

В.В. Мыльников¹, Д.И. Шетулов¹, А.И. Пронин², Е.А. Чернышов¹

¹ Нижегородский государственный технический университет

² Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЧАСТОТЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Проблема прочности, долговечности и надежности промышленного оборудования и конструкций – одна из самых важных проблем современного машиностроения. В настоящее время имеется достаточно много монографий и публикаций по различным аспектам статической и усталостной прочности металлических материалов, однако в последние годы достигнут существенный прогресс в понимании и описании явления усталости металлов, который базируется:

- на глубоком исследовании природы и закономерностей накопления усталостных повреждений при различных режимах нагружения с учетом технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов;
- на разделении процесса усталости на периоды зарождения и распространения усталостных трещин, для описания которых используются разные подходы, в частности теории дислокаций и методы механики разрушения;
- на совершенствовании испытательного оборудования, использовании аппарата математической статистики и методов планирования эксперимента [1, 2].

Большинство деталей из конструкционных металлических материалов, используемых в машиностроении, агрегатостроении и авиастроении работают в условиях циклических знакопеременных нагрузок или напряжений. В качестве примеров можно привести противоположные по знаку напряжения, возникающие при вращении валов различных агрегатов и машин, при взлете и посадке самолета на рычаги шасси и многие другие. Опасность разрушения деталей машин при многократно повторяющейся нагрузке, наряду с которой решающее значение имеют различные факторы, особенно остро возникла в настоящее время, так как многократно увеличились скорости и частоты современной техники, появились новые материалы, что требует более достоверного определения прочности и долговечности конструкционных материалов уже на стадии проектирования. Многочисленные исследования по усталости металлов и сплавов не дают достаточной информации о природе и кинетике развития усталостного процесса. В настоящее время не удается предвидеть всех сложных физических явлений, происходящих в материале

деталей машин и конструкций. Задача, касающаяся изучения природы сопротивления усталости деталей оборудования и конструкций, весьма важная. Испытания натуральных деталей машин в заводских условиях в достаточном количестве в большинстве случаев являются дорогостоящими. Это связано со сложностью изготовления и применением трудоемких технологических и механических операций. Прежде чем изготовить и испытать какую-либо деталь, необходимо выявить (спрогнозировать), выдержит ли материал, из которого она планируется изготавливаться, необходимое количество циклов при максимальной заданной нагрузке. Одной из важнейших проблем в машиностроении является снижение затрат на производство и эксплуатацию машин. В комплексе мер, обеспечивающих решение этой проблемы, важная роль принадлежит разработке расчетного метода прогноза прочности и долговечности конструкционных материалов и деталей машин. Достоверность прогнозирования долговечности и прочности конструкционных металлических материалов в условиях циклического нагружения зависит от структурного состояния и влияния различных факторов, таких как природа материала, масштабный эффект, температура, частота и асимметрия циклического нагружения, концентрация напряжений и др. Факторы, как правило, снижают прочность и долговечность конструкционных материалов, деталей и элементов конструкций. В представленной работе произведена оценка влияния фактора частоты циклического нагружения (ω) на прочность и долговечность деталей шасси учебно-тренировочного самолета на основе данных испытаний материалов, опубликованных в работах [3, 4].

Цель данной работы заключается в разработке оценочных критериев влияния частоты циклов нагружения на прочность и долговечность конструкционных материалов и в обосновании их применимости для прогноза кривых усталости натуральных деталей машин и конструкций.

Влияние частоты циклического нагружения на показатели сопротивления материалов является сложным, что затрудняет получение закономерностей, позволяющих прогнозировать долговечность деталей с учетом ω . Представляется перспективным накопление статистических данных по повреждаемости поверхности (Φ) в виде широких полос скольжения и количественная

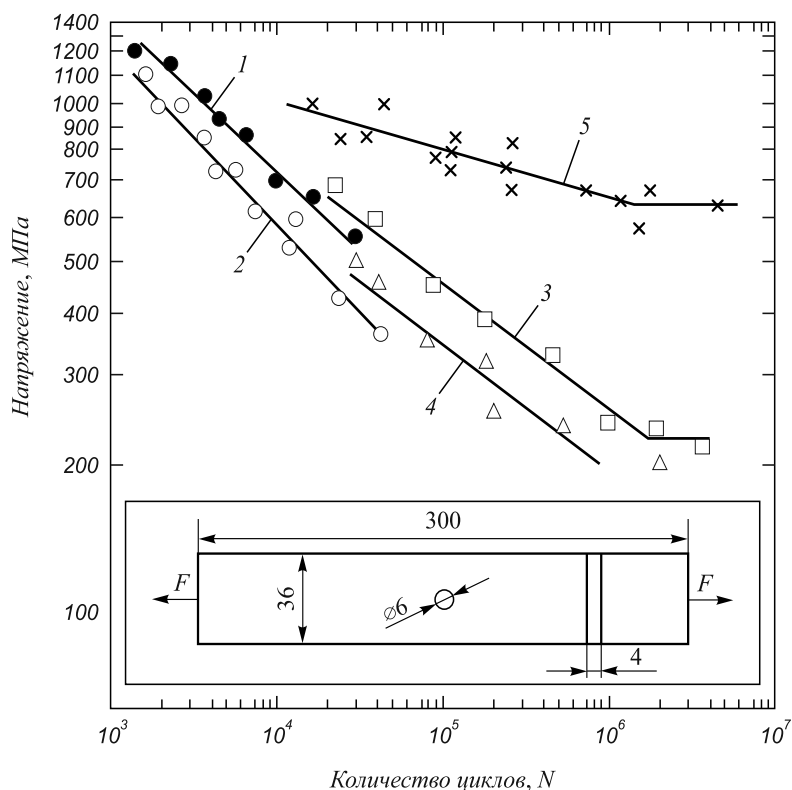
оценка Φ , а так же связь последней характеристики с показателем сопротивления усталости – тангенса угла наклона кривой усталости к оси количества циклов $\text{tg}\alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}$, где σ – циклическое напряжение; N – количество циклов.

Показатель повреждаемости поверхности представляется в виде выражения

$$\Phi = \frac{n_{3_2} n_{3_4} n_{п_2} F_M}{n_{3_1} n_{3_3} n_{п_1} F_{обр}}$$

где n_{3_1} – общее количество зерен на фотографии микроструктуры; n_{3_2} – количество поврежденных зерен; n_{3_3} – разница между количеством зерен неповрежденных и поврежденных по всей площади зерна; n_{3_4} – количество зерен, поврежденных широкими (более 6 мкм) полосами скольжения; $n_{п_1}$ – общее число полос скольжения в поврежденных зернах; $n_{п_2}$ – количество широких извилистых и прерывистых полос скольжения; F_M – фактическая площадь микроструктуры; $F_{обр}$ – площадь рабочей поверхности образца.

Параметры сопротивления усталости Φ и $\text{tg}\alpha_w$ определялись более чем на сорока чистых металлах и сплавах [3 – 5]. Были проведены исследования параметров сопротивления усталости плоских образцов размером 300×36×4 мм с центральным отверстием диаметром 6 мм из стали 30ХГСН2А ($\sigma_B = 1280 \pm 100$ и 1800 ± 100 МПа) осевым растяжением по пульсирующему циклу с частотой 0,17 и 40 Гц при различных уровнях максимальных напряжений в диапазоне от 0,14 до 0,5 от предела прочности. Результаты испытаний образцов на усталость представлены на рис. 1, откуда видно, что как при низкой частоте, равной 0,17 Гц, так и при 40 Гц характеристики сопротивления усталости стали 30ХГСН2А ($\sigma_B = 1800$ МПа) выше, чем у менее прочных образцов ($\sigma_B = 1280$ МПа). Предел выносливости образцов из стали 30ХГСН2А ($\sigma_B = 1280$ МПа) на базе 10^7 циклов равен 200 МПа. Увеличение частоты нагружения с 0,17 до 40 Гц оказывает более существенное влияние на показатели сопротивления усталости образцов из стали 30ХГСН2А с пределом прочности, равным 1800 ± 100 МПа, по сравнению с образцами, у которых $\sigma_B = 1280$ МПа (см. рис. 1). Увеличение частоты



- 1 – $\lg \sigma = 4,0779 - 0,3010 \lg N$; $K_{кор} = -0,9890$;
- 2 – $\lg \sigma = 3,9821 - 0,3010 \lg N$; $K_{кор} = -0,9795$;
- 3 – $\lg \sigma = 3,9239 - 0,2552 \lg N$; $K_{кор} = -0,9900$;
- 4 – $\lg \sigma = 3,7682 - 0,2466 \lg N$; $K_{кор} = -0,9834$;
- 5 – $\lg \sigma = 3,3432 - 0,08723 \lg N$; $K_{кор} = -0,8404$;

Рис. 1. Кривые усталости образцов из стали 30ХГСН2А при осевом растяжении по пульсирующему циклу при частоте циклов нагружения $\omega = 0,17$ Гц (1, 2) и 40 Гц (3, 4) и пределах прочности $\sigma_B = 1800$ (1, 3) и 1280 (2, 4) МПа, 5 – деформация поперечного изгиба плоских образцов сечением 3×3 мм, $\omega = 50$ Гц, закалка на категорию прочности $\sigma_B = 1500$ МПа

ты циклов нагружения и в дополнение к этому смягчение схемы напряженного состояния (деформация вращения изогнутого образца) приводят к заметному уменьшению наклона кривой усталости к оси N , т.е. к улучшению показателя сопротивления усталости ($\text{tg}\alpha_w$). Наклон $\text{tg}\alpha_w$ сильно уменьшился при испытании образцов малого сечения (3×3 мм), при этом вид испытания тоже другой (см. рис. 1, кривая 5). Улучшение показателя сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материала поверхностных слоев стали 30ХГСН2А, о чем свидетельствует относительно малая повреждаемость их поверхности. На рис. 2 видны широкие, извилистые и прерывистые полосы скольжения, но они довольно редки. Такое количество развитых полос скольжения не оказывает заметного влияния на величину повреждаемости поверхности (Φ), они лишь дают возможность рассмотреть детальнее процесс повреждения поверхности стали 30ХГСН2А. Исследование микроструктуры (см. рис. 2) показало, что на поверхности преобладают неразвитые полосы скольжения, а развитых значительно меньше, поэтому повреждаемость Φ в этом случае тоже малая.

Наклон $\text{tg}\alpha_w$ с изменением частоты меняется. При исследовании повреждаемости поверхности (Φ) экспериментальные параметры металлов и сплавов имеют значительный разброс (рис. 3) вследствие поверхностных эффектов материала. В работе [6] введено отношение $F_m/F_{обр}$, чтобы иметь малое значение Φ . В этом случае ошибки экспериментально расчетных параметров в значительной степени нивелируются по сравнению со случаем, когда значения Φ были бы большими. В ряде случаев частота циклов нагружения (ω) оказывает существенное влияние на показатели сопротивления усталости. Все испытанные материалы разделили на две группы, из которых первая показала увеличение параметра $\text{tg}\alpha_w$ с ростом частоты циклов нагружения, а вторая наоборот – уменьшение $\text{tg}\alpha_w$ с увеличением величины ω . Таким образом, в первом случае наблюдали

ухудшение сопротивления усталости с увеличением параметра ω , а во втором случае – его улучшение. Однако надо иметь в виду, что параметр $\text{tg}\alpha_w$ напрямую связан с повреждаемостью поверхности (Φ), и в обеих группах чистых металлов и сплавов рост показателя Φ приводит к увеличению $\text{tg}\alpha_w$ [7]. Сталь 30ХГСН2А относится ко второй группе материалов. Установлено, что у этой группы материалов увеличение частоты циклов нагружения и, в дополнение к этому, смягчение схемы напряженного состояния (деформация вращения изогнутого образца) приводят к заметному уменьшению параметра $\text{tg}\alpha_w$, т.е. к улучшению сопротивления усталости. Улучшение параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материала поверхностных слоев образцов (деталей), что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности.

Экспериментальные данные обрабатывались таким образом, что при $\omega = \text{const}$ определялись средние значения $\text{tg}\alpha_w$, затем строились зависимости $\text{tg}\alpha_w = f(\omega)$. Обработка на компьютере показала, что данные по первой группе укладываются напрямую, а по второй описываются некоторой кривой. Получены математические зависимости:

- по первой группе материалов

$$\text{tg}\alpha_w = 0,0356 \ln \omega + 0,065, \quad (1)$$

- по второй группе материалов

$$\text{tg}\alpha_w = 0,262 \omega^{-0,1301}. \quad (2)$$

На основе экспериментальных данных разработан метод прогноза усталостных свойств конструкционных материалов. Зная частоту циклов нагружения, по формулам (1) и (2) определяем показатель сопротивления усталости $\text{tg}\alpha_w$. В результате получаем два значения параметра $\text{tg}\alpha_w$ для первой и второй группы материалов. Используя значения $\text{tg}\alpha_w$, с рис. 4 снимаем

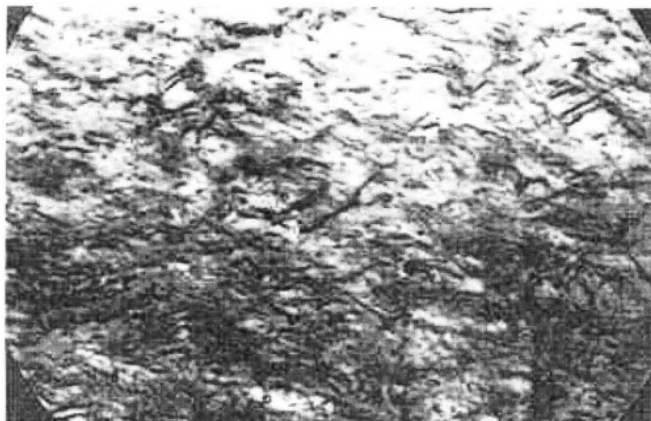


Рис. 2. Микроструктура стали 30ХГСН2А после испытания на усталость при 20 °С, $\times 400$:
 $\sigma = 1000$ МПа; $N = 1,5 \cdot 10^3$ циклов; $\omega = 3,33$ Гц.
 Деформация плоского изгиба образца сечением 3×3 мм

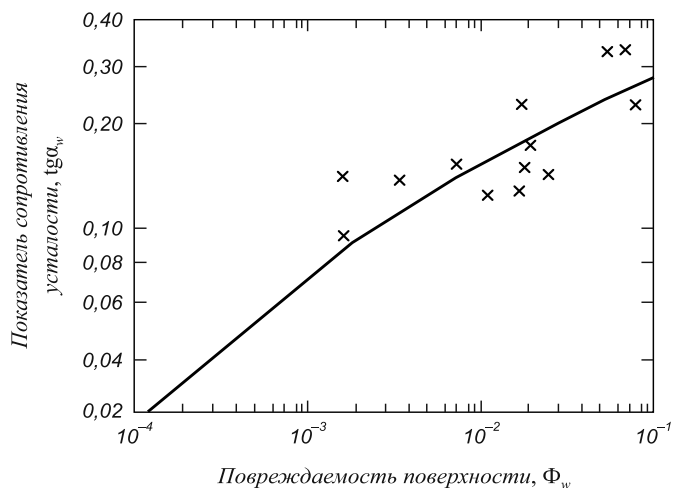


Рис. 3. Связь показателя сопротивления усталости $\text{tg}\alpha_w$ с повреждаемостью поверхности при изменении частоты циклов (Φ_ω)

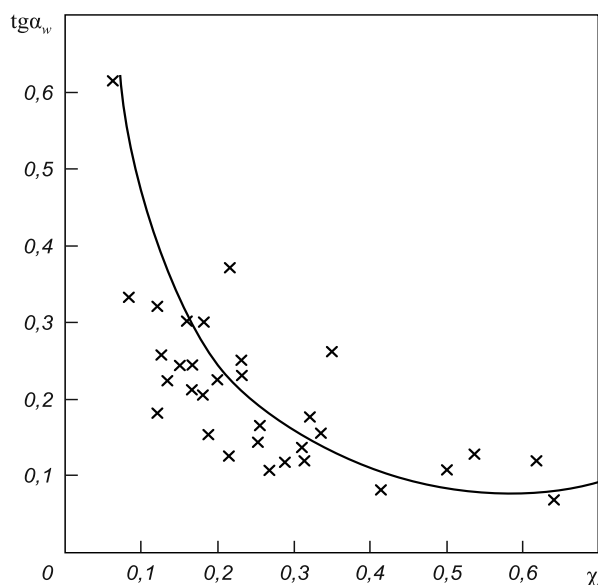


Рис. 4. Зависимость показателя сопротивления усталости ($tg\alpha_w$) от параметра χ

два значения параметра $\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_B}$, где $\sigma_{N=10^6}$ – предел усталости на базе 10^6 циклов. Данные на однократный разрыв образцов дают возможность знать предел прочности (σ_B) и уточнить показатели χ и $\sigma_{N=10^6}$. Используя данные рис. 5 ($tg\alpha_w$ и $\sigma_{N=10^6}$), можно построить левую ветвь прогнозируемой кривой усталости. В тех случаях, когда излом кривой усталости соответствует точке $\sigma_{N=10^6}$, можно построить всю кривую, проведя правый параллельный оси N участок. Можно найти точку излома прогнозируемой кривой усталости, воспользовавшись работой [8]. Таким образом, получаем экспресс-метод ускоренного построения кривой усталости образцов конструкционного материала, когда есть величина предела прочности (σ_B).

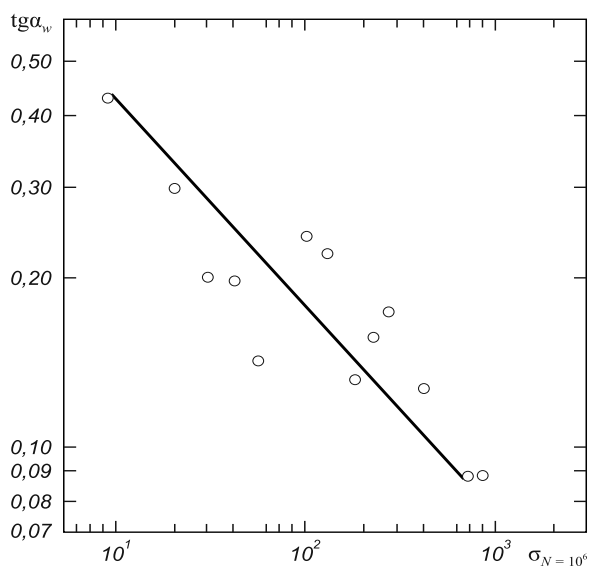


Рис. 5. Зависимость показателя сопротивления усталости ($tg\alpha_w$) от напряжения, соответствующего долговечности $N = 10^6$ циклов

Параметры $tg\alpha_w$, χ , σ_B имеют явную взаимосвязь, но наблюдается большой разброс экспериментальных данных. Это объясняется тем, что основой исследования являются поверхностные усталостные эффекты. Как известно, при усталостных испытаниях наблюдается большой разброс экспериментальных данных, особенно он большой, когда изучаются процессы повреждаемости поверхности материалов.

Известен метод прогнозирования параметров по повреждаемости поверхности материалов [9]. В этом случае используют дифференциальное уравнение вида

$$K_0 \frac{d^n tg\alpha_w}{d\Phi^n} + K_1 \frac{d^{(n-1)} tg\alpha_w}{d\Phi^{(n-1)}} + \dots + K_{(n-1)} \frac{d tg\alpha_w}{d\Phi} + K_n tg\alpha_w = 0,$$

где K_0, K_1, \dots, K_n – коэффициенты.

Корни уравнения обозначены как $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Зависимость $tg\alpha_w = f(\Phi)$ представляется в виде отдельных функций $tg\alpha_{w_1} = e^{\lambda_1 \Phi}$, $tg\alpha_{w_2} = e^{\lambda_2 \Phi}, \dots, tg\alpha_{w_n} = e^{\lambda_n \Phi}$. Решением представленного дифференциального уравнения является функция $tg\alpha_w = c_1 tg\alpha_{w_1} + c_2 tg\alpha_{w_2} + \dots + c_n tg\alpha_{w_n}$, где c_1, c_2, \dots, c_n – константы интегрирования.

После преобразований получим систему уравнений вида

$$c_1 tg\alpha_{w_1}^{(k)}(\Phi_0) + \dots + c_n tg\alpha_{w_n}^{(k)}(\Phi_0) = tg\alpha_w^{(k)},$$

$$\Phi_0 = 0, k = 0, 1, 2, \dots, n - 1.$$

Определитель этой системы уравнений имеет вид

$$\Delta_{он} = (\lambda_2 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_{n-1}).$$

Любой корень λ_i учитывает один из факторов, влияющий на параметры сопротивления усталости. Поскольку в данном случае исследуется влияние частоты (ω) циклов, то для определения λ_ω и $tg\alpha_{w_\omega}$, пользуясь рис. 3 и формулами (1) и (2), в частности λ_ω получается равной 0,295, $tg\alpha_{w_\omega}$ определяется в каждом конкретном случае отдельно. Далее, учитывая асимметрию нагружения, $\lambda_{ac} = 0,3351$ [9]. Для определения $tg\alpha_{w_{ac}}$ используем результаты исследований, приведенных в работах [8 – 10].

В самолетных конструкциях типа шасси детали должны иметь высокую категорию прочности. В связи с этим необходимо было выявить влияние фактора прочности или термообработки. Необходимо иметь для расчета λ_{σ_B} и $tg\alpha_{w_{\sigma_B}}$. Данные настоящего исследования дали возможность получить некоторую узкую область $tg\alpha_w = f(\Phi_{\sigma_B})$ и $tg\alpha_w = f(\sigma_B)$ (рис. 6). Было получено $\lambda_{\sigma_B} = 0,30103$, $tg\alpha_{w_{\sigma_B}}$ определяется по работам [5 – 10].

При прогнозировании параметров усталости рычага (рис. 7) учитывали три фактора: частоту и асимметрию цикла нагружения, а так же материал детали, т.е. термообработку на соответствующую категорию прочности (σ_B) [10]. Из анализа результатов следует, что

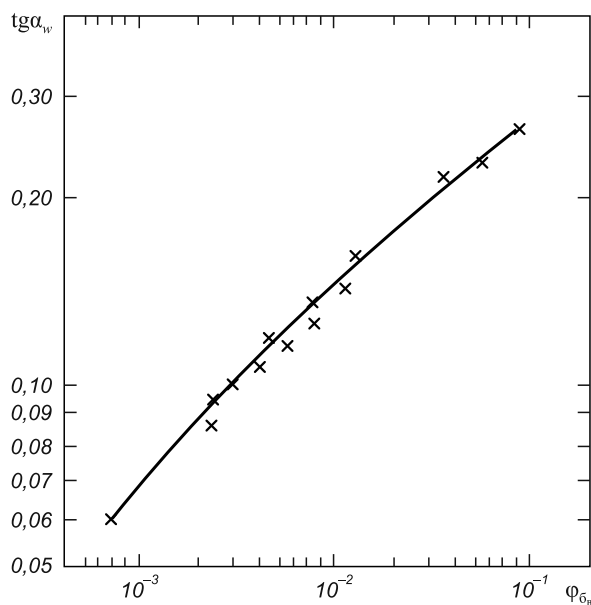


Рис. 6. Зависимость показателя сопротивления усталости ($tg\alpha_w$) от повреждаемости поверхности (Φ_{σ_n}) при изменении предела прочности

$$\lambda_{\omega} = 0,2950; \lambda_{ac} = 0,3351; \lambda_{\sigma_b} = 0,30103; \lambda_0 = 0,2426.$$

$$tg\alpha_{w_{11}}^{(k)} = c_1 tg\alpha_{w_{\omega}}^{(k)} + c_2 tg\alpha_{w_{ac}}^{(k)} + c_3 tg\alpha_{w_{\sigma_b}}^{(k)}.$$

В результате получена система трех уравнений, где c_1 , c_2 и c_3 – константы интегрирования, которые можно вычислить через определитель вида

$$\Delta_{оп} = \prod_{j>i} (\lambda_j - \lambda_i) = (\lambda_{ac} - \lambda_{\omega})(\lambda_{\sigma_b} - \lambda_{\omega})(\lambda_{\sigma_b} - \lambda_{ac}),$$

и $\Delta_{оп_i}$ получается путем замены λ_i на λ_0 , $c_i = \frac{\Delta_{оп_i}}{\Delta_{оп}}$.

Подставляя числовые значения, получаем $\Delta_{оп} = -8,238 \cdot 10^{-6}$; $\Delta_{оп_1} = -184,14 \cdot 10^{-6}$; $\Delta_{оп_2} = -18,462 \cdot 10^{-6}$; $\Delta_{оп_3} = -194,364 \cdot 10^{-6}$ и $c_1 = 22,35251275$; $c_2 = 2,241077932$; $c_3 = -23,59359068$. Сложив $c_1 + c_2 + c_3$, получаем еди-

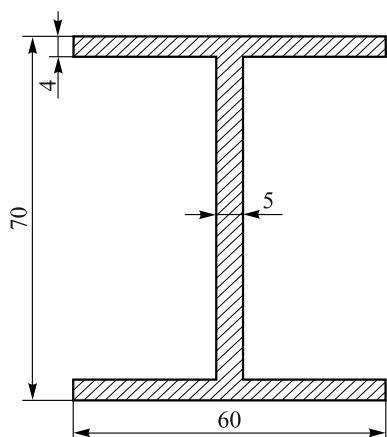


Рис. 8. Эскиз звена подкоса шасси самолета. Частота циклов $\omega = 0,6$ Гц; сталь 30ХГСН2А; $\sigma_b = 1700$ МПа. Сечение подвергнуто деформации растяжения-сжатия

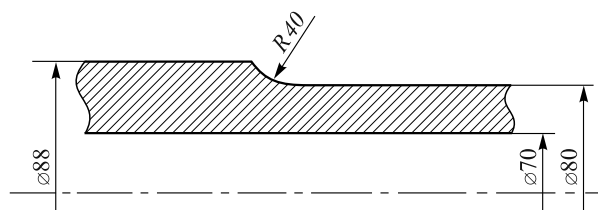


Рис. 7. Фрагмент рычага шасси самолета. Материал сталь 30ХГСН2А; $\sigma_b = 1700$ МПа. Цикл нагружения пульсирующий, $\sigma_m = 500$ МПа; частота циклов $\omega = 0,17$ Гц. Деталь подвергнута деформации изгиба

ницу, что свидетельствует о правильности вычислений.

Выражение для прогнозируемого наклона кривой усталости рычага шасси самолета (см. рис. 7) имеет вид

$$tg\alpha_{w_{11}} = 22,35251275 tg\alpha_{w_{\omega}} + 2,241077932 tg\alpha_{w_{ac}} - 23,59359068 tg\alpha_{w_{\sigma_b}}.$$

Определим факторные значения наклонов $tg\alpha_{w_{\omega}}$, $tg\alpha_{w_{ac}}$, $tg\alpha_{w_{\sigma_b}}$. По рис. 3 $tg\alpha_{w_{\omega}} = 0,33$ и по работам [5 – 10]: $tg\alpha_{w_{ac}} = 0,3$ и $tg\alpha_{w_{\sigma_b}} = 0,325$. Тогда прогнозируемое значение наклона кривой усталости детали $tg\alpha_{w_{11}} = 0,3807$. Далее надо определить предел усталости на базе 10^6 циклов детали по формуле

$$\sigma_{-1} = A \frac{(tg\alpha_{w_{11}})^2 + 1}{tg\alpha_{w_{11}}}.$$

Коэффициент с размерностью напряжений A составляет 62 МПа, поскольку сталь 30ХГСН2А высокопрочная. После подстановки значений получаем $\sigma_{-1} = 186,46$ МПа. Наносим кривую усталости на рис. 9.

Спрогнозируем кривую усталости детали, представленной на рис. 8. Поскольку звено подкоса шасси изготавливается из той же стали с тем же пределом прочности, то уравнение для прогнозируемого наклона $tg\alpha_{w_{11}}$ будет аналогичным. Аналогично получаем факторные значения $tg\alpha_{w_i}$: $tg\alpha_{w_{\omega}} = 0,33$; $tg\alpha_{w_{ac}} = 0,3$ и $tg\alpha_{w_{\sigma_b}} = 0,325$. Прогнозируемое значение наклона кривой усталости $tg\alpha_{w_{11}} = 0,4255$ и при том же значении коэффициента A , $\sigma_{-1} = 172$ МПа. Кривая усталости представлена на рис. 9.

Ассиметричный цикл нагружения звена подкоса шасси самолета

y_{max} , МПа	y_{min} , МПа	y_m , МПа	Число нагружений
2170	-740	715	200
1252	506	879	1200
8946	-7187	879,5	200

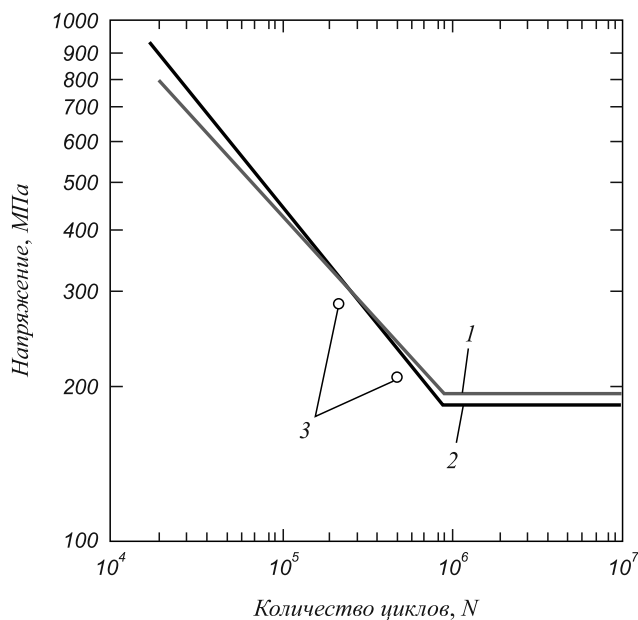


Рис. 9. Прогнозируемые кривые усталости натуральных деталей шасси самолета:
1 — рычаг; 2 — звено подкоса; 3 — результаты стендовых испытаний деталей

Выводы. В представленной работе обоснована применимость новых характеристик поверхностных эффектов для прогноза прочности и долговечности деталей машин и конструкций. Построены прогнозируемые кривые усталости натуральных деталей шасси самолета. Результаты стендовых испытаний натуральных деталей (3) расположены очень близко к прогнозируемым (1), (2) (см. рис. 9), что свидетельствует о высокой точности разработанного метода прогноза прочности и долго-

вечности конструкционных материалов с учетом частоты циклического нагружения. Таким образом, можно спрогнозировать прочность и долговечность других ответственных, сложных в изготовлении и дорогостоящих деталей современных машин и агрегатов, подверженных циклическим нагрузкам и тем самым значительно сократить время и стоимость их производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. — М.: Интермет инжиниринг, 2002. — 288 с.
2. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений. Пер. с англ. / Под ред. Л.Р. Ботвиной. — М.: Техносфера, 2010. — 416 с.
3. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 2. С. 33 – 36.
4. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2010. № 3. С. 40 – 45.
5. Шетулов Д.И., Муравьев С.Н., Андреев В.В. Оценка повреждаемости поверхности высокопрочных материалов при циклических нагрузках // Материаловедение и высокотемпературные технологии: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 1. — Н.Новгород: НГТУ, 1999. С. 94 – 99.
6. Шетулов Д.И. // Изв. АН. Металлы. 1991. № 5. С. 160.
7. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Чернышов Е.А. // Технология металлов. 2010. № 2. С. 19 – 22.
8. Шетулов Д.И., Андреев В.В. // Изв. АН. Металлы. 1998. № 3. С. 55.
9. Шетулов Д.И., Андреев В.В. // Изв. АИИ РФ. № 1. 2001. С. 426 – 435.
10. Мыльников В.В. Прогнозирование кривой усталости рычага взлетно-посадочного устройства самолета: // Тр. VIII междунар. молод. научно-техн. конф. «Будущее технической науки», — Н.Новгород. НГТУ. 2009. С. 234–235.

© 2012 г. В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов,
А.И. Пронин, Е.А. Чернышов
Поступила 25 июня 2012 г.