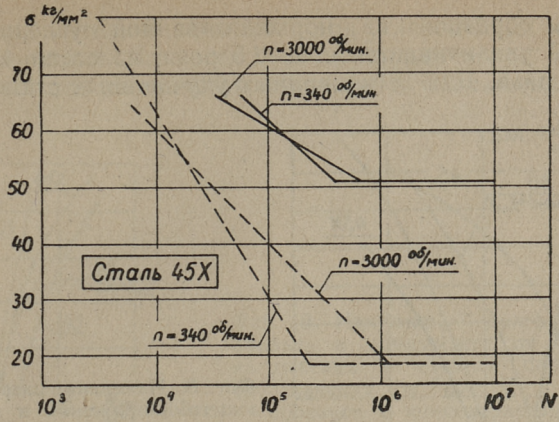
Фиг. 3. Кривые усталости при различных частотах (сплошные линии — для гладких образцов; пунктирные линии — для образцов с концентраторами).



Фиг. 4. Кривые усталости при различных частотах (обозначения см. фиг. 3).

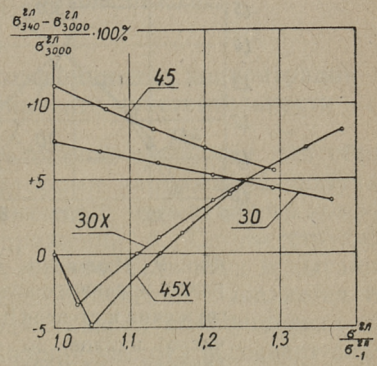


Фиг. 5. Кривые усталости при различных частотах (обозначения см. фиг. 3).



Фиг. 6. Кривые усталости при различных частотах (обозначения см. фиг. 3).

ной долговечности. Изменение усталостной прочности представлено на фигурах 7—10. Особое внимание заслуживает понижение разрушающего напряжения для образцов с концентраторами, где для легированных сталей при

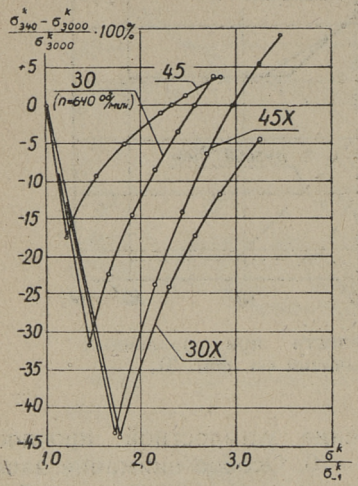


Фиг. 7. Изменение разрушающего напряжения в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки ($\sigma^{2л}_{340}$ — разрушающее напряжение для гладкого образца при частоте 340 цикл/мин; $\sigma^{2л}_{3000}$ — то же при частоте 3000 цикл/мин).

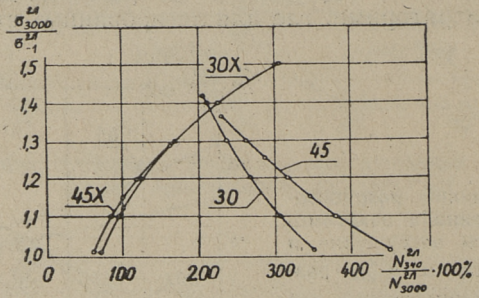
переходе от частоты перемен напряжений 3000 цикл/мин на частоту 340 цикл/мин понижение доходит до 45%.

Данные об изменении долговечности при заданном напряжении в зависимости от частоты показывают, что в области более низких перенапряжений (до 1,1 σ_{-1}) долго-

вечность образцов из нормализованной углеродистой стали 30 увеличивается в 3—3,5 раза, из стали 45 — в 3,8—4,5 раза. Для легированных улучшенных сталей уве-



Фиг. 8. Изменение разрушающего напряжения в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки (обозначения см. фиг. 7; к — для образцов с концентраторами).

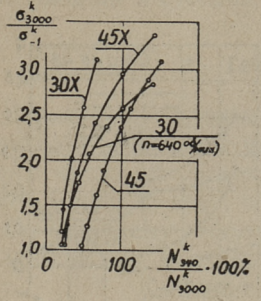


Фиг. 9. Изменение долговечности образца в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки ($N^{гл}_{340}$ — число циклов до разрушения для гладких образцов при частоте 340 цикл/мин; $N^{гл}_{3000}$ — то же, при частоте 3000 цикл/мин; остальные обозначения см. фиг. 7).

личение долговечности происходит при низших частотах вместе с ростом перенапряжений.

Изменение долговечности для образцов с концентрато-

рами сравнительно одинаково для углеродистых и легированных сталей. Для всех исследованных марок при низших частотах выявляется тенденция к уменьшению долго-



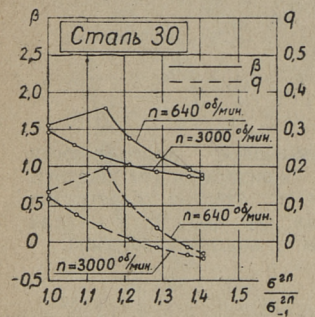
Фиг. 10. Изменение долговечности образца в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки (обозначения см. фиг. 9; $к$ — для образцов с концентраторами).

вечности, причем тем больше, чем ближе к пределу усталости величина перенапряжения. Только при напряжениях, которые превышают предел усталости для образцов с концентраторами σ_{-1}^{k} примерно в 2,5—3 раза, долговечности для различных частот выравниваются. При дальнейшем повышении напряжений для низших частот наблюдается уже увеличение долговечности.

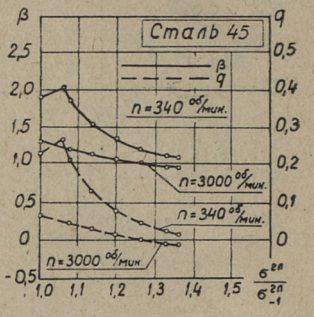
2. Об эффективном коэффициенте концентрации напряжений и коэффициенте чувствительности

Сравнив данные об усталостной прочности для образцов гладких и с концентраторами напряжений, получаем возможность проследить изменение эффективного коэффициента концентрации напряжений β. Соответствующие кривые приведены на фиг. 11—14. Для всех испытанных сталей при увеличении перенапряжений выявляется тенденция к уменьшению эффективного коэффициента концентрации напряжений. Низшая частота вызывает значительное увеличение величины β, которое при величине перенапряжения 1,1 σ_{-1} составляет примерно: для стали 30 — 45%, для стали 45 — 45%, для стали 30Х — 75%, для стали 45Х — 65%. При более высоких перенапряжениях для сталей 30, 45, 45Х оказалось, что величина β стала меньше единицы, т. е. образцам с концентраторами свойственна большая прочность, чем гладким. В связи с этим

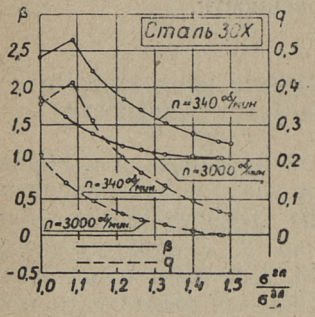
и диапазон возможных значений коэффициента чувствительности к концентрации q оказывается значительно расширенным: q имеет для названных сталей и отрицательные значения. (Коэффициент концентрации α определен по Нейберу.)



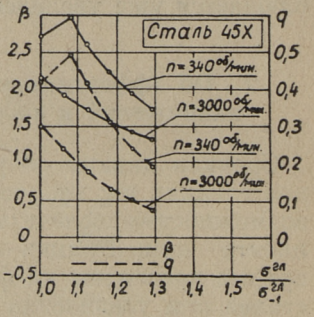
Фиг. 11. Изменение β и q в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки.



Фиг. 12. Изменение β и q в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки.



Фиг. 13. Изменение β и q в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки.



Фиг. 14. Изменение β и q в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки.

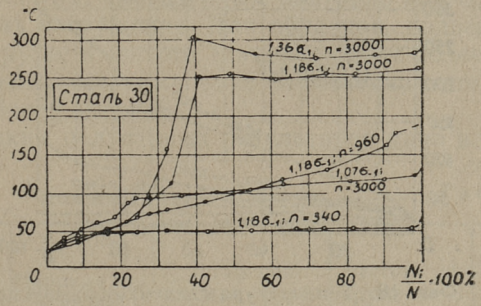
Такое широкое изменение коэффициента чувствительности не дает возможности пользоваться величиной q для вычисления эффективного коэффициента концентрации напряжений в области перенапряжений.

Можно утверждать, что q для данного материала и термообработки зависит, кроме формы и размеров концентратора, градиента напряжений, асимметрии цикла (см. например [17], [18], [19]) в значительной мере и от частоты нагружения и степени перегрузки.

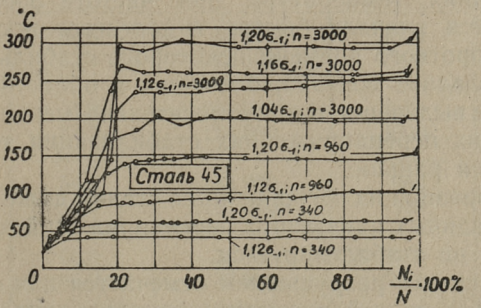
3. Температура образцов

Характерные кривые изменения температуры в середине образцов приведены на фиг. 15—18. По оси абсцисс отложены числа циклов до разрушения образцов, считая за 100% число циклов, соответствующее поломке образца.

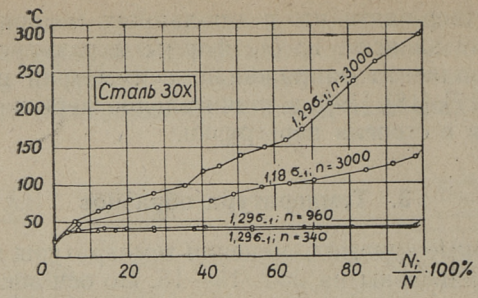
По внешнему виду кривые изменения температуры для углеродистых и легированных сталей различны. Для об-



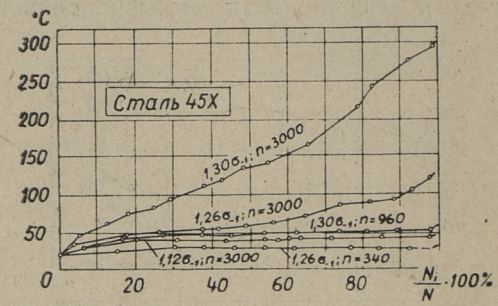
Фиг. 15. Температура гладких образцов при разных степенях перегрузки и частотах нагружения.



Фиг. 16. Температура гладких образцов при разных степенях перегрузки и частотах нагружения.



Фиг. 17. Температура гладких образцов при разных степенях перегрузки и частотах нагружения.



Фиг. 18. Температура гладких образцов при разных степенях перегрузки и частотах нагружения.

разцов из углеродистых сталей при более высоких перенапряжениях температура при частоте 3000 цикл/мин повышается вначале быстро и достигает после сравнительно короткого времени некоторого стабильного значения. Последнее связано, очевидно, с областью синеломкости, где выделение тепла относительно меньшее. При более низких перенапряжениях стабилизация температуры получается раньше.

Для образцов из легированных сталей даже в условиях использованных наивысших перенапряжений температура образцов не стабилизируется.

Перед самым разрушением отмечается для обеих групп испытанных сталей повышение температуры образца.

Максимальная температура имеет место в середине образца. Режим изменения температуры в любых местах по

длине образца аналогичен изменению температуры по середине, но характерные изломы кривых температуры происходят с опозданием примерно на 5% от всей долговечности образца по сравнению с кривыми для середины образца.

4. О возможности изучения процесса усталости

Из полученных опытных данных по измерению температуры образцов можно сделать вывод, что изменения температуры при различных перенапряжениях и при различных частотах по своей величине значительны и могут заметно влиять на течение процесса усталости. Большое влияние температуры на течение усталостного процесса видно по опытам, проведенным повторно при одних и тех же условиях нагружения. Для образцов, подвергавшихся той же нагрузке и частоте, но показавших более короткий срок службы, максимальная отмеченная температура являлась более высокой.

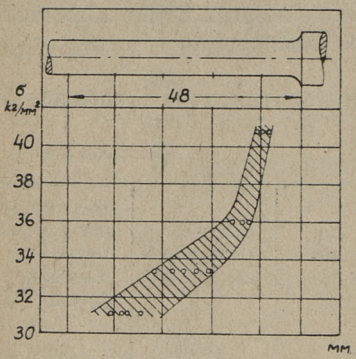
Часть таких полученных результатов дана в таблице 5.

Таблица 5

Марка стали	Напряжение в кг/мм²	Число циклов до разрушения	Частота нагружения в цикл/мин	Максимальная температура в середине образца °С
30	31,2 31,2	48 600 62 400	3000 3000	257 208
45	33,6 33,6	54 300 42 500	3000 3000	254 314
45	31,2 31,2	282 000 154 500	3000 3000	207 254
30Х	54,0 54,0	74 000 67 500	960 960	42 84
45Х	66,0 66,0	30 900 36 800	3000 3000	274 259
45Х	57,0 57,0	144 000 208 000	3000 3000	58 47

Полученные данные дали возможность заключить, что температура образцов теснейшим образом связана с течением процесса усталости, и может просто и наглядно в известной степени отражать те процессы, которые происходят в образце во время испытания.

Различие в температурах по длине образца открывает некоторые интересные возможности для изучения процесса усталости в условиях данного исследования. Было установлено, например, что начиная с некоторого значения перенапряжения, усталостное разрушение гладких образцов происходило в определенной области по длине образца, в зависимости от величины напряжения. Для стали 45 такие данные представлены на фиг. 19 (частота нагружения 3000 цикл/мин), где по оси абсцисс отложены расстояния места разрушения от середины образца.



Фиг. 19. Место поломки образца в зависимости от перенапряжения (предел усталости — 30 кг/мм²).

Это место усталостного разрушения определялось для углеродистых сталей полем температур от 220 до 230° С, для легированных сталей — от 260 до 290° С. Так как в этом интервале температур (интервал синеломкости) усталостная прочность вообще должна была повышаться, то можно заключить, что до момента стабилизации температуры процесс усталости был развит уже до такой фазы, при которой происходит разупрочнение и где ход процесса заключается в дальнейшем развитии микротрещин. Одновременно с уменьшением пластичности в области синеломкости повышается чувствительность стали к концентрации напряжений. Это обстоятельство создает более благоприятные условия для развития микротрещин.

Для проверки данного предположения производились дополнительные эксперименты в 3-х направлениях. Первый способ состоял в том, что после стабилизации температуры по длине образца, нагружение продолжалось при той же частоте, но при напряжениях, равных пределу усталости. При втором способе нагружение после стабилизации продолжалось при том же напряжении, но при возможно низшей частоте. Оба эти способа дали возможность исключить дальнейшее влияние повышенной температуры. После разрушения образца определялось расстояние места излома от середины образца. Все изломы происходили в указанной выше области по длине образца. В тех случаях, когда нагружение на данном уровне перенапряжений прекращалось до момента стабилизации температуры, изломы вследствие дальнейшего нагружения при низшей частоте или при напряжении, равном пределу усталости, происходили в произвольном месте по длине образца.

Такие данные для стали 45 приведены в табл. 6.

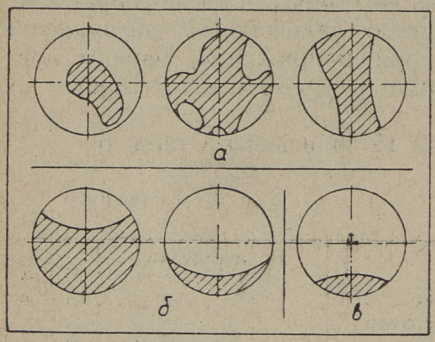
Таблица 6

I нагружение		Расстояние области температур 220—230°С от середины образца, в мм	II нагружение			Расстояние места излома от середины образца в мм
$n = 3000$ об/мин						
σ кг/мм²	Число циклов N_I		σ кг/мм²	Частота n цикл/мин	Число циклов N_{II} до разрушения	
31,2	16400	35—38 (стабильное)	31,2	340	40700	36
31,2	18000	33—36 (стабильное)	31,2	340	44300	35
31,2	14100	35—38 (стабильное)	26,4	3000	181200	35
31,2	16500	34—37 (стабильное)	26,4	3000	197600	36
31,2	14000	28—31 (до стабилизации)	31,2	340	93700	34
31,2	18000	13—16 (до стабилизации)	31,2	340	102800	27
31,2	13700	15—19 (до стабилизации)	26,4	3000	157200	28

Все эти опыты подтвердили предположение о наличии вышеописанной фазы развития процесса усталости. В качестве третьего способа проверки этого предположения для конкретных условий нагружения определялись точки линий повреждения (по Френчу). С точками линий повреждения совпадала (по циклам нагружения) начальная область резкого повышения температуры.

5. Усталостные изломы

Полученные усталостные изломы были использованы для того, чтобы более конкретно, в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки, определить: 1) характер внешней картины излома, и 2) относительные величины зон, характерных для усталостных изломов.



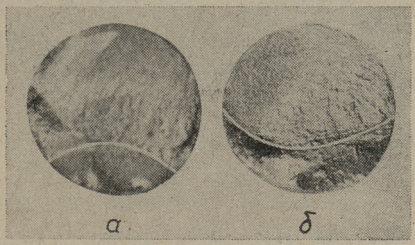
Фиг. 20. Виды изломов образцов (*а* — для высоких степеней перегрузки, *б* и *в* — для низших степеней перегрузки).

Визуальное изучение усталостных изломов гладких образцов дало возможность для всех использованных марок стали различить 3 характерных вида изломов. Схемы таких изломов представлены на фиг. 20.

Первый из них (фиг. 20, *а*) характеризуется своеобразной беспорядочной конфигурацией. Такие изломы получаются, как правило, в тех случаях, когда излом происходит в области синеломкости. Поверхность излома глубоко ступенчатая. На поверхности излома можно ясно определить несколько очагов усталости. Из-за повышенной чувствительности к концентрации напряжений скорость распространения трещин вглубь образца увеличивается. Это дает в некоторых случаях картину, напоминающую усталостный излом, который возникает в случае

более низких напряжений, но при наличии макроскопического концентратора напряжений. Ступенчатость возникает, вероятно, из-за объединения отдельных трещин, возникающих при больших перенапряжениях и развивающихся одновременно в различных сечениях.

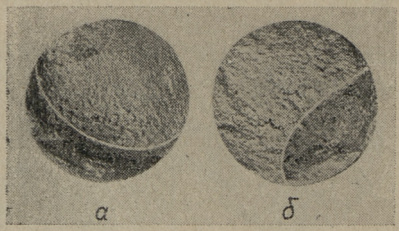
Второй и третий виды излома (фиг. 20, *б* и *в*) описаны в литературе уже раньше достаточно полно и принадлежат к более низким перегрузкам. В наших условиях представляют особенный интерес те случаи, когда образцы,



Фиг. 21. Изломы образцов из стали 30 (а — σ = 28,2 кг/мм², n = 640 об/мин; N = 1 119 900; б — σ = 28,2 кг/мм²; n = 640 об/мин; N = 603 300).

подвергнутые одному и тому же напряжению при одной и той же частоте, дали различные виды изломов, на которых линии фронта отличались противоположными направлениями кривизны. Анализ таких данных показал, что вид излома при тождественных условиях нагружения связан с числом циклов до разрушения. Сказанное иллюстрируется для углеродистых сталей фотоснимками на фиг. 21, *а* и *б* (сталь 30, σ = 28,2 кг/мм², n = 640 цикл/мин). Здесь на изломе образца, имеющего бóльшую долговечность (фиг. 21 *а*, N = 1 119 900), фронтовая линия является выпуклой (относительно очага усталости), а на изломе, полученном при меньшем числе циклов (фиг. 21, *б*, N = 603 300), фронтовая линия вогнутая. В последнем случае можно установить бóльшее число очагов усталости. Но бóльшее число очагов не может, по-видимому, существенно влиять на изменение формы фронтовой линии из-за малой чувствительности материала к концентрации напряжений.

Иначе обстоит дело с легированными сталями, испытанными нами. Здесь каждый новый очаг усталости является возбудителем сравнительно высокой концентрации напряжений. Поэтому каждая образовавшаяся трещина растет по окружности быстрее. Вышесказанное иллюстрируется снимками на фиг. 22, *а* и *б* (сталь 45Х, $\sigma = 57{,}0$ кг/мм^2). В первом случае (фиг. 22, *а*) образец

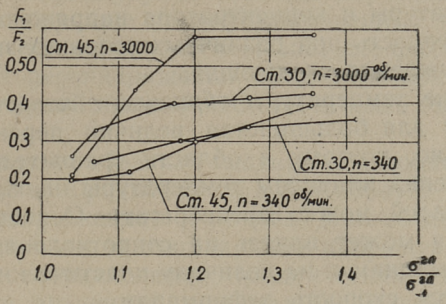


Фиг. 22. Изломы образцов из стали 45Х (а — $\sigma = 57{,}0$ кг/мм^2, $n = 3000$ об/мин; $N = 308\,500$; б — $\sigma = 57{,}0$ кг/мм^2, $n = 340$ об/мин, $N = 183\,900$).

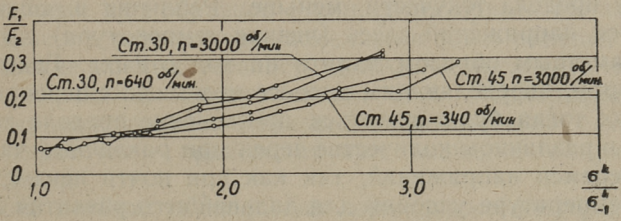
был нагружен при частоте 3000 цикл/мин. При изломе после числа циклов $N = 308\,500$ фронтовая линия оказалась вогнутой. Второй образец (фиг. 22, *б*) сломался после числа циклов $N = 183\,900$, а фронтовая линия получилась выпуклой. Число очагов усталости здесь больше, чем по фиг. 22, *а*.

По фотографиям усталостных изломов было исследовано изменение относительной величины зоны окончательного излома в зависимости от частоты перемен напряжений. Изменение отношения площади зоны окончательного излома ко всей площади поперечного сечения в зависимости от перенапряжений для сталей 30 и 45 представлено на фиг. 23 и 24. Кривые такого же характера получились и для образцов из легированных сталей, но они менее показательны. Особое внимание заслуживает то обстоятельство, что зоны окончательных изломов для всей области использованных высоких перенапряжений ясно выделились до числа циклов $N > 1500$. Площади зон окончательных изломов не превышали для гладких

образцов 70%, а для образцов с концентраторами напряжений — 50% от всей площади поперечного сечения. Эти данные расходятся с данными Д. Н. Видмана [20], [21], [22], которым отмечено, что в области напряжений, которая соответствует числам циклов $N<10^5$ («область



Фиг. 23. Изменение отношения $\frac{F_1}{F_2}$ в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки для гладких образцов (F_1 — площадь окончательного излома; F_2 — общая площадь поперечного сечения образца).



Фиг. 24. Изменение отношения $\frac{F_1}{F_2}$ в зависимости от частоты нагружения и степени перегрузки для образцов с концентраторами (обозначения см. фиг. 23).

циклической перегрузки»), в большинстве случаев невозможно найти двух различных по характеру зон излома.

Полученные данные по усталостным изломам указывают на то, что во всех случаях при равных напряжениях, но при разных частотах, большим срокам службы соответствуют меньшие зоны окончательных изломов.

6. Скорость деформации и температура — важные факторы для оценки усталостной прочности

Все главные экспериментальные данные, полученные в предлагаемой работе, находят удовлетворительное объяснение с точки зрения влияния скорости деформации, температуры и концентратора напряжений на усталостную прочность при различных условиях нагружения. Наши рассуждения следующие.

Повышение температуры *образцов с концентраторами напряжений* для большинства величин перенапряжений незначительно, поэтому в области сравнительно низких перенапряжений влиянием температуры на механические свойства сталей можно пренебрегать. Основной величиной, которая может влиять на сопротивление пластическим деформациям и на величину пластических деформаций, является скорость деформации.

Число зерен неблагоприятно ориентированных, в которых могут возникать пластические деформации в области низких перенапряжений, сравнительно мало. Для развития процесса усталости имеет существенное значение превышение предела текучести в этих зернах. При бо́льших скоростях деформации продолжительность одного цикла напряжения короче и поэтому возможности для превышения предела текучести меньше. Различия в частотах перемен напряжений здесь (низкая температура) не могут заметным образом влиять на ход отдыха. Главным фактором, определяющим процесс при низких перенапряжениях тогда будет являться превышение предела текучести в различном количестве зерен при различных частотах перемен напряжений, так как при почти неизменяемой температуре условия для дальнейшего развития процесса приблизительно равны.

При нагружении образцов с бо́лее высокими перенапряжениями число относительно слабых зерен, в которых предел текучести превышается уже в течение первых циклов, увеличивается. При низших перенапряжениях вероятность совместного расположения такого количества деформированных зерен, которое вызвало бы в ходе дальнейшего деформирования достаточно большое местное повреждение, бо́льшая при низшей частоте. При увеличении же напряжений различие указанных вероятностей для различных частот уменьшается.

При перенапряжениях еще больших придется учитывать и возникающую теплоту. С интенсификацией процесса отдыха, обусловленной повышением температуры, понижается и степень окончательного упрочнения. В образцах, подвергавшихся высшей частоте перемен напряжений, способность упрочняться поэтому меньшая. В зернах, до сих пор еще не деформированных пластически, предел текучести понижается. Названные факторы в области высоких перенапряжений неизбежно приводят образец, подвергнутый высшей частоте, к более быстрому разрушению.

В испытанных образцах гладких и с концентраторами кроме различия в размерах по длине образца имело место различное напряженное состояние. При объемном напряженном состоянии тангенциальные напряжения, обусловливающие возникновение пластических деформаций, при тех же значениях наибольших главных напряжений оказываются меньшими. В гладких образцах происходит поэтому, значительное нагревание уже при более низких перенапряжениях, чем для образцов с концентраторами.

Для *гладких образцов из легированных сталей* 30Х 45Х, имевших низкие перенапряжения, температурные условия можно считать в известной степени схожими с условиями для образцов с концентраторами. Но так как повышение температуры появляется здесь раньше, то пересечение кривых усталости должно происходить при более низких перенапряжениях. Это подтверждается и экспериментальными данными, в соответствии с которыми пересечение происходит при значении напряжений $\sim 1{,}1\,\sigma_{-1}$.

Для *гладких образцов из нормализованных углеродистых сталей* имеется значительное различие в температурах при различных частотах уже при самых низких перенапряжениях и даже при пределе усталости. Возникающая теплота повышает температуру образцов в значительной мере уже в течение первых 20—40% срока службы. С одной стороны, высокая температура вызывает снижение предела текучести в зернах, еще пластически не деформированных, с другой стороны, из-за более интенсивного хода процесса отдыха она уменьшает сопротивление дальнейшим деформациям в уже деформированных зернах. Тем самым способность к сопротивлению в более напря-

женных группах зерен при высокой частоте перемен напряжений исчерпывается раньше (после меньшего числа циклов), чем при низшей частоте.

Возникающее при более высоких перенапряжениях при различных частотах повышение температуры достаточно для того, чтобы усилить процесс отдыха.

О легированных сталях этого сказать нельзя. Для них разность в температурах образцов при повышении перенапряжений (в интервале, использованном нами) увеличивается. В соответствии с этим мы обнаружим бо́льшую разницу в долговечностях именно при увеличении перенапряжений.

На основании вышеприведенного анализа мы вправе ожидать различия и в величинах пределов усталости при различных частотах. Таким образом было бы нормально при низших частотах ожидать понижения предела усталости как для образцов с концентраторами, так и для гладких из сталей 30Х и 45Х, а повышение предела усталости — для гладких образцов из сталей 30 и 45.

При частоте перемен напряжений в 340 цикл/мин нам удалось отметить изменение предела усталости в 2-х случаях: для гладких образцов из стали 45Х предел усталости понизился, а из стали 45 — повысился на 0,6 кг/мм^2. В других случаях такого различия в пределах усталости не наблюдалось. С одной стороны, можно предполагать, что использованная нами ступень изменения нагрузки (0,6 кг/мм^2) слишком велика, с другой же стороны, при напряжениях, близких к пределу усталости, имеет место сравнительно большой разброс опытных данных. Эти факторы могут в итоге препятствовать выявлению предполагаемого влияния частоты.

На основании вышеприведенных соображений можно заключить, что учет при переменных напряжениях влияния скорости деформации и температуры, замеченного для однократного нагружения, оправдывает себя полностью. Закономерности, принятые в теории упрочнения и отдыха хорошо применимы и для объяснения тех изменений, которые наблюдаются в течение процесса усталости. Такой подход к объяснению явлений может, по нашему мнению, помочь решить вопрос о влиянии различных частот при переменных перенапряжениях, показывая, что частота перемен напряжений может существенно влиять на усталостную прочность сталей как в сторону увели-

чения, так и в сторону уменьшения сопротивления переменным напряжениям. Последняя точка зрения расширяет наши представления о возможном влиянии частоты перемен напряжений.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать следующие выводы:

1. В специальной литературе имеется мало данных о кривой усталости в области перенапряжений, причем и эти немногочисленные данные приводятся, обычно, лишь в самом общем виде.

2. Данные о влиянии частоты перемен напряжений в области перенапряжений в литературе встречаются исключительно редко. Имеется тенденция безоговорочно распространять закономерности, справедливые для напряжений предела усталости при стандартном базовом числе циклов и на область перенапряжений.

3. Недостаточно раскрытые особенности усталостных явлений в области перенапряжений не позволяют конструкторам наиболее эффективно использовать преимущества, достигаемые при применении высоких допускаемых переменных напряжений, т. е. добиваться достижения компактности деталей машин, малого веса и т. п.

4. Экспериментальные данные указывают на то, что при перенапряжениях изменение частоты перемен напряжений в интервале от 340 до 3000 цикл/мин влияет в большой мере на усталостную прочность, причем при одной и той же амплитуде напряжений долговечность образцов может повыситься более чем в 4,5 раза (сталь 45, гладкие образцы) и уменьшиться более чем в 5,5 раза (сталь 30Х, образцы с надрезом). Основные направления влияния частоты перемен напряжений могут быть охарактеризованы следующим образом:

а) для гладких образцов из углеродистой стали (нормализованной) низшая частота повышает усталостную прочность для всей исследованной области перенапряжений;

б) для гладких образцов из легированных сталей (улучшенных) в области низших перенапряжений низшая частота понижает усталостную прочность, в области же

высших перенапряжений, наоборот — повышает усталостную прочность;

в) усталостная прочность образцов с концентраторами понижается при более низких частотах перемен напряжений;

г) усталостная прочность гладких образцов из углеродистой стали в области высших перенапряжений ниже усталостной прочности образцов с концентраторами.

5. Эффективный коэффициент концентрации напряжений β и коэффициент чувствительности к концентрации напряжений q для всех марок сталей зависят от величины перегрузки и частоты перемен напряжений. При этом возможны значения $\beta<1$ и $q<0$.

6. Различия в картине излома при разных частотах перемен напряжений обусловливаются главным образом разницей в числе циклов до разрушения.

Для углеродистых сталей (нормализованных) для гладких образцов площадь зоны окончательного излома оказывается меньшей при низшей частоте перемен напряжений.

Для легированных сталей (улучшенных) для гладких образцов в области низших перенапряжений зона окончательного излома при низшей частоте больше, чем при высших частотах; в области же высших перенапряжений — наоборот.

Для образцов с концентраторами зоны окончательного излома оказываются при низших частотах напряжений большими.

7. Показатель степени m в уравнении, описывающем кривую усталости, изменяется при повышении частоты перемен напряжений следующим образом:

для гладких образцов из углеродистых сталей — понижается,
для „ „ „ легированных сталей — повышается,
для образцов с концентраторами — повышается.

8. Экспериментальные данные подтверждают предположения, сделанные нами о том, что т. н. теория упрочнения и отдыха применима и для анализа усталостных явлений как для одного зерна, так и для групп зерен.

9. Основными факторами, которые обусловливают различное влияние различных частот перемен напряжений являются: скорость деформации, температура, возникающая в образце, и напряженное состояние образца.

Характер влияния различных частот перемен напряжений зависит от материала и формы детали и от величины перенапряжений.

10. Различие в частоте перемен напряжений от 340 до 3000 цикл/мин на предел усталости сталей, исследованных нами, не оказало заметного влияния.

11. В связи с расширением применения расчетов деталей машин на выносливость при перенапряжениях и по эквивалентным режимам, необходимо внести некоторые дополнения в ГОСТ 2860—45, касающиеся области перенапряжений.

12. Изучение температурного режима в образцах, подвергнутых чистому изгибу, открывает простые, хотя и косвенные возможности изучить процесс усталости в зависимости от степени перенапряжения и частоты нагружения, а также следить за развитием процесса усталости.

13. Опыты, произведенные нами со сталями 30, 45, 30Х и 45Х, показали, что в области перенапряжений при разных частотах перемен напряжений появляются некоторые закономерности, не соответствующие нашим обычным представлениям о поведении сталей в области напряжений предела усталости. Поэтому, для успешного использования этих закономерностей на практике необходима постановка дальнейших исследований изменения усталостных свойств в области перенапряжений для наиболее распространенных марок сталей, обращая особое внимание на исследование влияния концентраторов напряжений и влияния размеров деталей (масштабного фактора) при разных частотах перемен напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Афанасьев, Микроструктурная картина возникновения трещины усталости, ЖТФ, т. XIV, № 10—11, 1944.
2. В. И. Беляев и Т. А. Лебедев, О схеме упрочнения и разупрочнения металла при циклическом испытании образцов, Труды Ленинградского политехнического института, № 4, 1953.
3. Л. А. Гликман и В. П. Тэхт, К вопросу о физической природе процесса усталости металла, в сб. Некоторые вопросы усталостной прочности стали, Машгиз, 1953.
4. Ю. С. Терминасов, Рентгенографическое исследование остаточных напряжений II и III рода при усталости стали, ЖТФ, т. XVIII, вып. 4, 1948.
5. С. О. Цобкалло и Б. А. Кузнецов, Изучение природы усталости оптическим методом, ЖТФ, т. XXIII, вып. I, 1953.
6. В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, т. II, Томск, 1941.
7. М. А. Большанина, Упрочнение и отдых как основные явления пластической деформации, Известия АН СССР, сер. физическая, т. XIV, № 2, 1950.
8. Г. И. Карпов, К вопросу об отдыхе металлов при пластической деформации, Труды Сибирского физико-технического института, 24, 125, Томск, 1947.
9. E. Kaufmann, Über die Dauerbiegefestigkeit einiger Eisenwerkstoffe und ihre Beeinflussung durch Temperatur und Kerbwirkung, Berlin, 1931.
10. Л. А. Гликман, В. А. Журавлев, Т. Н. Снежкова, Изменение затухания при циклических напряжениях ниже и выше предела усталости, ЖТФ, т. XIX, вып. 4, 1949.
11. Г. В. Карпенко, Влияние частоты изменения напряжения на выносливость стали при ее работе в поверхностно-активных и коррозионно-активных средах, Доклады АН СССР, т. 87, № 5, 1952.
12. Г. В. Карпенко, И. И. Ищенко, И. А. Малиновская, Влияние охлаждающей среды на выносливость стали. Доклады АН УССР, № 5, 1952. (На укр. яз.)
13. Г. В. Карпенко, Влияние частоты нагружения на выносливость стали, в сб. Вопросы прочности конструкций и динамики машин, АН УССР, Киев, 1954.
14. В. А. Быков, Исследование усталости стали при плоском чистом изгибе, в сб. Некоторые вопросы усталостной прочности стали, Машгиз, 1953.
15. А. К. Митропольский, О вычислении корреляционных уравнений при малом числе испытаний, Труды Лесотехнической академии им. С. М. Кирова, № 48, 1938.

16. М. Я. Шашин, Методика определения средних вероятных значений циклической долговечности, Заводская лаборатория, № 6, 1952.
17. С. В. Серенсен и др., Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность, Машгиз, 1954.
18. Effect of Stress Concentration of Design Strength (By the ASM Commitee on Stress Concentration), Metall Progress, July 1954.
19. Н. Н. Афанасьев, Статистическая теория усталостной прочности металлов, АН УССР, 1953.
20. Д. Н. Видман, О строении изломов при аварийных разрушениях от усталости, Вестник машиностроения, № 9, 1948.
21. Д. Н. Видман, Оценка прочности деталей по типу изломов усталостных разрушений, Вестник машиностроения, № 2—4, 1942.
22. Д. Н. Видман, Метод оценки конструкционной прочности по строению усталостных изломов, в сб. Термическая обработка металлов, Машгиз, 1950.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. **Некоторые соображения в связи с процессом усталости**	5
Глава II. **Методика испытаний**	8
Глава III. **Экспериментальные данные и их краткий анализ**	10
1. Усталостная прочность и частота нагружения	10
2. Об эффективном коэффициенте концентрации напряжений и коэффициенте чувствительности	17
3. Температура образцов	19
4. О возможности изучения процесса усталости	21
5. Усталостные изломы	24
6. Скорость деформации и температура — важные факторы при оценке усталостной прочности	28
Выводы	31
Литература	34

Государственная Академическая Консерватория

Х. А. Кулдма

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярну маантеэ, 10.

*

Редактор В. Менг
Технический редактор Л. Ууспылд
Корректор Н. Круглова

Сдано в набор 9 VII 1956. Подписано к печати 24 XI 1956. Бумага 54×84 1/16. Печатных листов 2,25. По формату 60×92 печатных листов 1,84. Учетно-издательских листов 1,45. Тираж 800. МВ-08553. Заказ 2444.

Типография «Тарту Коммунист», Тарту, Юликооли, 17/19.

Цена руб. 1.—