

Н. Н. ЩЕГЛОВ

ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ И
ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ
СТАЛЕЙ В НЕКОТОРЫХ
СЛУЧАЯХ СОВМЕЩНОГО
ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБА И КРУЧЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

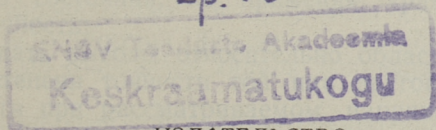
Ер. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СЕРИЯ А № 113 1957

Н. Н. ЩЕГЛОВ

ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ И
ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ
СТАЛЕЙ В НЕКОТОРЫХ
СЛУЧАЯХ СОВМЕЩНОГО
ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБА И КРУЧЕНИЯ

Ер. 965



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики механической прочности материалов являются при расчетах основой для определения допускаемых напряжений или несущей способности деталей машин. Достоверность их определения дает возможность уменьшить запас прочности, следовательно, облегчить конструкцию.

Для деталей машин, работающих в условиях сложного напряженного состояния, обычно не имеется непосредственных характеристик механической прочности материала при соответствующем напряженном состоянии, так как последние определяются, как правило, лишь при линейном напряженном состоянии. Вследствие этого возникает необходимость использования уравнений теорий прочности.

Для переменных напряжений при сложном напряженном состоянии предложено немало теорий прочности [1], [2], [3], [4], [5], [6] и [7], зависимости которых лишь приближенно совпадают с результатами опытов.

Поэтому экспериментальное определение пределов выносливости при сложных напряженных состояниях имеет большое значение, так как дает возможность:

- 1) использовать определенный предел выносливости непосредственно для соответствующего напряженного состояния, не применяя уравнений теории прочности;
- 2) сделать выводы относительно области применения и степени точности той или другой теории прочности при рассматриваемом напряженном состоянии.

В настоящей работе приводится описание использованных машин, методика и результаты опытов по определе-

нию пределов выносливости и пластических деформаций сталей для двух частных случаев плоского напряженного состояния:

- 1) одновременное действие переменного симметрического изгиба и постоянного кручения;
- 2) одновременное действие переменного симметричного кручения и постоянного изгиба.

Оба эти случая соответствуют реальным условиям работы многих деталей машин и поэтому представляют практический интерес.

Нам известны следующие экспериментальные работы в этой области:

для первого указанного случая: Гафа с сотрудниками [8], Дэвиса [9], Лие и Бэджина [10];

для второго: Гафа с сотрудниками [8] и Шульман [11].

Близкие по характеру напряженные состояния исследованы в работах: Гоенемзера и Прагера [12], Заверта [13], Савельева [14], Ужика [15] и [16].

Небольшое количество экспериментальных работ и некоторая противоречивость их результатов, а также малое количество исследованных материалов побудили нас провести описываемые в данной статье опыты.

1. МАТЕРИАЛЫ

Опыты производились со сталями, химический состав, механические свойства и термическая обработка которых приводятся в таблице 1.

2. ОБРАЗЦЫ

Во всех опытах применялись гладкие образцы диаметром 7,52 мм для испытания на выносливость согласно ГОСТ 2860—45. Для передачи крутящего момента на образец на утолщенных концах последнего были сделаны лыски.

Окончательная обработка образцов выполнена шлифованием продольными проходами. Чистота поверхности образцом соответствует 9 классу ГОСТ 2789—51.

Чертеж образца приводится на фиг. 1.

Таблица 1.

Марка стали	Химический состав						Механические свойства								Термическая обработка
	C	Mn	Si	Cr	S	P	σ_b	σ_T	$\sigma_{ТИ}$	σ_{-1}	τ_b	τ_T	τ_{-1}	δ	
10	0,09— —0,10	0,47— —0,52	0,18— —0,23	0,10	0,038— —0,042	0,038— —0,042	43,5— —43,7	33,2— —33,8	43,6— —44,0	24,0	52,0— —52,5	20,5— —22,0	16,0	31,5— —33,0	Нормализация 910° С
45	0,44— —0,47	0,70— —0,80	0,22— —0,30	0,09	0,028	0,025	67,3— —68,9	45,7— —47,3	61,9— —63,0	29,0	65,5— —66,2	29,3— —30,0	24,0	21,0— —23,0	Нормализация 850° С
40X	0,42— —0,45	0,61— —0,72	0,17— —0,35	0,80— —0,85	0,03— —0,04	0,03	122,0— —124,0	113,0— —114,0	147,5— —149,0	56,4	99,0— —102,0	76,0— —76,5	33,9	6,7— —6,9	Закалка в масле 850° С. Отпуск 500° С. Охлаждение на воздухе.

Примечания:

1. Напряжения даны в кг/мм², а относительное удлинение в %.
2. $\sigma_{ТИ}$ — предел текучести круглого сплошного образца при изгибе.
3. σ_{-1} — предел выносливости при симметричном изгибе.
4. τ_{-1} — предел выносливости при симметричном кручении, определенный на сплошных образцах.
5. Все приводимые характеристики механической прочности определены на одинаковых образцах (фиг. 1).
6. Прочие обозначения общепринятые.

нию пределов выносливости и пластических деформаций сталей для двух частных случаев плоского напряженного состояния:

- 1) одновременное действие переменного симметрического изгиба и постоянного кручения;
- 2) од...

Оба
боты м
практич

Нам
этой об
для
[8], Дэр
для
[11].

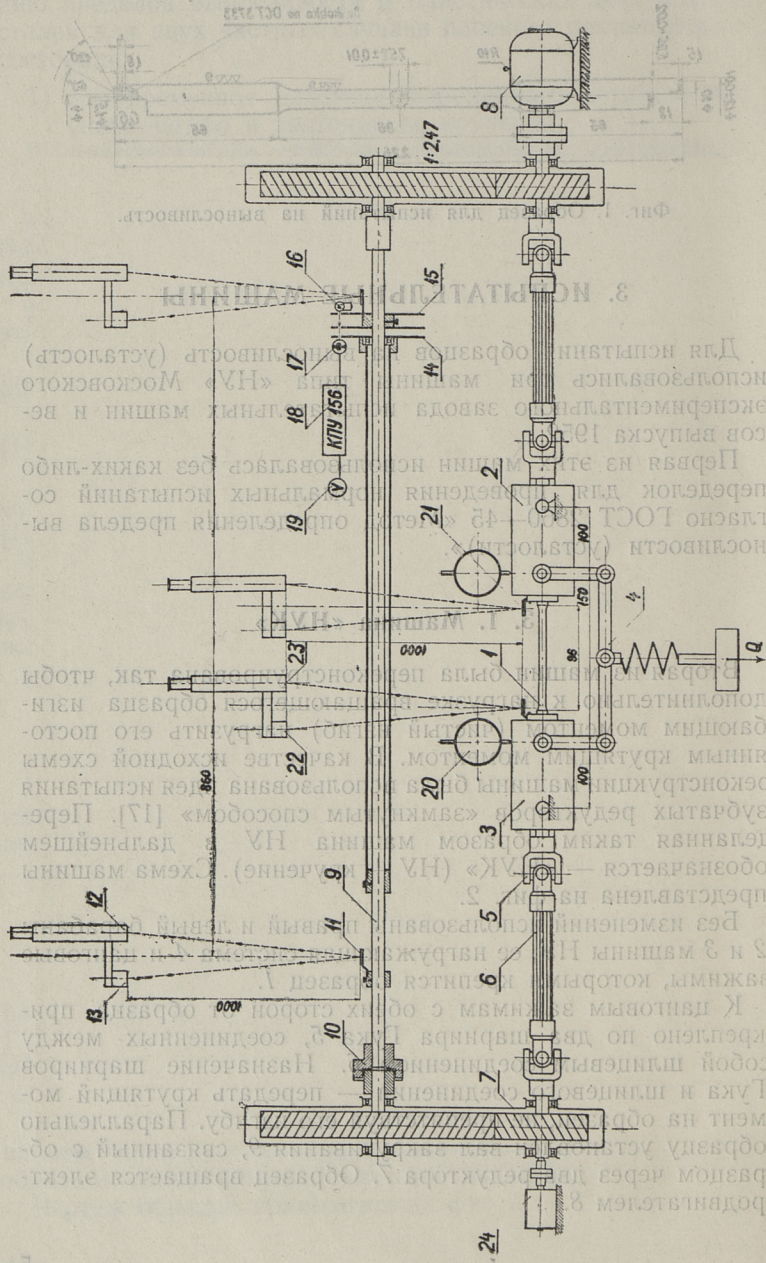
Близ
дованы
[13], Са
Небо
которая
количес
вести с

Опыт
механи
привод

Во е
ром 7,
ГОСТ
образе
лыски.

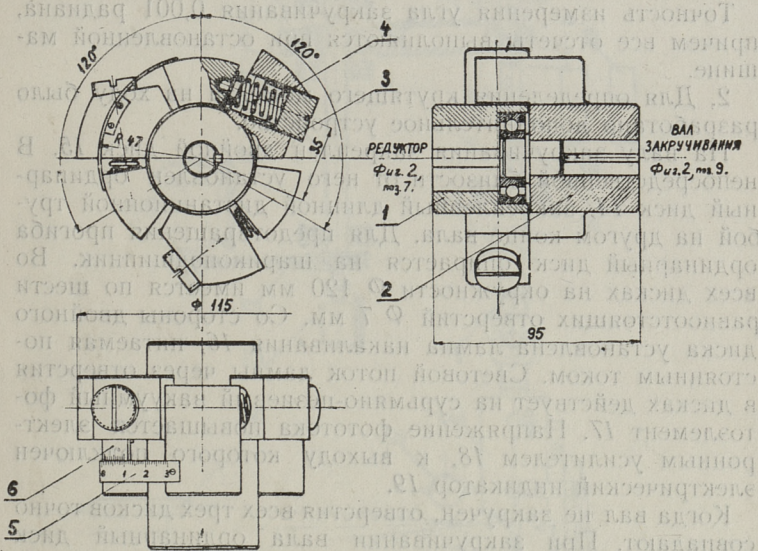
Окол
ванием продольными проходами. Чистота поверхности образцом соответствует 9 классу ГОСТ 2789—51.

Чертеж образца приводится на фиг. 1.



Фиг. 2. Схема машины НУК.

Крутящий момент в замкнутом контуре: образец — редуктор — вал закручивания — редуктор — образец, создается муфтой закручивания 10, которая отдельно изображена на фиг. 3. Левая половина муфты 1 укреплена на редуктор, а правая 2 на валу закручивания. Выступы левой половины заходят в пазы правой половины муфты. Обе половины центрируются одна относительно



Фиг. 3. Муфта закручивания машины НУК.

другой шарикоподшипником. Завинчиванием винтов 3, пружинами 4 осуществляется перемещение одной половины муфты относительно другой, измеряемое шкалой 5 и нониусом 6. Так как муфта включена в замкнутый контур, то при таком перемещении половинок муфты вал 9 (фиг. 2) закручивается. Вал закручивания рассчитан так, что наибольшие напряжения в нем не превосходят предела упругости.

Крутящий момент от вала закручивания через редукторы, шарниры Гука и шлицевые соединения передается на образец.

Для измерения крутящего момента применены две независимые системы:

1. Зеркальная установка Мартенса, состоящая из двух зрительных труб 12, шкал 13 и зеркал 11, закрепленных на противоположных концах вала закручивания.

Крутящий момент $M_{кр}$ определяется известной зависимостью:

$$M_{кр} = \frac{G J_o}{L} \varphi_v.$$

Точность измерения угла закручивания 0,001 радиана, причем все отсчеты выполняются при остановленной машине.

2. Для определения крутящего момента на ходу было разработано дополнительное устройство.

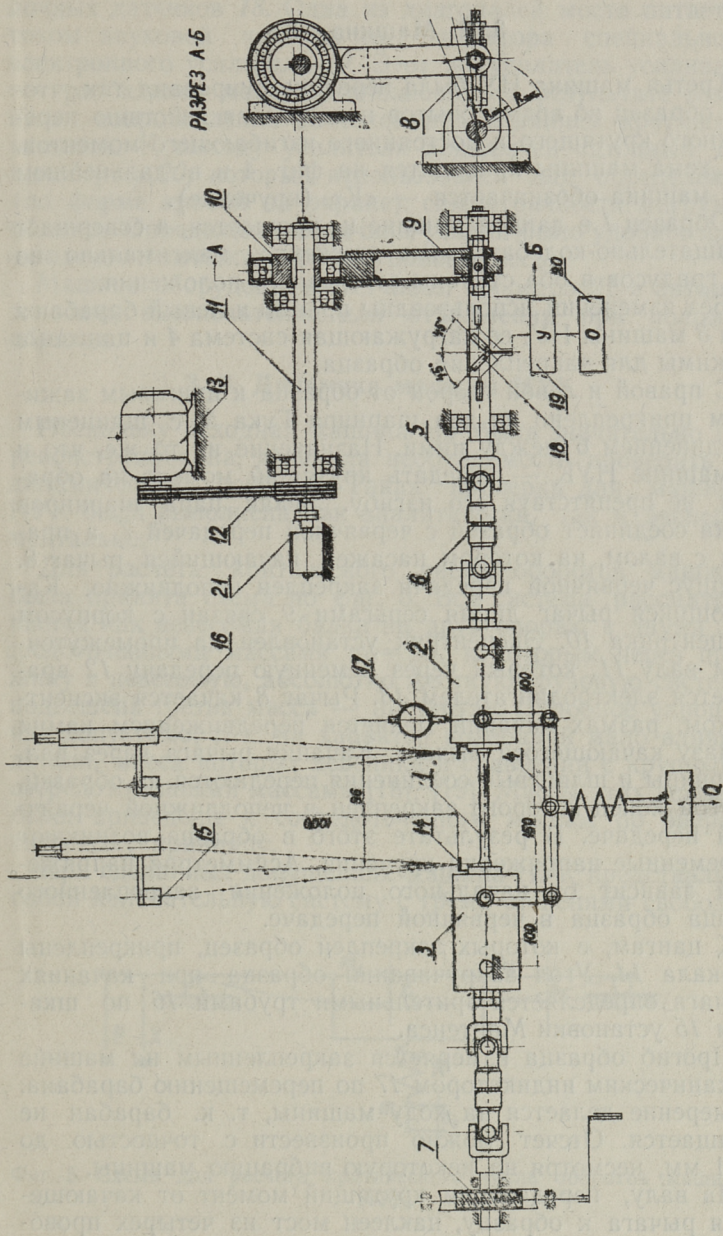
На валу закручивания закреплен двойной диск 15. В непосредственной близости от него установлен ординарный диск 14, закрепленный длинной дистанционной трубой на другом конце вала. Для предотвращения прогиба ординарный диск опирается на шарикоподшипник. Во всех дисках на окружности Φ 120 мм имеется по шести равноотстоящих отверстий Φ 7 мм. Со стороны двойного диска установлена лампа накаливания 16, питаемая постоянным током. Световой поток лампы через отверстия в дисках действует на сурьмяно-цезиевый вакуумный фотоэлемент 17. Напряжение фототока повышается электронным усилителем 18, к выходу которого подключен электрический индикатор 19.

Когда вал не закручен, отверстия всех трех дисков точно совпадают. При закручивании вала ординарный диск поворачивается относительно двойного диска и отверстия перекрываются тем больше, чем больше закручивание вала, что уменьшает световой поток. В результате этого отклонения стрелки электрического индикатора определяются углом закручивания вала, а следовательно и крутящим моментом.

Прогиб образца измеряется закрепленными на машине механическими индикаторами 20 по перемещению барабанов, что делается на ходу машины, т. к. барабаны не вращаются.

Для измерения угла закручивания образца применена вторая установка Мартенса, состоящая из двух зрительных труб 23, шкал 22 и зеркал 21, прикрепленных к цапгам, в которых зажат образец.

Число оборотов образца определяется счетчиком 24. При поломке образца машина автоматически отключается.



Фиг. 4. Схема машины К.

3. 2. Машина «К»

Третья машина НУ была переконструирована так, чтобы образец во время опытов подвергался действию переменного крутящего и постоянного изгибающего моментов.

Схема машины приводится на фиг. 4 и в дальнейшем эта машина обозначается — «К» (кручение).

Образец 1 в данной машине не вращается, а совершает вращательно-колебательные движения максимально на 10 градусов в обе стороны от среднего положения.

Без изменений использованы правый и левый барабаны 2 и 3 машины НУ, ее нагружающая система 4 и цанговые зажимы для закрепления образца.

С правой и левой сторон от образца к цанговым зажимам прикреплено по два шарнира Гука 5 с шлицевым соединением 6 между ними. Назначение их то же, что и в машине НУК — передать крутящий момент на образец, не препятствуя его изгибу. Левая пара шарниров Гука соединяет образец с червячной передачей 7, а правая с валом, на котором насажен качающийся рычаг 8. Корпус червячной передачи закреплен неподвижно. Качающийся рычаг двумя серьгами 9 связан с корпусом эксцентрика 10. Эксцентрик установлен на промежуточном валу 11, который через ременную передачу 12 вращается электродвигателем 13. Рычаг 8 качается эксцентриком, размах качаний меняется передвижением камня в пазу качающегося рычага. Качания рычага через вал, шарниры и шлицевые соединения передаются на образец, другой конец которого закреплен в неподвижной червячной передаче. В результате этого в образце возникают переменные напряжения кручения. Асимметрия напряжений зависит от начального положения закрепленного конца образца в червячной передаче.

К цангам, в которых закреплен образец, прикреплены зеркала 14. Угол закручивания образца при качаниях рычага определяется зрительными трубами 16 по шкалам 15 установки Мартенса.

Прогиб образца измеряется закрепленным на машине механическим индикатором 17 по перемещению барабана. Измерение делается на ходу машины, т. к. барабан не вращается. Отсчет можно произвести с точностью до 0,01 мм, несмотря на некоторую вибрацию машины.

На валу, передающем крутящий момент от качающегося рычага к образцу, наклеен мост из четырех прово-

лочных датчиков 18. Одна из диагоналей моста питается током звуковой частоты от генератора специального электронного усилителя 19. Этот же усилитель усиливает ток разбаланса моста, возникающего в результате изменения сопротивления датчиков под влиянием крутящего момента. К выходу усилителя подключен катодный осциллограф 20, который использовался для определения (по форме кривой на экране) симметричности нагрузки образца. Определение величины усилий было удобнее производить оптически, как это описывалось.

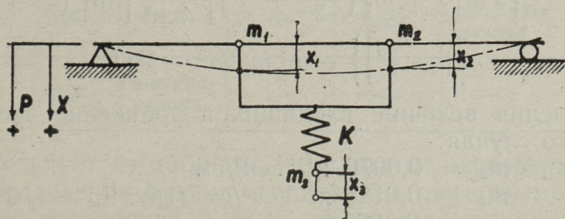
Машина оборудована счетчиком оборотов 21 и автоматическим выключателем для отключения при поломке образца.

3. 3. Динамика машины НУК

Поскольку исходная машина НУ была значительно переконструирована, возникла необходимость проверить ее динамические свойства. Такая проверка для машины НУК была выполнена как аналитически, так и экспериментально.

Для расчета критического числа оборотов машины была принята схема по фиг. 5. Вся система рассматривается как невесомая балка на двух опорах, с двумя сосредоточенными массами $m_1 = m_2$, к которым через пружину и невесомую, абсолютно жесткую грузовую систему подвешена третья масса — m_3 (груз). Подобное упрощение допустимо, т. к. на характер колебаний мало влияют детали, масса которых невелика в сравнении с крупными сосредоточенными массами [18], [19]. Массы этих деталей были приведены к сосредоточенным массам по энергетическому принципу.

При сделанных допущениях машина НУК представляет собой колебательную систему с тремя степенями свободы.



Фиг. 5. Схема для расчета критического числа оборотов машины НУК.

Для определения частот собственных колебаний системы были применены уравнения Лагранжа.

Принимая за обобщенные координаты перемещения масс m_1 , m_2 и m_3 соответственно x_1 , x_2 и x_3 , можем определить кинетическую и потенциальную энергию системы.

Принимая за начало отсчета изогнутую под влиянием статического прогиба ось вала, получим после преобразований выражения:

$$x_1 = -m_1 \alpha \ddot{x}_1 - m_1 \beta \ddot{x}_2 - m_3 \frac{\alpha + \beta}{2} \ddot{x}_3,$$

$$x_2 = -m_1 \alpha \ddot{x}_2 - m_1 \beta \ddot{x}_1 - m_3 \frac{\alpha + \beta}{2} \ddot{x}_3,$$

$$x_3 = -m_1 (\alpha + \beta) \ddot{x}_1 - m_1 (\alpha + \beta) \ddot{x}_2 - m_3 \left(\frac{1}{k} + \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \ddot{x}_3,$$

где α и β коэффициенты влияния (см/кГ),

α — от действия единичной силы, если она приложена в данном сечении;

β — от действия единичной силы, если она приложена в другом сечении;

k — жесткость пружины (кГ/см).

Предполагая гармонические колебания системы с общей частотой ω и различными амплитудами, получаем для определения уравнений частот три выражения, решение которых сводится к решению детерминанта:

$$D = \begin{vmatrix} m_1 \alpha - \frac{1}{\omega^2} & m_1 \beta & m_3 \frac{\alpha + \beta}{2} \\ m_1 \beta & m_1 \alpha - \frac{1}{\omega^2} & m_3 \frac{\alpha + \beta}{2} \\ m_1 (\alpha + \beta) & m_1 (\alpha + \beta) & m_3 \left(\frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{1}{k} \right) - \frac{1}{\omega^2} \end{vmatrix},$$

откуда уравнение частот запишется:

$$\frac{1}{\omega^6} - \frac{1}{\omega^4} \left[2 m_1 \alpha + m_3 \left(\frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{1}{k} \right) \right] + \frac{1}{\omega^2} \left\{ m_1^2 (\alpha^2 - \beta^2) + m_1 m_3 \left[\alpha \frac{2}{k} - \alpha \beta - \beta^2 \right] \right\} - m_1^2 m_3 (\alpha^2 - \beta^2) \left(\frac{1}{k} - \frac{\alpha + \beta}{2} \right) = 0,$$

Значения величин, входящих в уравнение частот для данного случая:

$$m_1 = m_2 = 0,0076 \text{ кГ сек}^2/\text{см},$$

$$m_3 = 0,0125 \text{ кГ сек}^2/\text{см} \text{ (груз } Q = 10 \text{ кГ)},$$

$$\alpha = 0,0670 \text{ см/кГ},$$

$$\beta = 0,0625 \text{ см/кГ},$$

$$k = 85,5 \text{ кГ/см}.$$

Коэффициенты влияния α и β были определены непосредственным измерением прогибов по индикаторам (на ходу машины). Жесткость пружины получена тарированием. Массы m_1 , m_2 и m_3 , как указывалось, определены приведением действительных масс машины к сосредоточенным по энергетическому принципу. Сделав подстановку и произведя необходимые вычисления, получим три критических числа оборотов машины НУК, приведенные в таблице 2.

Если машина работает с поднятой грузовой системой, то в уравнениях следует положить $m_3 = 0$, откуда определяются два критических числа оборотов машины для этого случая, приведенные также в таблице 2.

При экспериментальном определении критического числа оборотов машины НУК, последняя, через пару сменных шкивов и клиноременную передачу, приводилась от электродвигателя постоянного тока, что позволяло менять обороты машины в диапазоне от 700 до 3300 оборотов в минуту. В указанном диапазоне число оборотов менялось ступенями через 100—200 оборотов. На каждой ступени числа оборотов оптико-механическим индикатором [20] замерялась амплитуда колебаний образца.

Результаты экспериментального определения числа оборотов приведены в той же таблице 2.

Т а б л и ц а 2.

Критическое число оборотов	Q = 10кГ			Q = 0 (без груза)		
	по расчету об/мин	экспериментально об/мин	отклонение %	по расчету об/мин	экспериментально об/мин	отклонение %
p_1 кр	547	вне диапазона	—	975	1110	14
p_2 кр	2080	1870	10	5130	вне диапазона	—
p_3 кр	5160	вне диапазона	—	—	—	—

Как следует из таблицы, результаты, экспериментального определения близко совпадают с расчетными.

Опыты на машине НУК выполнялись при числе оборотов в минуту 1480, которое лежит достаточно далеко от критических. Понижение числа оборотов (против 2860 об/

мин для машины НУ) было сделано для уменьшения абсолютного значения амплитуды вибрации образца, хотя имеются данные [18], что последняя существенно не влияет на результаты опытов.

Динамические свойства машины К не проверялись, т. к. на этой машине образец не вращается. Ввиду значительной массы эксцентрика, серег и рычагов, совершающих возвратно-поступательные движения, число качаний этой машины было понижено до 670 в минуту.

4. ТАРИРОВКА МАШИНЫ НУК

При тарировке определялась зависимость величины нормальных напряжений σ в образце от прилагаемого груза Q , а также зависимость касательных напряжений τ от угла закручивания φ_v вала 9 фиг. 2.

С этой целью было выполнено следующее.

1. *Определен вес грузовой системы машины НУК.* В машину устанавливался сломанный образец, барабаны машины подвешивались к чувствительному динамометру, закрепленному над машиной согласно фиг. 6. Машина включалась на ход и отпускался рычаг, поддерживающий нагружающую систему машины. При этом динамометр показывал вес нагружающей системы в условиях работы машины.

Было определено, что нагружающая система машины весит 8 кг.

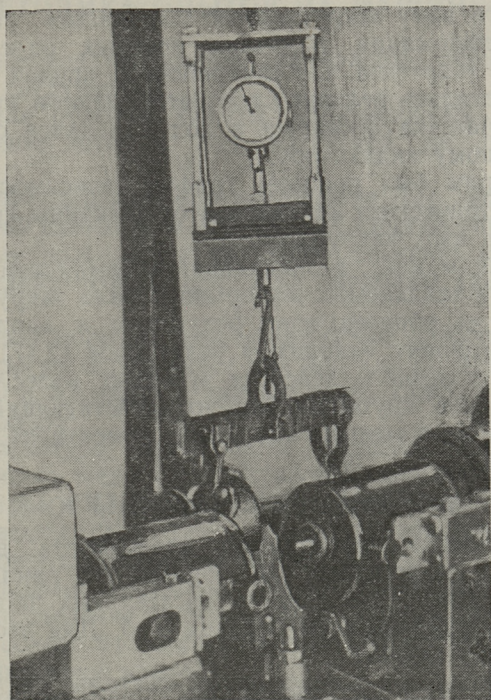
Аналогичным образом была проверена нагружающая система машины НУ (без переделок), вес которой оказался 12,2 кГ вместо 13 кГ по паспорту машины.

Взвешивание изложенным способом было рекомендовано Лабораторией прочности машиностроительных материалов АН СССР (проф. Г. В. Ужик).

2. Отдельно поставленными опытами *определены пределы выносливости и построены кривые Велера параллельно на машине НУ и на машине НУК* (без приложения крутящего момента) для одного и того же материала.

Было установлено, что как пределы выносливости, так и кривые Велера в обоих случаях совпадают. Это дополнительно подтверждает правильность взвешивания по пункту 1.

3. *Измерена величина прогиба образца до и после приложения крутящего момента* (индикаторами 20 фиг. 2).



Фиг. 6. Определение веса нагружающей системы машины.

Было установлено, что приложение крутящего момента не влияет на прогиб образца, а следовательно, и на величину изгибающего напряжения.

4. *Определена зависимость величины крутящего момента на валу закручивания 9 фиг. 2 от его угловой деформации.*

Для этого один конец вала закручивания закреплялся, а ко второму прикладывался крутящий момент подвешиванием грузов к специальному рычагу. Одновременно делался отсчет зеркальной установкой Мартенса. По замерам был построен график зависимости крутящего момента от угла закручивания вала.

5. *Определена зависимость показаний электрического индикатора 19 фиг. 2 от величины крутящего момента на валу закручивания.*

Для этого вала закручивания сообщались различные угловые деформации, величина которых определялась установкой Мартенса. По тарировочной кривой согласно п. 4 определялась величина соответствующего крутящего момента. Машина пускалась в ход и делался отсчет по электрическому индикатору.

По замерам был построен график зависимости показаний электрического индикатора от величины крутящего момента на валу закручивания.

Крутящий момент, возникающий в замкнутом контуре в результате задаваемых деформаций вала закручивания, передается на образец через редукторы и карданы. За счет передаточного отношения редукторов (2,47) и коэффициентов полезного действия зубчатых колес и шарикоподшипников крутящий момент, действующий на образец, в 2,8 раза меньше крутящего момента на валу закручивания.

5. ТАРИРОВКА МАШИНЫ К

При тарировке определялась зависимость величины нормальных напряжений σ в образце от прилагаемого груза Q , а также зависимость касательных напряжений τ от угловых деформаций образца φ об. Для этого было выполнено следующее.

1. *Определен вес нагружающей системы* так же, как для машины НУК.

2. *Определена зависимость величины касательных напряжений в образце от его угловых деформаций.* С этой целью качающийся рычаг 8 фиг. 4 был заменен специальным рычагом. Подвешиванием различных грузов к рычагу образец нагружался крутящим моментом определенной величины. Одновременно зеркальной установкой Мартенса определялся угол закручивания образца.

По результатам замеров был построен график зависимости приложенного крутящего момента от угла закручивания образца.

3. *Установлено, что закручивание образца на ходу машины незначительно отличается от закручивания при статических испытаниях.*

Для этого луч света проекционного фонаря (на фиг. 4 не показан) направлялся на зеркала 14 фиг. 4. В темноте по шкале измерялся ход «зайчика» от правого и левого зеркала, откуда определялись угловые деформации образца на ходу машины.

6. МЕТОДИКА ОПЫТОВ НА МАШИНЕ НУК

При производстве опытов для каждого образца определялось следующее.

1. *Биение образца.* Опыты производились с образцами, биение которых под нагрузкой не превышало 0,03 мм.

2. *Прогиб образца при постоянном для всех опытов напряжении изгиба $\sigma = 21,6$ кГ/мм².* Прогиб определяется до и после приложения крутящего момента опусканием щупов индикаторов 20 фиг. 2 на барабаны (на ходу машины).

3. *Прогиб образца при напряжении изгиба каждого опыта.* Прогиб определялся так же, как по пункту 2, через 10, 20 и 30 минут и дальше через каждые 1—2 часа по ходу опыта.

4. *Температура поверхности образца.* Определение производилось медно-константановой термопарой и потенциометром ПП. Идея способа измерения заимствована из работы [21]. Температура замерялась одновременно с определениями по пункту 3.

5. *Начальный крутящий момент, приложенный к образцу.* Определение производилось по углу закручивания вала на основе отсчетов в зрительные трубы 12 фиг. 2 (по тарировочной кривой).

6. *Величина крутящего момента по ходу опыта.* Наблюдение производилось по электроиндикатору 19 фиг. 2.

7. *Начальная деформация закручивания образца.* Определение производилось по отсчетам в зрительные трубы 23 фиг. 2.

8. *Изменение закручивания вала и образца по ходу опыта.* Машина останавливалась каждые 2—3 часа и делались отсчеты в зрительные трубы.

Замеры согласно п. п. 2, 3 и 4 имели своей основной целью проверить стабильность условий опытов.

Угол закручивания образца $\varphi_{об}$ (относительный поворот крайних сечений рабочей части образца) связан с условным сдвигом γ зависимостью

$$\gamma = \varphi_{об} \frac{r}{L},$$

где радиус образца $r = 3,76$ мм, длина рабочей части образца $L = 96,0$ мм,

$$\gamma = 0,039 \varphi_{об}.$$

9. Пределы выносливости определялись на базе 5×10^6 циклов нагружений.

7. МЕТОДИКА ОПЫТОВ НА МАШИНЕ К

При производстве опытов для каждого образца определялось следующее.

1. Действующий на образец крутящий момент и соответствующее напряжение при кручении τ . Определение производилось по отсчетам в зрительные трубы на основе тарировочной кривой.

2. Симметричность действующих циклов нагружений. Определение производилось по форме кривой на экране осциллографа.

3. Прогиб образца под нагрузкой данного опыта. Прогиб определялся индикатором 17 фиг. 4 измерением тангенса угла наклона касательной к изогнутой оси образца в опоре $\text{tg}\Theta$. Для малых углов $\text{tg}\Theta \approx \Theta$. В данной машине угол Θ связан с условным относительным удлинением крайнего волокна образца ε зависимостью

$$\varepsilon = \frac{2r}{L} \Theta,$$

где r и L имеют такие же значения как в п. 8. раздела 6, откуда имеем:

$$\varepsilon = 0,078 \Theta.$$

4. Температура поверхности образца. Температура определялась так же, как для машины НУК.

Отсчеты по п. п. 3 и 4 производились без остановки машины через 10, 20 и 30 минут и далее через каждые 2—3 часа по ходу опыта.

5. Пределы выносливости определялись на базе 3×10^6 циклов нагружений.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

8. 1. Пределы выносливости при изгибе с кручением

Всего было выполнено 27 серий основных опытов, в которых испытано 217 образцов. В каждой серии опытов одно из напряжений оставалось неизменным, второе менялось от опыта к опыту. Для машины НУК неизменным оставалось напряжение τ , менялось σ , для машины К на-

оборот. Результаты каждой серии опытов статистически обрабатывались по методу проф. Митропольского [22], строились кривые Велера и определялись пределы выносливости, которые приводятся в таблице 3 и на фиг. 7 и 8.

Т а б л и ц а 3.

Сталь 10				Сталь 45				Сталь 40X			
Серия	К-во об-разцов	τ_c	$(\sigma-1)\tau$	Серия	К-во об-разцов	τ_c	$(\sigma-1)\tau$	Серия	К-во об-разцов	τ_c	$(\sigma-1)\tau$
1	12	0	24,0	6	11	0	29,0	11	15	0	56,4
2	13	6,2	25,0	7	7	4,0	28,8	12	8	11	55,0
3	7	8,5	24,0	8	12	8,5	28,3	13	5	21,5	53,4
4	10	11,2	23,8	9	14	11,0	27,8	14	5	28	51,8
5	8	12,3*)	22,5	10	6	15,2*)	27,2	15	5	28	52,4

Знакопеременное симметричное кручение и постоянный изгиб

Сталь 10				Сталь 45				Сталь 40X			
Серия	К-во об-разцов	σ_c	$(\tau-1)\sigma$	Серия	К-во об-разцов	σ_c	$(\tau-1)\sigma$	Серия	К-во об-разцов	σ_c	$(\tau-1)\sigma$
16	6	0	16,0	20	7	0	24,0	24	3	0	33,9
17	8	9,1	15,3	21	10	9,1	22,2	25	4	42	28,0
18	6	18	15,0	22	9	24,0	19,5	26	5	66	27,0
19	7	24	14,6	23	9	32,4	—**))	27	5	84	23,2

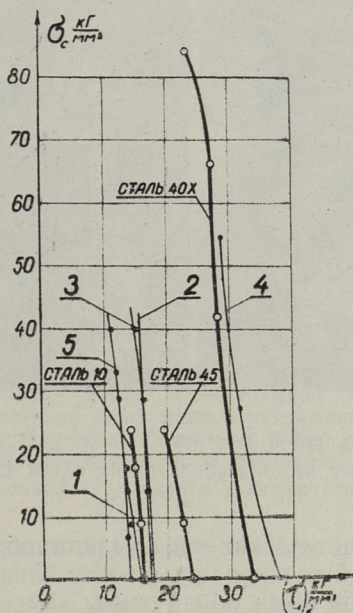
$(\sigma-1)\tau$ — предел выносливости при переменном симметричном изгибе и постоянном кручении τ_c .

$(\tau-1)\sigma$ — предел выносливости при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе σ_c .

* Дальнейшие увеличения касательных напряжений быстро вызвали значительные пластические деформации образцов.

** Не определен, т. к. образцы настолько деформировались, что выключали машину.

40X — от 20 до 25° С, при температуре окружающей среды 18 — 20° С. Наибольший нагрев таким образом имел место для образцов из стали 45. Наложение постоянных напряжений в пределах точности опытов не влияло на температуру образца.



Фиг. 8. Пределы выносливости при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе.

Для сталей 10, 45 и 40X результаты настоящей работы.

Кривая 1, сталь 15, опыты Шульман [11].

„ 2, „ 35, „ „ „

„ 3, „ 50, „ „ „

„ 4, 3,06Ni + „ Гафа [8].

„ 5, сталь 45, „ Савельева [14].

Поверхности изломов образцов для всех опытов проходили нормально к оси образца, кроме поверхностей изломов образцов из стали 45 на машине К, когда они проходили примерно под углом 45° к оси образца (фиг. 9).



а) Образец № 173

б) Образец № 317

Фиг. 9. Характерные изломы образцов из стали 45 на машине К.

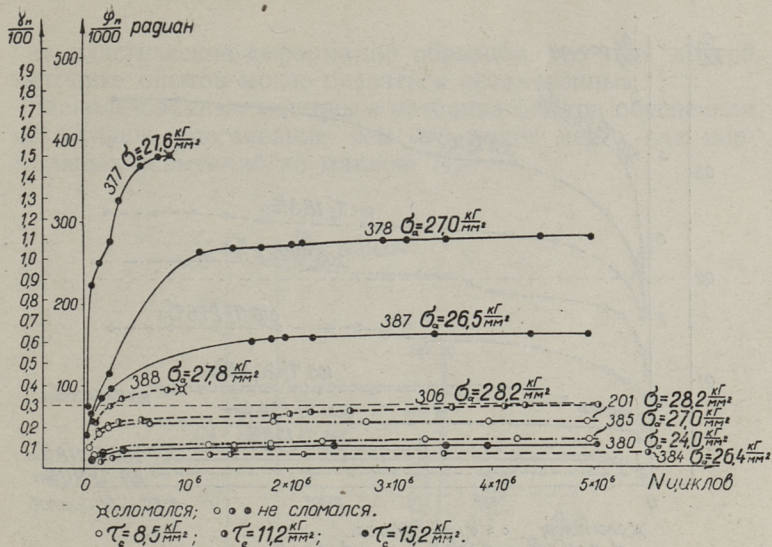
8. 2. Пластические деформации образцов

По ходу опытов были обнаружены заметные пластические деформации образцов из стали 10 и 45 в обоих обследованных случаях плоского напряженного состояния.

На машине НУК пластические деформации приводили к увеличению угла закручивания образца, что в замкнутом контуре: образец-редуктор-вал закручивания-редуктор-образец, сильно уменьшало действующий крутящий момент. Для того, чтобы уменьшение крутящего момента не превышало 5 — 10% его начального значения, в конструкцию муфты закручивания фиг. 3 были введены пружины 4.

На машине К пластические деформации проявлялись в увеличении прогиба образца.

Данное явление было обследовано и в результате опытов для переменного симметричного изгиба и постоянного кручения установлены зависимости величины пластических деформаций (φ_n и γ_n) от:



Фиг. 10. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном изгибе и постоянном кручении в зависимости от числа циклов нагружений N .

Цифры при кривых обозначают номер образца.

φ_n — угол пластического закручивания.

γ_n — условный угол сдвига у поверхности образца.

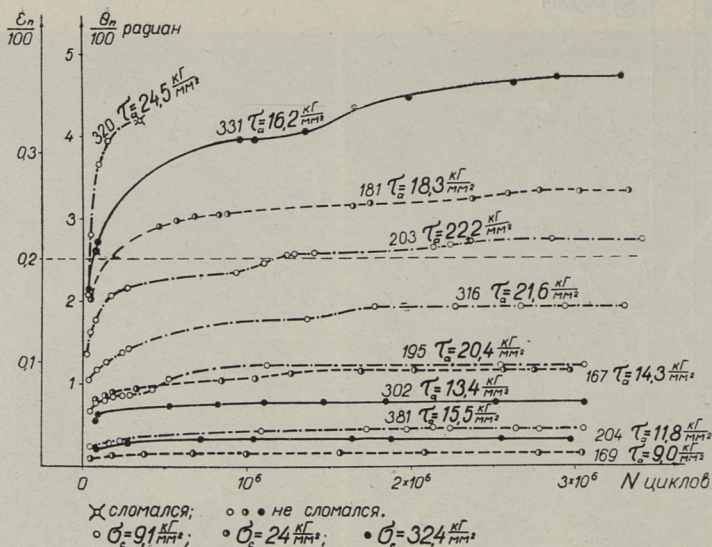
1. числа циклов нагружений N (фиг. 10 для стали 45);
2. действующих условных напряжений σ_a^* и τ_c (фиг. 12 для стали 10 и фиг. 14 для стали 45) **;
3. действующих в сечениях образца редуцированных напряжений по энергетическим условиям пластичности (фиг. 16 для стали 45).

Соответственно для переменного симметричного кручения и постоянного изгиба были установлены зависимости пластических деформаций (Θ_n и ε_n) от:

1. числа циклов нагружений N (фиг. 11 для стали 45);
2. действующих условных напряжений τ_a^* и σ_c (фиг. 13 для стали 10 и фиг. 15 для стали 45);

*) Обозначения σ_a и τ_a приняты для действующих переменных симметрических нормальных и касательных напряжений в отличие от пределов выносливости для тех же случаев (σ_{-1} и τ_{-1}).

**) Напряжения названы условными, т. к. они определены по формулам для линейной зависимости между напряжениями и деформациями.



Фиг. 11. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе в зависимости от числа циклов нагружений N .

Цифры при кривых обозначают номер образца.

θ_n — угол поворота касательной к изогнутой оси образца в опоре при пластическом изгибе.

ε_n — условное относительное удлинение.

3. действующих в сечениях образца редуцированных напряжений по энергетическим условиям пластичности, (фиг. 17 для стали 45).

На образцах из стали 40X наблюдались только очень незначительные остаточные деформации.

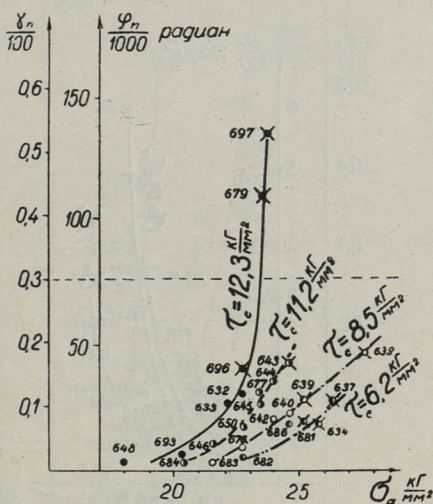
9. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обе построенные машины позволили, используя с небольшими переделками оборудование серийного выпуска, произвести испытания на выносливость в некоторых случаях плоского напряженного состояния, которое достаточно точно соответствовало напряженному состоянию деталей класса валов.

В машине НУК, применение «замкнутого контура» для нагружения образцов крутящим моментом, выявило ран-

ние пластические деформации образцов, что при другой методике опытов могло оказаться незамеченным.

Использованные машины и методика опытов обеспечили не большее рассеивание, чем это имеет место для нормальных испытаний на машине НУ.



Фиг. 12. Пластические деформации образцов из стали 10 при переменном симметрическом изгибе и постоянном кручении в зависимости от действующих напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца.

γ_n и φ_n как на фиг. 10.

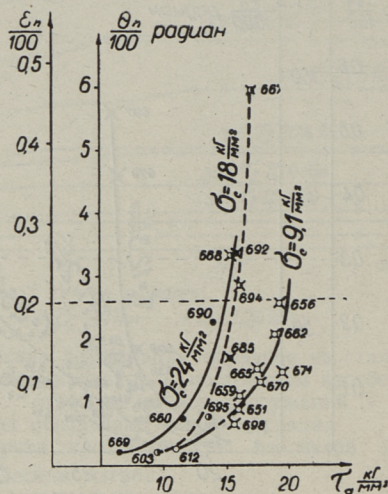
9. 1. Предел выносливости при симметричном переменном изгибе и постоянном кручении (фиг. 7)

1. Для стали 10 имеет место некоторое повышение предела выносливости при наложении невысоких касательных напряжений; при более высоких касательных напряжениях происходит уменьшение предела выносливости.

Такой же результат для мягких сталей получен в опытах Лие и Бэджина [10], причем авторы не объясняют причины такого явления. Савельев [14] относит эти результаты к ошибкам эксперимента.

Нам кажется, что имеющее место повышение предела выносливости является следствием упрочнения материала вследствие обнаруженных нами пластических деформаций.

Сталь 10 в нормализованном состоянии содержит больше склонной к упрочнению структурной составля-



Фиг. 13. Пластические деформации образцов из стали 10 при переменном симметрическом кручении и постоянном изгибе в зависимости от действующих напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца. θ_n и ϵ_n как на фиг. 11.

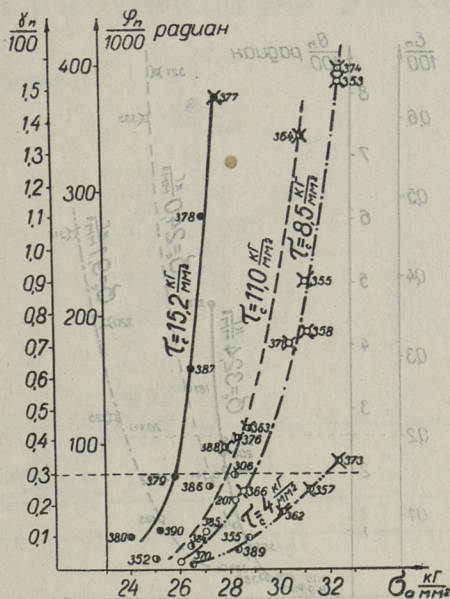
ющей — феррита, чем сталь 45, почему эффект упрочнения для этой стали оказывается резко выраженным.

2. Для стали 45 предел выносливости $(\sigma_1)\tau$ немного уменьшается от наложения постоянных касательных напряжений. Нами получено несколько большее уменьшение предела выносливости, чем в работе Савельева [14] для растяжения с кручением.

3. Для стали 40X также имеет место некоторое уменьшение предела выносливости при наложении постоянных касательных напряжений. Это уменьшение немного больше, чем для стали 45, что может объясняться как

результат отсутствия пластических деформаций в этой стали, вследствие чего нет и упрочнения.

Результаты для стали 40X близки к результатам работы Гафа [8], где исследовалась подобная сталь.



Фиг. 14. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном изгибе и постоянном кручении в зависимости от действующих напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца.

γ_n и φ_n как на фиг. 10.

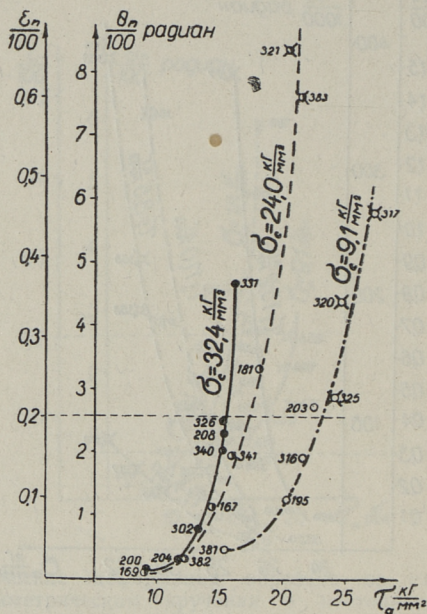
Опыты Дэвиса [9], дающие значительное уменьшение предела выносливости при наложении постоянных касательных напряжений, не подтверждаются нашими данными. Методика опытов Дэвиса не описывается в доступной нам литературе, почему интерпретация расхождения затруднительна.

4. Условия прочности для данного напряженного состояния достаточно точно описываются линейной зависимостью:

$$(\sigma_1)_\tau = \sigma_1 - a \tau_0,$$

где для обследованных сталей $a = 0,0-1,5$.

Аналогичные зависимости получают из эллиптических предельных условий Серенсена [1], если принять согласно тому же автору [7] $\Psi\tau = 0$, а также из условий Биргера [1] и Кудрявцева [3].



Фиг. 15. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе в зависимости от действующих напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца.
 θ_n и ϵ_n как на фиг. 11.

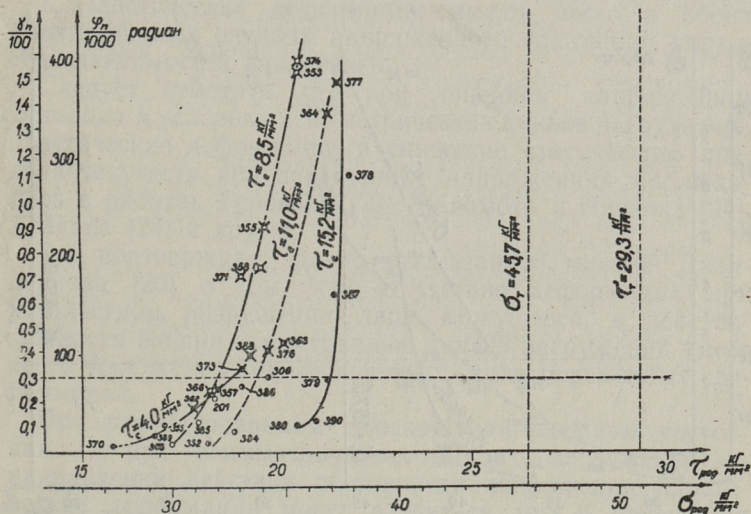
9. 2. Предел выносливости при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе (фиг. 8)

1. Для стали 10 происходит очень незначительное уменьшение предела выносливости (τ_{-1}) σ от добавления постоянных нормальных напряжений изгиба.

Результаты опытов по этой стали близки к результатам работы Шульман [11] для стали 15.

2. Для стали 45 предел выносливости (τ_1)_σ заметно уменьшается от наложения постоянных нормальных напряжений изгиба.

По стали 45 наши результаты близки к данным опытов Савельева [14]. Работа Шульман [11], для сталей 35 и



Фиг. 16. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном изгибе и постоянном кручении в зависимости от редуцированных напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца.
 τ_n и φ_n как на фиг. 11.

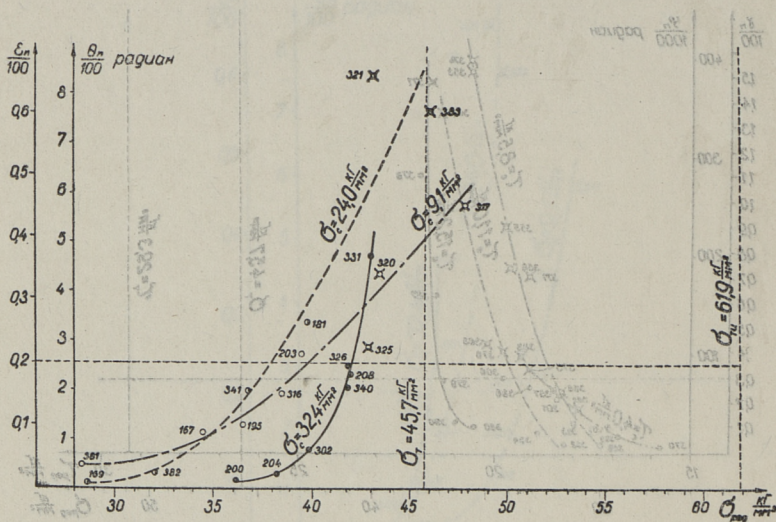
50, дает много меньшее снижение предела выносливости от наложения постоянных нормальных напряжений изгиба, что не подтверждается нашими опытами.

3. Меньшее понижение пределов выносливости стали 10 в сравнении со сталью 45 под действием постоянных нормальных напряжений объяснимо большей склонностью этой стали к упрочнению.

4. Результаты опытов по сталям 10 и 45 в обоих случаях напряженного состояния позволяют сделать вывод о большей эффективности действия постоянных нормальных напряжений на переменные касательные, чем постоянные

ных касательных напряжений на переменные нормальные.

5. Для стали 40X уменьшения пределов выносливости $(\tau_1)_\sigma$ под влиянием нормальных напряжений изгиба немного меньше, чем это имело место для переменного изгиба и постоянного кручения. Это является следствием



Фиг. 17. Пластические деформации образцов из стали 45 при переменном симметричном кручении и постоянном изгибе в зависимости от редуцированных напряжений.

Цифры при точках обозначают номер образца.

θ_n и ϵ_n как на фиг. 10.

того, что пределы выносливости для построения точек кривой этой стали определены на образцах, изготовленных из разных прутков материала, что несколько искажает результаты. В целом данные опытов близки к результатам работы Гафа [8].

6. Условия прочности для данного напряженного состояния также достаточно точно описываются линейной зависимостью:

$$(\tau_1)_\sigma = \tau_1 - v \sigma_\sigma,$$

где для обследованных сталей $v = 0,07 \div 0,18$.

Аналогичная зависимость (с другими численными значениями коэффициентов) лежит в основе условий прочности Биргера. [1].

9. 3. Пластические деформации образцов

1. Пластические деформации имеют место в обоих обследованных случаях напряженного состояния; характер зависимостей аналогичен.

Следует отметить, что при линейном напряженном состоянии в условиях асимметрических циклов нагружений, пластические деформации и снижение статического предела текучести при переменных напряжениях наблюдались в работах Герольда [23], Кавамото и Нисиоки [24], Асакава [25] и других.

Это подтверждает давно высказанное мнение Давиденкова [26] о том, что отсутствие деформаций при усталостном разрушении лишь кажущееся, в действительности же при симметричных циклах нагружений имеет место наложение многочисленных знакопеременных деформаций.

При рассматриваемом плоском напряженном состоянии (и при асимметрических циклах нагружений) в направлении действия постоянного напряжения пластические деформации могут развиваться, что и отмечается нашими опытами.

2. Пластические деформации увеличиваются с числом циклов нагружений; примерно между 10^6 — 3×10^6 циклами достигается предельное значение деформации и дальнейшее увеличение ее в результате упрочнения прекращается (фиг. 10 и 11).

3. Редуцированные условные напряжения по статическим условиям пластичности не определяют ни величины, ни момента наступления пластических деформаций. Для энергетических условий пластичности это ясно следует из фиг. 16 и 17, где не получается непрерывной кривой, что имело бы место, если редуцированные напряжения характеризовали бы величину пластической деформации.

4. В работах Кудрявцева, Одингга и Савельева [3], [4] и [14] для случаев совместного действия изгиба и кручения, а также растяжения и кручения *a priori* принимается, что если редуцированные напряжения по статическим теориям пластичности не превосходят предела текучести

σ_T , то пластических деформаций не происходит. Нами установлено, что они наступают при более низких напряжениях (фиг. 10—17).

5. Как показали соответствующие построения, главные условные касательные и нормальные напряжения также не характеризуют пластических деформаций в обследованных случаях.

6. Влияние переменных нормальных напряжений на предел текучести при кручении и влияние переменных касательных напряжений на предел текучести при изгибе значительно больше в стали 45, чем в стали 10 (фиг. 12, 13, 14 и 15).

7. Величина пластической деформации в обследованных случаях плоского напряженного состояния (после достижения предельной величины) является функцией действующих напряжений.

При симметричном переменном изгибе и постоянном кручении (фиг. 14), увеличение переменного напряжения σ_a вызывает большие пластические деформации закручивания, чем такое же увеличение постоянного напряжения τ_c .

Эффективность влияния напряжения σ_a возрастает с увеличением действующего напряжения τ_c .

При симметричном переменном кручении и постоянном изгибе (фиг. 15), увеличение переменного напряжения τ_a вызывает большие пластические деформации изгиба, чем такое же увеличение постоянного напряжения σ_c .

Эффективность влияния напряжения τ_a возрастает с увеличением действующего напряжения σ_c .

8. Поскольку использованные в данной работе условные напряжения не характеризуют величины пластических деформаций в рассмотренных случаях плоского напряженного состояния, то дальнейшим развитием работы должно явиться определение действительных напряжений с учетом имеющих место упруго-пластических деформаций образцов.

Л и т е р а т у р а

1. Биргер А. И. Сравнение условий усталостной прочности, «Вестник машиностроения» № 9, 1954.

2. Гольцев Д. И. Об условиях прочности при переменных нагрузках и сложном напряженном состоянии, «Вопросы динамики и динамической прочности», АН Латв. ССР. Вып. 1, 1953.

3. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении, Машгиз, 1951.

4. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов, Машгиз, 1947.

5. Петрусевиц А. И. Теории усталостной прочности при сложном напряженном состоянии, «Вестник машиностроения» № 7—8 и 9—10, 1944.

6. Серенсен С. В. Об условиях прочности при переменных нагрузках для плоского и объемного напряженного состояния, «Инженерный сборник», том 1, вып. 1, АН СССР, 1941.

7. Серенсен С. В. Расчет прочности, «Справочник машиностроения», том 3, 1955.

8. Gough, H. J., *Mech.*, M. I. Engineering Steels under Combined Cyclic and Static Stresses, «The Institution of Mechanical Engineers Proceedings» 1949, vol. 160, N 4.

9. Davies V. C. Discussion on Combined Alternating Stresses, «The Institution of Mechanical Engineers Proceedings» 1935, vol. 131.

10. Lea F. C. and Budgen H. P., Combined Torsional and Repeated Bending Stresses, «Engineering», Aug. 20, 1926.

11. Шульман Е. Г. Технический отчет з-да «Электросила», 1936. По книге И. А. Одинга — Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов, 1947.

12. Hohenemser K. und Prager W. Zur Frage der Ermüdungsfestigkeit bei mehrachsigen Spannungszuständen, «Metallwirtschaft», N 24, 1933.

13. Sawert W. Verhalten der Baustähle bei wechselnder mehrachsiger Beanspruchung, Zeitschrift d. VDI, Bd 87, N 39/40, 1943.

14. Савельев Л. И. Исследование предельных циклов плоского напряженного состояния. Диссертация, Московский авиационный институт, 1954.

15. Ужик Г. В. Прочность металлов и влияние концентрации напряжений при изгибе с кручением в условиях симметричных циклов переменных нагрузок, «Вестник машиностроения» № 7, 1951.

16. Ужик Г. В. Прочность металлов и влияние концентрации напряжений при изгибе с кручением в условиях несимметричных циклов переменных нагрузок, «Вестник машиностроения» № 4, 1954.

17. Трейер В. Н. О методике исследования и расчета долговечности машин и их деталей, «Труды Таллинского политехнического института», 1953.

18. Гарф М. Э. Динамическое исследование машины для испытания консольных образцов на усталость при изгибе, «Заводская лаборатория» № 1, 1953.

19. Тетельбаум И. М. «Журнал технической физики», VIII, 11, 1938.

20. Мазинг Ю. К. Исследование процесса усталостного разрушения углеродистой конструкционной стали методом непрерывного дефектоскопирования. Автореферат диссертации, Таллинский политехнический институт, 1955.

21. Кульдма Х. А. Исследование влияния частоты переменных перенапряжений на усталостную прочность сталей. Автореферат диссертации, Таллинский политехнический институт, 1954.

22. Митропольский А. К. О вычислении корреляционных уравнений при малом числе испытаний, Труды Лесотехнической академии им. С. М. Кирова, № 48, 1938.

23. Herold, W. Die Drehwechselfestigkeit verschiedener Stähle bei gleichzeitiger statischer Beanspruchung, «Maschinenbau-Betriebswirtschaft», Bd. 10, 1931.

24. Kavamoto M. and Nichioka K., Safe Stress Range for Deformation Due to Fatigue, «Transactions of the ASME», vol. 77, nr. 5, 1955.

25. Yukichi Asakava. Some Important Problems in the Study of Fatigue Testing (Some New Results on Actual Deflection Phenomena of Rotating Beam Test Piece in Fatigue Test by New Measurement), «Japan Inst. Metals», 1955, 19, N 2.

26. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов, ОНТИ, 1936.

Н. Н. Щеглов
ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ И ПЛАСТИЧЕС-
КИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ В НЕКО-
ТОРЫХ СЛУЧАЯХ СОВМЕСТНОГО ДЕЙ-
СТВИЯ ИЗГИБА И КРУЧЕНИЯ

Издательство
Таллинского
Политехнического Института

*

Редактор А. Круусамяги
Технический редактор А. Тамм
Корректор Г. Трапезонцев

Сдано в набор 10 VII 1957. Подписано к
печати 7 X 1957. Бумага 54×84, $\frac{1}{16}$. Печ-
чатных листов 2,25. По формату 60×92
печатных листов 1,85. Учетно-издатель-
ских листов 1,66. Тираж 800. МВ-05297.
Заказ № 1134.

Типография «Пунане Тяхт»
Таллин, ул. Пикк 54/58.

Цена 1 руб. 15 коп.

ENNU Tallinn Akadeemia
Keskraamatukogu



1 руб. 15 коп.