

чески к пропорциональному росту усилий сопротивления ходу штока поршня. При увеличении вязкости жидкости более 2000 сСт возможно блокирование подвески.

Управление характеристиками амортизатора осуществляется электронным блоком управления, получающим данные от датчиков ускорений, расположенных на элементах подвески и кузове автомобиля. Так как серьезное влияние на вязкость жидкости оказывает нагрев рабочей жидкости, то рациональным является введение в конструкцию амортизатора датчика температуры ферромагнитной жидкости, позволяющего корректировать температурные изменения вязкости непосредственно в процессе движения.

Применение амортизатора с ферромагнитной жидкостью позволяет также существенно упростить конструкцию подвески, отказавшись от стабилизатора поперечной устойчивости, так как возможно независимое изменение характеристик амортизаторов

любых колес. Индивидуальное управление амортизаторами позволит улучшить и управляемость автомобиля.

Библиографические ссылки

1. Платонов В. Ф. Полноприводные автомобили. – М. : Машиностроение, 1989. – 312 с. : ил.
2. Певзнер Я. М., Горелик А. М. Пневматические и гидropневматические подвески. – М. : Машгиз, 1963. – 320 с. : ил.
3. Такетоми С., Такадзуми С. Магнитные жидкости. – М. : Мир, 1993. – 272 с. : ил.
4. Фертман В. Е. Магнитные жидкости : справочное пособие. – Минск : Вышэйш. шк., 1988. – 184 с. : ил.
5. Дербаремдикер А. Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. – М. : Машиностроение, 1969. – 236 с. : ил.
6. Кубич В. И., Ядчишин Ю. В. К вопросу построения характеристики амортизатора с магнитореологической жидкостью // Вестник КДПУ имени Михаила Остроградского. – Вып. 4/2009 (57). – Ч. 2.

V. A. Dyunov, PhD in Engineering, Perm Military Institute of Russian Interior Ministry Troops

S. N. Kazantsev, Perm Military Institute of Russian Interior Ministry Troops

A. D. Prodanov, Student, Perm Military Institute of Russian Interior Ministry Troops

Ya. E. Alksne, Student, Perm Military Institute of Russian Interior Ministry Troops

Controllable Suspension with Magnetorheological Shock-Absorber

Possibilities of controlling the suspension characteristics by installing the shock absorber with magnetorheological fluids are described.

Key words: vehicle, suspension, cornering stability, smoothness, shock-absorber.

УДК 539.374: 620.178.3

В. И. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. В. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Предложен метод оценки малоцикловой долговечности элементов конструкций, когда в качестве физического критерия прочности выбрана удельная энергия упругопластической деформации как интегральная характеристика напряженно-деформированного состояния (НДС).

Ключевые слова: образец, элемент конструкции, концентрация и градиент энергии, критерий подобия.

Применительно к многоцикловой усталости энергетические критерии прочности детально исследованы в ряде работ [1–12].

Вместе с тем для малоцикловой области, имеющей ряд особенностей, энергетические критерии прочности в целом и, в частности, применительно к зонам конструктивной концентрации изучены недостаточно. В связи с этим в данной работе предложен метод прогнозирования малоцикловой долговечности элементов конструкций при энергетической трактовке разрушения.

На основе исследований [13, 14] за критерий малоцикловой усталости принята амплитуда удельной потенциальной энергии упругопластического деформирования. Анализ результатов малоцикловых испытаний гладких образцов показал [13, 15], что для сталей после непродолжительной стадии циклического упрочнения или разупрочнения наступает длительный период стабилизации. При этом стабилизированная диаграмма малоциклового упругопластического деформирования в действительных координатах $\sigma - \epsilon$ хорошо описывается зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + C_p \left(\frac{\sigma}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где E , C_σ , C_p , m – параметры материала, которые определяются таким образом, чтобы соотношение (1) описывало не только зависимость между амплитудами деформаций и напряжений, но и форму петли гистерезиса.

При такой аппроксимации стабилизированной диаграммы малоциклового деформирования амплитуда удельной энергии упругопластической деформации u для гладкого образца равна

$$u = u_e + u_p, \quad u_e = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad u_p = \frac{C_\sigma C_p}{1+m} \left(\frac{\sigma}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}+1}, \quad (2)$$

где u_e , u_p – упругая и пластическая составляющие амплитуды удельной энергии. Аналогичным образом можно представить амплитуды номинальных, местных деформаций и удельных энергий в опасной области надреза элемента конструкции [14]:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E} + C_p \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad \varepsilon_M = \frac{\sigma_M}{E} + C_p \left(\frac{\sigma_M}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad (3)$$

$$u_n = u_{ne} + u_{np}, \quad u_{ne} = \frac{\sigma_n^2}{2E}, \quad u_{np} = \frac{C_\sigma C_p}{1+m} \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}+1}; \quad (4)$$

$$u_M = u_{Me} + u_{Mp}, \quad u_{Me} = \frac{\sigma_M^2}{2E}, \quad u_{Mp} = \frac{C_\sigma C_p}{1+m} \left(\frac{\sigma_M}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}+1}, \quad (5)$$

где σ_M , σ_n – местные и номинальные напряжения; u_{ne} , u_{np} , u_{Me} , u_{Mp} – упругие и пластические составляющие номинальных и местных удельных энергий.

При малоцикловом нагружении в опасных областях надреза наблюдается концентрация напряжений, упругопластических деформаций и удельных энергий. Для определения в этом случае теоретических коэффициентов концентрации (ТКК) напряжений $\alpha_{\sigma 1}$, упругопластических деформаций $\alpha_{\varepsilon 1}$ и удельных энергий $\alpha_{u 1}$ используем решение Г. Нейбера [16] с учетом его обобщения [17]:

$$\alpha_{\sigma 1} \alpha_{\varepsilon 1} = \alpha_\sigma^2 F_M, \quad F_M = (\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{-n_{e1}}, \quad (6)$$

где F_M – корректирующая функция; $\bar{\sigma}_n = \sigma_n / \sigma_{тс}$ – номинальное напряжение в относительных координатах; $\sigma_{тс}$ – схематизированный предел текучести стабилизированной диаграммы малоциклового деформирования; $n_{e1} = 0,5(1-m)(1+1/\alpha_\sigma - \bar{\sigma}_n)$. Из соотношений (1)–(6) при допущениях [17] по методике [18] получаем ТКК напряжений

$$\alpha_{\sigma 1} = \frac{\alpha_\sigma \left[\sigma_n + EC_p \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}} \right] F_M}{\sigma_n + EC_p \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}} \alpha_\sigma^{\frac{1-m}{m}} F_M^{\frac{1}{m}}}; \quad (7)$$

упругопластических деформаций

$$\alpha_{\varepsilon 1} = \frac{\alpha_\sigma \sigma_n + EC_p \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}} \alpha_\sigma^{\frac{2}{m}} F_M^{\frac{1}{m}}}{\sigma_n + EC_p \left(\frac{\sigma_n}{C_\sigma} \right)^{\frac{1}{m}}}; \quad (8)$$

и удельных энергий

$$\alpha_{u 1} = \frac{\alpha_\sigma^2 u_{ne} + \alpha_\sigma^2 \bar{\sigma}_n^{-n_{e1}} u_{np}}{u_n}. \quad (9)$$

Как показал анализ, погрешности формул (7)–(9) не превышают погрешностей известных [17] соотношений и составляют: по напряжениям – до 2 %, по деформациям – менее 5 %. Вместе с тем полученные формулы более удобны для использования при энергетической трактовке малоциклового усталости. Если применять только решение Г. Нейбера [16], положив в формуле (6) $n_{e1} = 0$ ($F_M = 1$), то из выражения (9) получаем практически важный результат:

$$\alpha_{u 1} \approx \alpha_\sigma^2. \quad (10)$$

Аналогичный вывод следует из работы [7] при использовании для анализа местных напряжений и деформаций соотношения Г. Нейбера [16].

Как показал анализ, численные значения $\alpha_{u 1}$, определенные по формулам (9) и (10), отличаются между собой менее чем на 5 %.

Результаты известных и полученных [13–15] данных свидетельствуют, что долговечность элемента конструкции зависит не только от амплитуды местной энергии, но и от относительного градиента ее изменения по координате v нетто-сечения надреза [18]

$$\bar{G}_{u 1} = \frac{1}{u_M} \left. \frac{du_{Mv}}{dv} \right|_{v=0,5h}, \quad (11)$$

где h – высота нетто-сечения элемента конструкции. Характерно, что при одной и той же амплитуде местной энергии долговечность элемента конструкции будет тем больше, чем выше градиент ее изменения. Если упругую и пластическую составляющие местной энергии u_{Mv} в точке нетто-сечения с координатой v аппроксимировать параболой, касательными к соответствующим эпюрам в вершине надреза

$$u_{Mv} = u_{Me} \left[1 - \bar{G}_\sigma \left(\frac{h}{2} - v \right) \right]^2 + u_{Mp} \left[1 - \bar{G}_{\sigma 1} \left(\frac{h}{2} - v \right) \right]^{\frac{1}{m}+1}, \quad (12)$$

то с учетом формулы (11) получаем относительный градиент изменения удельной энергии упругопластической деформации в вершине надреза:

$$\bar{G}_{u1} = \frac{2u_{me} + (2 - n_{e1})u_{mp}}{u_m} \bar{G}_\sigma, \quad (13)$$

где \bar{G}_σ , $\bar{G}_{\sigma 1}$ – относительные градиенты изменения местных напряжений в надрезе при упругой и пластической деформации. Методика их определения разработана ранее [18]. Для элемента конструкции с V-образным надрезом радиусом ρ и высотой нетто-сечения h относительные градиенты изменения местных напряжений при упругом и пластическом изгибе равны [18]:

$$\bar{G}_\sigma = 2 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{h} \right), \quad \bar{G}_{\sigma 1} = \frac{2m}{1+m} \bar{G}_\sigma. \quad (14)$$

Анализ показал, что в формуле (13) при практических расчетах можно принять параметр $n_{e1} = 0$. С учетом этого получаем:

$$\bar{G}_{u1} = 4 \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{h} \right) = 2\bar{G}_\sigma. \quad (15)$$

Относительный градиент изменения удельной энергии для образца при изгибе можно получить подобным способом в таком виде:

$$\bar{G}_{uc} = \frac{1}{u} \frac{du_v}{dv} \Big|_{v=0,5h_c} = \frac{2u_e + (1+m)u_p}{u} \bar{G}_{\sigma c}, \quad (16)$$

где $\bar{G}_{\sigma c} = 2/h_c$ – относительный градиент изменения напряжений при упругом изгибе образца высотой сечения h_c .

Для установления взаимосвязи амплитуд энергий равной повреждаемости (долговечности) гладкого образца и элемента конструкции необходимо сформулировать критерий подобия их равноопасных механических состояний, как это принято в градиентальных теориях циклической прочности [19–21]. Для многоциклового усталости в качестве физического критерия прочности используют напряжение [19], а для малоциклового области – интенсивность упругопластических деформаций [20, 21]. Если в качестве физического критерия прочности выбрать удельную энергию деформации, то критерий подобия применительно к зонам конструктивной концентрации при равной долговечности N_T гладкого образца и элемента конструкции с учетом полученных [22] результатов можно представить таким образом:

$$K_{ku} = \frac{F_{cu}}{F_{ku}}, \quad (17)$$

где $F_{cu} = 2b_c/\bar{G}_{uc}$, $F_{ku} = b/\bar{G}_{u1}$ – части площадей опасных сечений образца и элемента конструкции, в которых сосредоточены ответственные за разрушение наибольшие удельные энергии упругопластической деформации; b_c , b – ширина сечения гладкого

образца и элемента конструкции. С учетом этого амплитуды местной энергии деформации элемента конструкции, а также гладкого образца при равной долговечности N_T связаны соотношением

$$u_m = u \left[\varepsilon_\infty + (1 - \varepsilon_\infty) K_{ku}^{m_{ku}} \right], \quad (18)$$

где m_{ku} – параметр чувствительности материала к концентрации энергии; ε_∞ – предельное значение масштабного фактора при долговечности N_T , определяемое [20] по зависимости

$$\varepsilon_\infty = 0,6 - 0,014 \lg N_T. \quad (19)$$

С учетом этого эффективный коэффициент концентрации энергии при рассматриваемой долговечности N_T можно записать в виде

$$K_u = \frac{\alpha_{u1}}{\varepsilon_\infty + (1 - \varepsilon_\infty) K_{ku}^{m_{ku}}}. \quad (20)$$

Как следует из полученных ранее [22] данных, параметр чувствительности материала к концентрации энергии m_{ku} , характеризующий скорость накопления повреждений при малоциклового нагружении, представляет собой тангенс угла наклона касательной к кривой малоциклового усталости гладкого образца в логарифмических координатах $\lg u - \lg N_T$ в точке с амплитудой удельной энергии u , равной амплитуде местной энергии $u_m = u_n \alpha_{u1}$ элемента конструкции. Если кривую малоциклового усталости гладкого образца в амплитудах удельной энергии упругопластической деформации $u - N_T$ описать уравнением [13]

$$u = u_e + u_p = C_{ue} N_T^{-2e_\tau} + C_{up} N_T^{-(p_\tau + e_\tau)}, \quad (21)$$

то тангенс угла наклона касательной к кривой $\lg u - \lg N_T$ в точке $u = u_m = u_n \alpha_{u1}$ по абсолютной величине составит

$$m_{ku} = \frac{d(\lg u)}{d(\lg N_T)} = \frac{2e_\tau u_e + (p_\tau + e_\tau) u_p}{u}, \quad (22)$$

где C_{ue} , C_{up} , e_τ , p_τ – параметры кривой малоциклового усталости.

Располагая кривой малоциклового усталости материала (21), по соотношению (20) с учетом зависимостей (9), (17), (19), (22) можно рассчитать кривые малоциклового усталости рассматриваемого элемента конструкции в номинальных энергиях и номинальных напряжениях, а затем прогнозировать его долговечность.

Положительные результаты проведенного авторами экспериментального обоснования предлагаемого метода излагаются в следующей статье.

Библиографические ссылки

1. Лашко Н. Ф. Упрочнение и разрушение металлов и некоторые предельные механические состояния металлов. – М.: Оборонгиз, 1951. – 188 с.
2. Беренов Д. И. Расчет машин на прочность. – М.: Машгиз, 1953. – 257 с.

3. Морроу Д., Тьюлер Ф. Оценка усталостной прочности сплавов никаноль 713С и воспалой при малом числе циклов // Труды Америк. об-ва инженеров-механиков. Сер. Д. – 1965. – № 2. – С. 8–25.
4. Ганев П. Л., Веселинов К. В., Иванов И. П. Модели усталостного нагружения при сложном нагружении // Механическая усталость металлов : докл. VI Междунар. коллоквиума. – Киев : Наук. думка, 1983. – С. 74–81.
5. Карпунин В. А. Усталостная прочность цилиндрических пружин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Свердловск, 1967. – 38 с.
6. Климан В. В. Определение эксплуатационной долговечности на основе энергетического критерия // Механическая усталость металлов : докл. VI Междунар. коллоквиума. – Киев : Наук. думка, 1983. – С. 104–109.
7. Глинка Г. Г. Анализ локальных деформаций и напряжений и прогнозирование усталостной долговечности // Механическая усталость металлов : докл. VI Междунар. коллоквиума. – Киев : Наук. думка, 1983. – С. 54–60.
8. Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев : Наук. думка, 1971. – 267 с.
9. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев : Наук. думка, 1981. – 342 с.
10. Троценко В. Т., Коваль Ю. И. Закономерности накопления усталостного повреждения в сталях 45 и 1Х13 в условиях программного изменения нагрузки // Проблемы прочности. – 1973. – № 12. – С. 9–15.
11. Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Мищенко Ю. Д. Исследование усталостной прочности образцов с концентраторами с учетом неупругих циклических деформаций // Проблемы прочности. – 1978. – № 4. – С. 13–16.
12. Троценко В. Т., Гетман А. Ф. Исследование влияния малых упругопластических деформаций на несущую способность образцов с концентраторами // Проблемы прочности. – 1972. – № 2–3. – С. 13–23.
13. Добровольский С. В. Методика и результаты малоцикловых испытаний материалов и конструктивных элементов при энергетическом подходе // Заводская лаборатория. – 1996. – № 12. – С. 39–42.
14. Добровольский С. В. Моделирование малоцикло-вой прочности деталей гидрооснастки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 1. – С. 52–58.
15. Добровольский С. В. Малоцикловые испытания материала при изгибе с вращением // Заводская лаборатория. – 2000. – № 1. – С. 46–49.
16. Нейбер Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига, для любого нелинейного закона, связывающего напряжения и деформации // Прикладная механика. – 1961. – № 4. – С. 17–130.
17. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.
18. Добровольский С. В. Анализ напряжений, деформаций, энергий и их градиентов в зонах концентрации при однократном и малоцикловом нагружении // Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 4–6. – С. 14–22.
19. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.
20. Руководящий технический материал РТЗМ-1637-84. Материалы для штампов. Методы определения прочности при механической малоцикло-вой усталости [введ. 01.01.85].
21. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Деформационные методы оценки малоцикло-вой прочности. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 402 с.
22. Добровольский С. В., Добровольский В. И. Закономерности подобия малоцикло-вого разрушения модели и детали. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 243 с.

V. I. Dobrovolsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
S. V. Dobrovolsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Method of Predicting the Low-Cyclic Durability of Elements of Constructions

A method for estimating the low-cyclic durability of elements of constructions is proposed. It implies that a specific energy of elastoplastic deformation as an integral characteristic of stress-strain state is chosen as the criterion of the physical strength.

Key words: specimen, element of construction, concentration and gradient of energy, similarity criterion.