

Estimation of Metallic Structure Durability for a Known Law of Stress Variation

Расчет долговечности металлической конструкции при известном законе изменения уровня напряжений

Миронов^{1,2} В.И., Огорелков² Д.А., Лукашук² О.А.

1 – Институт машиноведения УрО РАН

2 – Уральский федеральный университет

Перегрузки машин в переходных режимах работы приводят к появлению в несущей металлоконструкции напряжений значительно выше предела выносливости. Расчет на основе линейного суммирования усталостных повреждений дает прогноз не в запас долговечности. В статье приводится альтернативный способ расчета с учетом циклической деградации материала. Исследуются свободные затухающие колебания пролетной балки мостового крана при известном логарифмическом декременте. Показано, что учет циклической деградации материала конструкции значительно снижает расчетную долговечность изделия.

Ключевые слова: усталость, колебания, деградация, металлическая конструкция, долговечность

В процессе эксплуатации многих транспортных машин неизбежны относительно редкие перегрузки металлических конструкций. При малом суммарном числе их наличие в спектре многоциклового нагружения не учитывается. Основанием для этого служит малый вклад в поврежденность при линейном суммировании усталостных повреждений. С другой стороны, появление напряжений выше предела усталости инициирует повреждающее действие напряжений низкого уровня.

Пиковая перегрузка вызывает некоторое число свободных затухающих колебаний конструкции в соответствии с ее демпфирующими свойствами. Если σ_0 суть амплитуда максимального приведенного напряжения в потенциально опасной точке конструкции при перегрузке, то возникающие колебания описываются известным законом [1]

$$\sigma = \sigma_0 e^{-rt} \quad (1)$$

где γ – коэффициент затухания колебаний, прямо связанный с логарифмическим декрементом $\delta = T\gamma$, T – период колебаний. Сведения о декременте колебаний приводятся в справочной литературе, получаются расчетным путем или по экспериментальной виброграмме [1-3].

В работе проводится сравнительный анализ расчетов долговечности металлической конструкции при действии пиковых перегрузок по двум методикам. В первом случае по линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений. Во втором случае по авторской методике с учетом циклической деградации свойств материала, апробированной в расчетах ряда металлических конструкций [4,5]. В данных работах рассматривался случай блочного нагружения. Ниже рассмотрен случай изменения напряжений от цикла к циклу по известному закону затухающих свободных колебаний. В расчет принимались напряжения выше ограниченного предела выносливости σ_R .

Долговечность конструкции при линейном суммировании усталостных повреждений.

Типичный блок циклов напряжений при однократной пиковой перегрузке приведен на рис.1. В эксплуатации пиковые перегрузки могут иметь различную природу и, как следствие, различные значения величин σ_0 и σ_R . Но поскольку проводится сравнение двух методик при прочих равных условиях, то данные величины полагались постоянными. График изменения напряжений, приведенный на рис.1, реализуется, например, в пролетной балке при наезде мостового крана на буферное устройство.

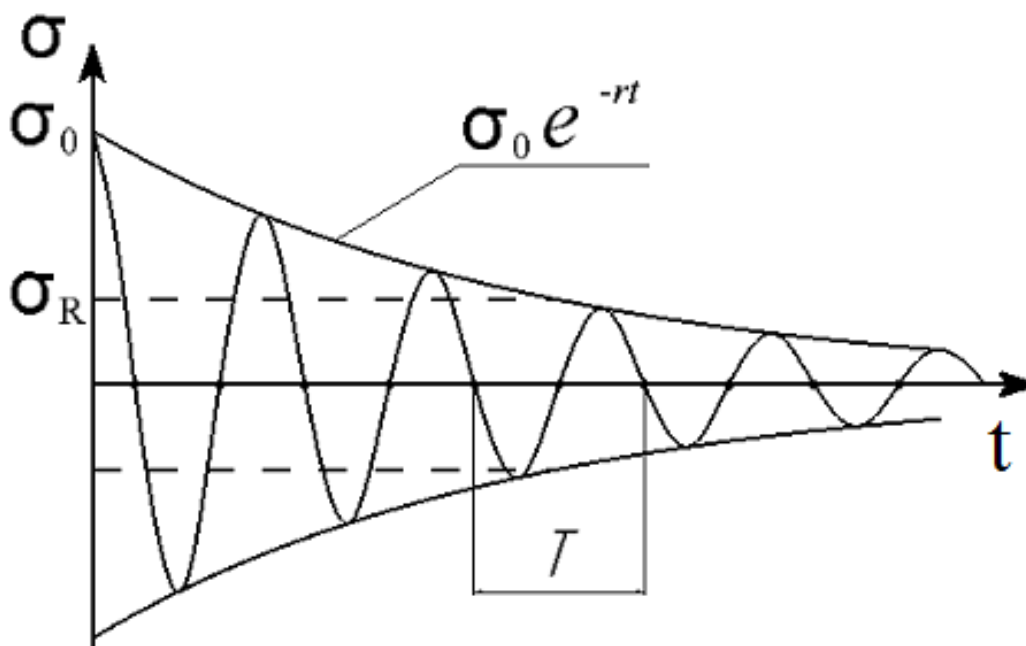


Рис. 1 Свободные колебания конструкции

Усталостная кривая принималась в обычном виде

$$\sigma_R^\alpha N_B = \sigma_i^\alpha N_i \quad (2)$$

где N_B – базовая долговечность, α – константа материала конструкции, σ_i – амплитуда напряжений i -го цикла в блоке, N_i – соответствующая долговечность по усталостной кривой. Согласно выражению (1) имеем

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-rTi} = \sigma_0 e^{-\delta i} \quad (3)$$

$$N_i = N_B \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_0 e^{-\delta i}} \right)^\alpha \quad (4)$$

Усталостная поврежденность от действия напряжений одного блока по линейной гипотезе определится выражением

$$\omega_B = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_B \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_0 e^{-\delta i}} \right)^\alpha} \quad (5)$$

где число циклов k с учетом выражения (3) определяется из условия

$$\sigma_k = \sigma_0 e^{-rkT} = \sigma_R,$$

Откуда число циклов в блоке

$$k = -\frac{1}{\delta} \ln \frac{\sigma_R}{\sigma_0} \quad (6)$$

В числовом примере значение k , полученное по формуле (6), округлялось в большую сторону до ближайшего целого числа.

Далее рассчитывается долговечность конструкции в блоках ω_B^{-1} и в числах циклов до разрушения

$$N_{LG} = \omega_B^{-1} k \quad (7)$$

К расчету долговечности конструкции с учетом циклической деградации прочностных свойств материала.

Прогноз долговечности изделий на основе линейной гипотезы (5) часто существенно отличается от эксперимента. Особенно при наличии в спектре нагружения редких перегрузок. Поэтому нужны новые подходы к описанию усталостного процесса в конструкционных материалах. Предлагаемый феноменологический подход основан на исследовании взаимосвязи статических и циклических свойств структурно неоднородных материалов. Например, в испытаниях на растяжение однократных образцов, изготовленных из литых вагонных сталей, с ростом наработки наблюдается последовательное снижение пластичности и прочности [4]. Данный процесс

ассоциируется с усталостным процессом, а соответствующие кинетические кривые включаются в модель циклической деградации материала [5].

В силовом подходе контролирующим параметром процесса выбирается предел прочности материала $S_B(\sigma_M; n)$, который становится функцией максимального напряжения стационарного цикла σ_M и числа циклов тренировки. Из условия лучшей аппроксимации опытных данных выбрана показательная функция

$$S_B(\sigma_M; n) = S_{B0} - k_\sigma n^m, \quad (8)$$

где выражение $k_\sigma n^m$ выбрано в форме повреждающей функции Кортена-Долана, имеющей экспериментальное подтверждение. Тогда k_σ определяется из условия разрушения

$$S_B(\sigma_M; N_M) = \sigma_M, \quad (9)$$

имеющего смысл критерия усталостного разрушения при стационарном нагружении, и функция (8) принимает вид

$$S_B(\sigma_M; n) = S_{B0} - \frac{S_{B0} - \sigma_M}{N_M^m} n^m, \quad (10)$$

где N_M – долговечность по диаграмме Веллера, m – экспериментальная константа материала.

В общем случае функция (10) нелинейная, что исключает перегруппировку циклов напряжений, допускаемую линейной гипотезой (5). Повреждающее действие цикла напряжений может быть существенно различным в зависимости от места в общем спектре. Приведем схему расчета долговечности при переменном уровне напряжений (рис.2).

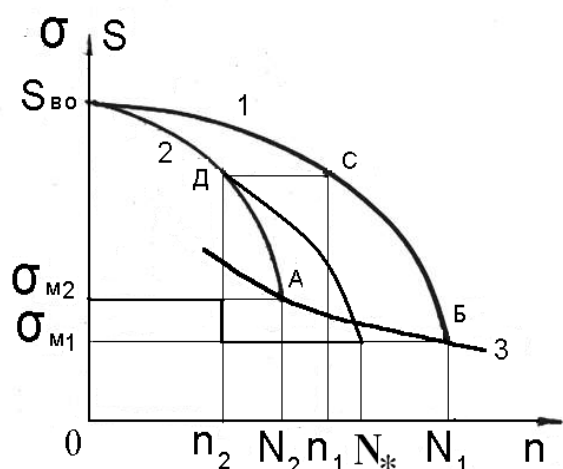


Рис.2 Долговечность при одной смене уровня циклических напряжений

уровне напряжений σ_{M1} определится из очевидного равенства $S_B(\sigma_{M2}, n_2) = S_B(\sigma_{M1}, n_1)$. С учетом выражения (10) имеем

Опытные кривые 1 и 2 на рис.2 отражают снижение предела прочности с ростом наработки. Линия 3 есть кривая Веллера. При циклировании на уровне напряжений σ_{M2} в течение n_2 циклов материал переходит в состояние Д. Полагаем эквивалентными два циклических состояния материала Д и С, полученные при разной истории нагружения. Тогда эквивалентное число циклов $n_3 = n_1$ на

$$n_{\text{Э}} = n_2 \frac{N_{M1}}{N_{M2}} \left(\frac{S_{B0} - \sigma_{M2}}{S_{B0} - \sigma_{M1}} \right)^{1/m} \quad (11)$$

Далее циклирование идет на уровне напряжений σ_{M1} и сопротивление снижается по пути СБ в соответствии с формулой (10). После некоторого числа циклов Δn_1 текущее значение предела прочности определится выражением

$$S(\sigma_{M1}, n_{\text{Э}} + \Delta n_1) = S_{B0} - \frac{S_{B0} - \sigma_{M1}}{N_{M1}^m} (n_{\text{Э}} + \Delta n_1)^m \quad (12)$$

В примере, представленном на рис.2, долговечность N_* при одной смене напряжений вычисляется следующим образом. В силу непрерывности процесса отрезок СБ переносится влево на число циклов, определяемых отрезком ДС. Для результирующей долговечности N_* имеем

$$N_* = N_1 + n_2 \left[1 - \frac{N_1}{N_2} \left(\frac{S_{B0} - \sigma_{M2}}{S_{B0} - \sigma_{M1}} \right)^{1/m} \right],$$

что отличается от линейного суммирования множителем в круглых скобках, который отражает эффект взаимодействия напряжений разного уровня.

В случае изменения максимальных напряжений цикла по закону (1) происходит многократная смена напряжений при $\Delta n = 1$. Для определения долговечности металлоконструкции разработан алгоритм вычисления текущего сопротивления. Критерий усталостного разрушения (9) обобщен на случай произвольного числа смен уровня напряжений. Схема алгоритма на основе формул (11,12) приведена на рис.3.

В приведенном алгоритме параметры цикла напряжений, с которого осуществляется переход на новый уровень, идентифицированы как «старые» с добавлением в индексы сочетание букв ST. Алгоритм реализован в рабочей программе на языке Python.

Числовой пример расчета долговечности пролетной балки мостового крана от перегрузки при торможении.

Параметры пролетной балки мостового крана грузоподъемностью 20т найдены в типовом расчете на прочность и жесткость [6]. Нагрузки при торможении найдены с использованием динамической модели движения балки с тележкой и грузом. Максимальные нормальные напряжения в балке при остановке крана $\sigma_0 = 120$ МПа. Предел прочности материала конструкции $S_{B0} = 470$ МПа. Ограниченный предел выносливости при наличии сварных швов $\sigma_R = 50$ МПа на базовой долговечности

$N_B = 2 \cdot 10^6$ циклов, а логарифмический декремент колебаний металлоконструкции крана принят $\delta = 0,1$ [3]. Показатель усталостной кривой для стали СтЗсп5 $\alpha = 5,34$ [7].

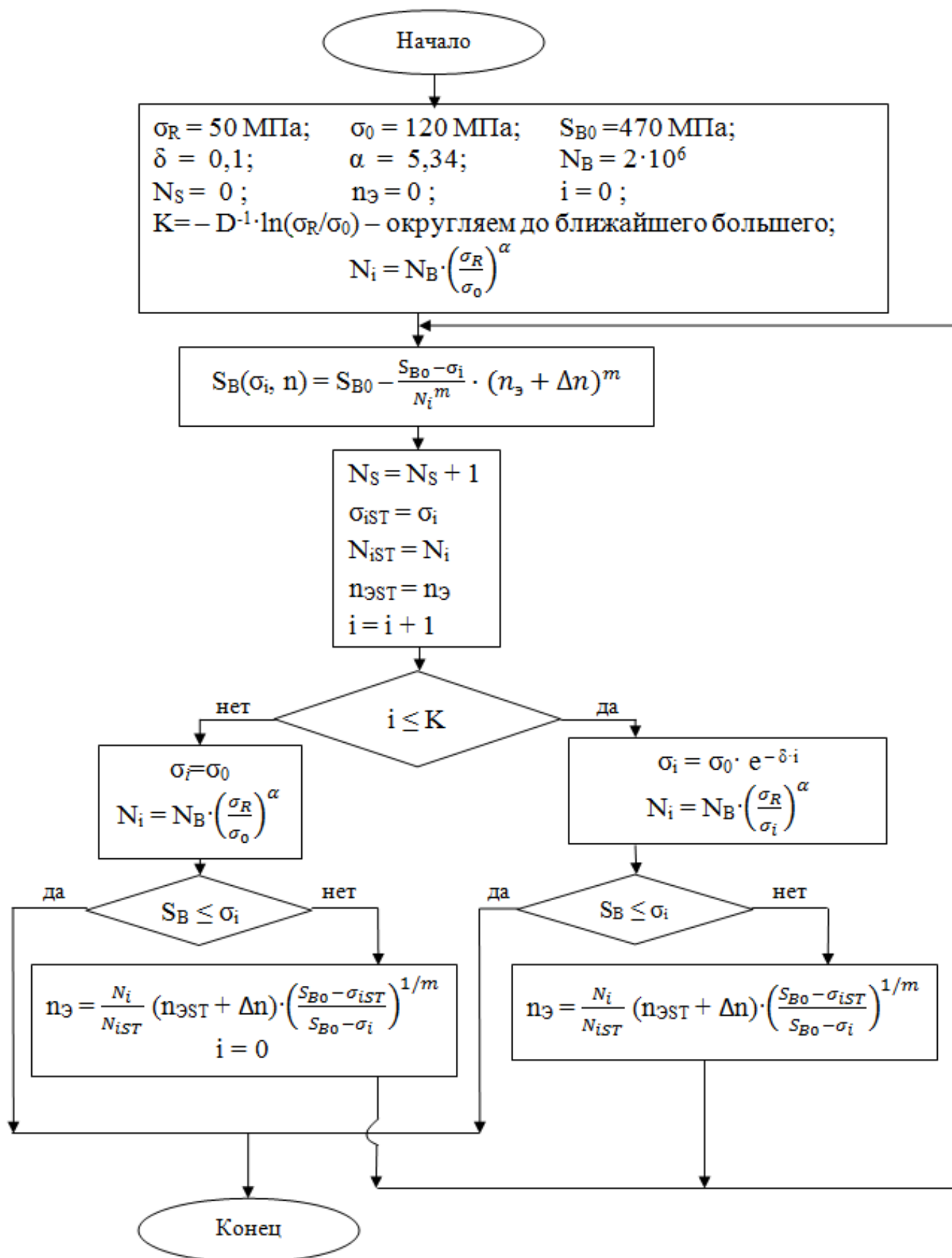


Рис. 3 Схема алгоритма на основе формул (11,12)

Результаты расчетов с учетом деградации материала при разных значениях показателя m приведены на рис.4. При наличии в спектре нагрузок пиковых перегрузок расчетная долговечность существенно ниже, чем при линейном суммировании повреждений. Данный результат качественно согласуется с известными экспериментальными данными [8,9].

Значение показателя степени кинетической кривой (8) для исследованных материалов близко к двум [9]. При $m=2$ прогнозируемое число циклов до появления усталостной трещины в балке (рис.4) составляет 76060 циклов. Число блоков, отвечающее числу торможений крана, до появления усталостной трещины составляет 7606. При использовании линейной гипотезы прогнозируемое число торможений на 70% больше и составляет 13063.

Следует отметить, что в рассмотренном примере долговечность слабо зависит от вида кривой деградации прочности материала в опасной точке конструкции. В отличие от текущего значения прочности, которое при одном и том же значении циклов нагружения может отличаться в разы. Опасность редких пиковых перегрузок возрастает с уменьшением показателя m кинетической кривой материала.

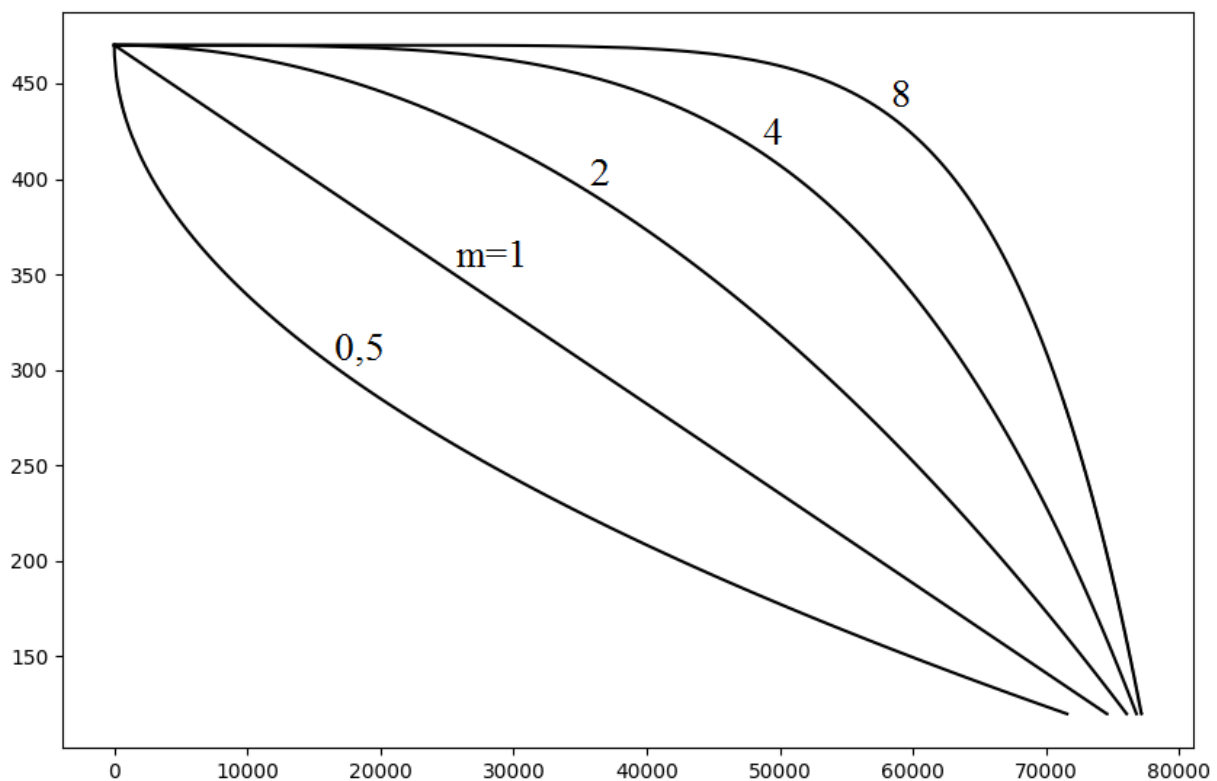


Рис. 4 Снижение прочности в опасной точке металлоконструкции при разных значениях константы материала m в формуле (10)

Резюме. При пиковой перегрузке от торможения моста метод функций сопротивления дает консервативный прогноз долговечности балки по сравнению с

линейным суммированием. Теоретически совпадение с линейным прогнозом возможно при бесконечно большом значении показателя степени кинетической кривой. То есть в том случае, когда свойства материала не меняются вплоть до образования усталостной трещины. В этом кроется, на наш взгляд, определенный физический смысл линейного суммирования. Используя текущее число циклов в качестве вещественной переменной, можно провести поцикловый численный расчет снижения прочности материала. Полученные результаты позволяют перейти к практически важному случаю нагружения с переменными от цикла к циклу амплитудой и коэффициентом асимметрии.

Литература:

1. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука. 1975. 704с.
2. Миронов В.И., Огорелков Д.А., Осипов В.И., Полежаев Н.И. Об одном способе конструкционного демпфирования / Сб. трудов 15 международной научно-технической конференции «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». Екатеринбург: УГГУ. 2017. С.324-326.
3. Строительная механика и металлические конструкции машин: С.А.Соколов.- СПб: Политехника. 2011. 450с.
4. Емельянов И.Г., Миронов В.И. Долговечность оболочечных конструкций. Екатеринбург: Изд. УрО РАН. 2012. 224с. ISBN 978-5-7691-2322-1
5. Mironov V.I., Lukashuk O.A., Yakushev A.V., Kozhushko G.G. Cyclic degradation of material in vehicle components // Russian Engineering Research, Volume 32, Numbers 5-6 (2012), 417-422.
6. Расчет и проектирование металлических конструкций мостовых кранов: учебное пособие / В.Е.Дусье, Ю.В.Наварский, В.П.Жегульский. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 133с.
7. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Ч.1. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 510 с.
8. Усталость и выносливость металлов. Под ред. Г.В. Ужика: Сб. Статей. - М.: Изд. Иностран. Лит. 1963. 497с.
9. Емельянов И.Г., Миронов В.И. Долговечность оболочечных конструкций. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2012. 217с.