

УДК 620.169.1

Г. В. Пачурин, д-р техн. наук, проф., **Д. А. Гончарова**, ассист.,
А. А. Филиппов, канд. техн. наук, доц., **Т. В. Нуждина**, канд. техн. наук, доц.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Н. Новгород, Россия
Тел.: 89065563966; E-mail: pachuringv@mail.ru

К ОЦЕНКЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛИСТОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложена оценка процесса усталостного разрушения материалов, позволяющая изучить этапы сопротивления усталостному разрушению листовых материалов. Результаты исследования позволяют зафиксировать начало повреждения материала до появления макротрещины, скорость ее последующего развития и, как следствие, ремонтпригодность конструкции в целом. Сравнительные испытания позволяют выбрать материал, который наилучшим образом соответствует эксплуатационным требованиям и снижает аварийность металлических конструкций автомобиля.

Ключевые слова: автомобильные листовые материалы, усталостные испытания, текущий прогиб образца.

G. V. Pachurin, D. A. Goncharova, A. A. Filippov, T. V. Nuzhdina

TO THE EVALUATION OF THE PROCESS OF FATIGUE DESTRUCTION OF SHEET AUTOMOBILE MATERIALS

An assessment of the process of fatigue fracture of materials is proposed, which allows studying the stages of resistance to fatigue fracture of sheet metal materials. The results of the study make it possible to record the onset of damage to the material until the appearance of a macrocrack, the speed of its subsequent development and, as a result, the maintainability of the structure as a whole. Comparative tests allow you to choose the material that best meets the operational requirements and reduces the accident rate of the metal structures of the car.

Keywords: automotive sheet materials, fatigue tests, current sample deflection

1. Введение

Большинство разрушений металлоконструкций связано с их усталостью в процессе эксплуатации [1, 2]. Поэтому одной из важнейших задач автомобильной промышленности является задача обеспечения надежной эксплуатации конструктивных элементов и автомобиля в целом [3, 4]. Структурно-механические свойства автомобильных металлоизделий, формируются на всех стадиях металлургического передела [5, 6].

Необходимость проведение усталостных испытаний вызвана потребностью уменьшения материалоемкости изделий при обеспечении их необходимого ресурса. В производстве автомобилей применяется широкий спектр стальных материалов, подвергаемых обработке по различным технологиям [7, 8].

Кроме природы материала на его эксплуатационные свойства существенное влияние оказывают структурное состояние поверхности [9-11], в значительной мере связанные с технологией изготовления. Являясь концентраторами напряжений, эти факторы способствуют появлению усталостных повреждений, так как все процессы, связанные с зарождением усталостных трещин, в поверхностных слоях металла идут с опережением, и вся повреждаемость инициируется и концентрируется на поверхности материала [12-14].

В автомобилестроении нашли широкое применение листовые малоуглеродистые стали. Хотя сведения по эффекту их обработки в процессе изготовления деталей на механические свойства ограничены и разрозненны, что затрудняет обоснованный выбор конструкторских и технологических решений. Это обуславливает актуальность решения вопроса повышения циклической долговечности автомобильных деталей при возможном снижении их металлоемкости с учетом технологических особенностей изготовления.

Решение данной задачи предполагает изучение основных этапов эксплуатационной деструкции материалов с определением периода до появления трещин и интенсивности их последующего роста, что позволит выбрать материал, соответствующий эксплуатационным требованиям, уменьшить вероятность поломок деталей и затраты на ремонт автомобиля.

Конструктору и технологу на стадии проектирования [3, 15] важно назначить технологический процесс изготовления детали с учетом при этом совокупности всех факторов, оказывающих влияние на их эксплуатационную надежность [1, 5, 16]. Анализ литературных данных показал, что не все оборудование для усталостных испытаний может удовлетворить требования исследователя и часто является стационарным, крупногабаритным, энергоемким, сложным в обслуживании и достаточно дорогостоящим [17].

Целью данной работы является оценка принципиальной возможности изучения этапов процесса усталостной деструкции листовых стальных материалов по изменению кривых текущего прогиба образцов в процессе циклического нагружения.

Задачи исследования:

- выполнить усталостные, микроструктурные и фрактографические исследования листовых автомобильных сталей 20кп и 08кп.
- построить их кривые усталости;
- построить кривые изменения текущего прогиба образцов;
- получить характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей;
- показать принципиальную возможность оценки этапов процесса усталостной деструкции листовых стальных материалов по изменению кривых прогиба образцов с целью рационального выбора материала и снижения аварийности автомобиля.

2. Основное содержание и результаты работы

В работе на основе экспериментов на циклические испытания с применением малогабаритной настольной установки ЭМУ-5-ПК [18] плоских образцов из ряда автомобильных материалов показана возможность отслеживания кинетики их разрушения при усталостном нагружении. Испытания материалов проводились на базе рам автомобилей ГАЗ-3302. Для создания конструкций автомобильных рам используются стали 20кп и 08кп. Химический состав и параметры при статическом растяжении исследуемых сталей представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. – Химический состав сталей 08кп и 20кп

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
08кп	0,05–0,12	Не более 0,03	0,25–0,50	0,030	0,035	0,10	0,30	0,30
20кп	0,17–0,24	Не более 0,07	0,25–0,50	0,030	0,035	0,25	0,30	0,30

Таблица 2. – Механические свойства сталей 08кп и 20кп

Марка стали	Механические свойства, не менее				
	σ_t , Н/мм ²	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	$E \cdot 10^5$, МПа
08кп	196	320	33	60	2,12
20кп	245	410	25	55	2,03

Фрактография изломов образцов изучалась на оптическом компараторе с увеличением $\times 10$ и фотографий с увеличением $\times 7$.

Кривые изменения прогиба образцов (рис. 1) при знакопеременном нагружении $\Delta f-N$ являются отражением кинетики усталостных повреждений от зарождения трещины до катастрофического разрушения [17].

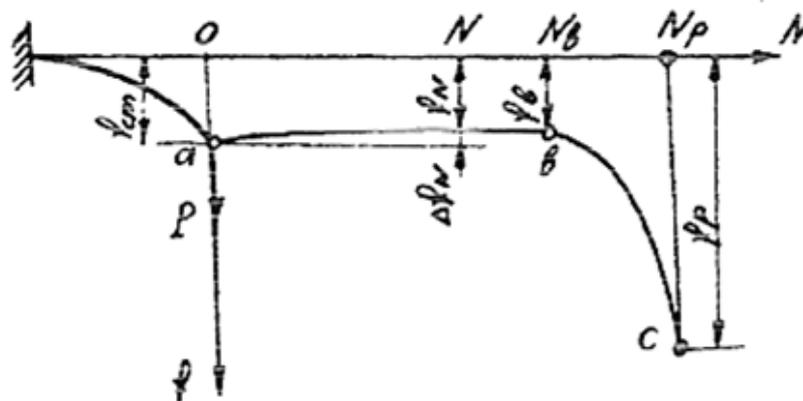


Рисунок 1. Схема кривой измерения прогиба образца: N_p – полная циклическая долговечность; f_{cm} – статический прогиб; f_p – прогиб в момент окончательного разрушения; f_N – прогиб в данный момент времени; Δf_N – изменение прогиба в данный момент времени; b – момент появления трещины; $(a - b)$ – участок до появления трещины; $(b - c)$ – участок продвижения трещины; f_b – прогиб в момент появления трещины

На рис. 2 показана фотография поверхности образца из стали 20кп с усталостной трещиной, полученной при циклическом нагружении с амплитудой напряжения $\sigma = 235$ МПа.



Рисунок 2. Усталостная трещина на поверхности образца из стали 20кп при $\sigma = 235$ МПа; $N = 174000$ циклов

На рис. 3 в качестве примера представлена полученная в работе кривая Веллера в координатах $\lg\sigma - \lg N$, ее уравнение и величина коэффициента корреляции для стали 20кп. Предел выносливости определялся по методу Локати ($\sigma_{-1} = 190$ МПа).

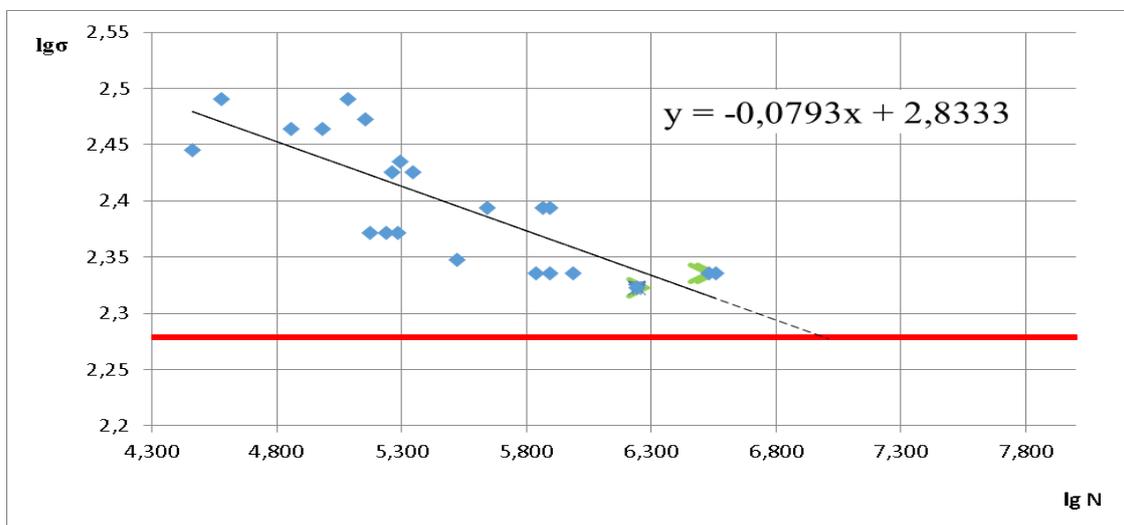


Рисунок 3. Кривая усталости стали 20кп $\lg\sigma - \lg N$: σ – амплитуда напряжения, МПа; N – циклическая долговечность; коэффициент корреляции $r = -0,8833$

Результаты обработки параметров трещины (рис. 2) и кривых текущего прогиба образцов для сталей 20кп и 08кп при усталости представлены в табл. 3.

Таблица 3. – Параметры процесса разрушения при усталостном нагружении сталей 20кп и 08кп

Сталь	N_p , цикл.	$n_{з.тр.}$, цикл.	$n_{роста тр.}$, цикл.	$l_{тр.}$, мм	$V_{ср. тр.}$, мм/цикл	$n_{з.тр.}$, % от N_p	$n_{роста тр.}$, % от N_p	σ_{-1} , МПа
20кп	174000	68000	106000	9,4	$8,86 \cdot 10^{-5}$	39,8	60,2	190
08кп	262000	82000	180000	9,8	$5,38 \cdot 10^{-5}$	31,3	68,7	176

N_p – полное число циклов до разрушения образца;
 $n_{з.тр.}$ – число циклов до зарождения усталостной трещины;
 $n_{роста тр.}$ – число циклов роста усталостной трещины;
 $l_{тр.}$ – полная длина усталостной трещины;
 $V_{ср. тр.}$ – усредненная скорость роста усталостной трещины;
 $n_{з.тр.}$ – доля долговечности до зарождения усталостной трещины от долговечности до полного разрушения образца;
 $n_{роста тр.}$ – доля долговечности роста усталостной трещины от долговечности до полного разрушения образца;
 σ_{-1} – предел выносливости по методу Локати.

Из анализа обработки полученных результатов следует, что, хотя предел выносливости у стали 20кп составляет 190 МПа, что несколько выше, чем у стали 08кп (176 МПа), те не менее в стали 08кп усталостная макротрещина зарождается раньше и подрастает со значительно меньшей скоростью.

Так, например, несмотря на то, что параметры повреждаемости были получены при большем (265 МПа) напряжении для стали 08кп против лишь 235 МПа для стали 20кп, у стали 08кп число циклов до полного разрушения (262000 циклов) и период до зарождения усталостной трещины (82000 циклов) больше, а скорость ее дальнейшего роста ($5.38 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл), чем у стали 20кп (174000, 68000 циклов и $8.86 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл, соответственно).

Это позволяет сделать вывод о том, что при выборе материала для ответственных автомобильных деталей сталь 08кп имеет эксплуатационное преимущество перед сталью 20кп, так как увеличивается возможность своевременного обнаружения появления усталостных повреждений во время очередного технического осмотра автомобиля, что позволяет снизить вероятность автомобильных аварий.

4. Заключение

1. Выполнены усталостные, микроструктурные и фрактографические исследования листовых автомобильных сталей 20кп и 08кп.

2. Построены их кривые усталости и кривые изменения текущего прогиба образцов.

3. Показана принципиальная возможности оценки этапов процесса усталостной деструкции листовых стальных материалов по изменению кривых прогиба образцов.

4. Получены характеристики сопротивления усталостному разрушению этих сталей:

- полная циклическая долговечность до окончательного разрушения материала;
- предел выносливости;
- длительность периода до зарождения усталостных трещин;
- скорость их последующего развития.

5. Полученные параметры кинетики усталостной повреждаемости позволяют:

- оценивать и сравнивать ремонтпригодность конструкции из разных конкурирующих материалов;
- на стадии технического обслуживания предотвратить дальнейшее разрушение элементов конструкции и деталей автомобиля под действием циклических нагрузок;
- снизить затраты на ремонт;
- повысить безопасность эксплуатации автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Терентьев, В. Ф. Усталость высокопрочных металлических материалов / В. Ф. Терентьев, А. Н. Петухов – М.: ИМЕТ РАН ЦИАМ, 2013. – 515 с.

2. Guslyakova, G. P. Fatigue failure resistance of deformed structural steels / G. P. Guslyakova, S. I. Zhbannikov, G. V. Pachurin // Materials Science. – 1993. – Т. 28. – № 2. – Р. 182-185.

3. Пачурин, Г. В. Кузов современного автомобиля: материалы, проектирование и производство: Учебное пособие: под ред. Г.В. Пачурина / Г. В. Пачурин, Кудрявцев С. М., Д. В. Соловьев, В. И. Наумов; 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 316 с.

4. Пачурин, Г. В. Повышение эксплуатационной долговечности металлоизделий технологическими методами / Г. В. Пачурин, А. Н. Гуцин // Вестник машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 62-65.

5. Pachurin, G. V. Ruggedness of structural material and working life of metal components / G. V. Pachurin // Steel in Translation. – 2008. – Т. 38. – № 3. – Р. 217-220.

6. Filippov, A. A. Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts / A. A. Filippov, G. V. Pachurin, V. I. Naumov, N. A. Kuzmin // Metallurgist, 2016. – Vol. 59. Nos. 9–10. January. – P. 810–815.

7. Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel / G. V. Pachurin // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. – № 9–10. – P. 661–664.

8. Pachurin, G. V. Mechanical properties of sheet structural steels at operating temperatures / G. V. Pachurin, V. A. Vlasov // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – Т. 56. – № 3–4. – P. 219–223.

9. Пачурин, Г. В. Коррозионная долговечность изделий из деформационно-упрочненных металлов и сплавов: учебное пособие / Г.В. Пачурин. – 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 160 с.

10. Филиппов, А. А. Оценка качества стального проката для холодной объемной штамповки / А.А. Филиппов, Г. В. Пачурин, Н. А. Кузьмин, Ю. И. Матвеев, В. Б. Деев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Том 61. – №7. – С. 551-556.

11. Пачурин, Г. В. Ресурсосберегающая и экологичная обработка поверхности металлопроката перед холодной высадкой / Г. В. Пачурин, А. А. Филиппов // Экология промышленности России, август 2008. – С. 13-15.

12. Пачурин, Г. В. Роль структуры поверхности в коррозионной усталости деформированных металлических материалов / Г. В. Пачурин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – Режим доступа:

<http://science-education.ru/ru/article/view?id=11907> (дата обращения: 16.05.2019).

13. Pachurin, G. V., Shevchenko S. M., Filippov A. A., Mukhina M. V., Kuzmin N. A. Defining rolled metal performance for cold bolt upsetting (bolt head). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327, 032040 doi:10.1088/1757-899X/327/3/032040.

14. Бережницкая, М. Ф., Коррозионная усталость конструкционных сталей и их сварных соединений в морской воде / М. Ф. Бережницкая, Н. А. Меженин, В. А. Власов, Г. В. Пачурин и др. // Физико-химическая механика материалов. – 1993. – Т.29. – №1. – С. 129-131.

15. Пачурин, Г. В. Повышение долговечности листовых штампованных деталей из высокопрочных сталей и сплавов / Г. В. Пачурин // КШП. ОМД. – 2003. – №11. – С. 7-11.

16. Пачурин, Г. В. Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов. / Г. В. Пачурин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – № 10. – С. 35-38.

17. Пачурин, Г. В. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в различных условиях нагружения: учеб. пособие для студентов вузов /U/D/ Gfхehby / А. Н. Гушин, К. Г. Пачурин, Г.В. Пименов. – НГТУ: Н. Новгород, 2005. – 139 с.

18. Пачурин, Г. В. Development of fatigue test technology of sheet automobile materials // Eastern-european journal of enterprise technologies – ISSN 1729-3774. / Г.В. Пачурин, Д. А. Гончарова, А. А. Филиппов и др. / Materials science. UDC 620.169.1 – Vol 5. – No 12 (95). – 2018. – P. 31-37. – DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144524.

Поступила в редколлегию 18.05.2019 г.