

УДК 620.178.3 + 620.194.8

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ

Гущин А.Н., Пачурин Г.В.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru, <http://www.famous-scientists.ru/1238>

Во всех отраслях промышленности широко используются конструкционные материалы, подвергающиеся различным методам обработки. При изготовлении изделий и элементов конструкций из листовых малоуглеродистых сталей широко используются различные виды пластического деформирования. В результате упрочнения сопротивление усталости деталей машин и механизмов изменяется неоднозначно, и в процессе эксплуатации резерв прочности материала не всегда исчерпывается полностью. В работе изучено влияние степени предварительной деформации растяжением и осадкой на показатели усталостного разрушения листовых малоуглеродистых сталей. Установлено, что предварительная деформация в пределах равномерной обуславливает повышение сопротивления усталости. По кинетическим диаграммам усталостного разрушения дана оценка изменения долговечности от скорости накопления усталостных повреждений на стадии циклического деформирования до момента раскрытия и распространения усталостной трещины. Выявлено соотношение длительности стадий усталостного разрушения в зависимости от степени предварительной деформации растяжением при заданном амплитудном напряжении цикла.

Ключевые слова: листовая сталь, деформация, осадка, растяжение, повреждаемость, механические свойства, прочность, пластичность, усталостное разрушение

PERFORMANCE PROPERTIES DEFORMED MILD STEEL SHEET

Guschin A.N., Pachurin G.V.

FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod,
e-mail: PachurinGV@mail.ru, <http://www.famous-scientists.ru/1238>

In all industries are widely used structural materials subjected to different processing methods. During the production and design elements from sheet mild steels are widely used various kinds of plastic deformation. As a result of hardening of the fatigue resistance of machinery parts varies ambiguously, and during operation the reserve strength of the material is not always totally exhausted. In this paper we study the effect of the degree of pre-strain and tension on the draft indicators of fatigue fracture of low carbon sheet steel. Found that pre-deformation within the uniform causes increase fatigue resistance. Kinetic diagrams of fatigue fracture assessed changes in longevity on the rate of fatigue damage accumulation stage cyclic deformation prior to the disclosure and fatigue crack propagation. Found the ratio of long-lasting fatigue fracture depending on the degree of pre-tensile strain at a given stress amplitude cycle.

Keywords: sheet steel, deformation, sediment, stretching, defect, mechanical properties, strength, ductility, fatigue failure

Проблема повышения надежности и безопасной работы деталей машин и технических устройств является важнейшей задачей промышленности и приоритетным направлением современной науки. При этом значительное число ответственных деталей машин и механизмов испытывает воздействие переменных циклических нагрузок. Данная проблема включает необходимость отыскания оптимальных конструкторских решений и использования технологических процессов, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики деталей и конструкций в целом.

Во всех отраслях промышленности широко используются конструкционные материалы, подвергающиеся различным методам обработки. При изготовлении изделий и элементов конструкций из листовых малоуглеродистых сталей широко используются различные виды пластического деформирования. В частности, при проведении холодной штамповки с глубокой и сложной

вытяжкой различные элементы изделия испытывают деформацию растяжения различной степени.

В результате упрочнения сопротивление усталости деталей машин и механизмов изменяется неоднозначно, и в процессе эксплуатации резерв прочности материала не всегда исчерпывается полностью [4–6].

В работе приведены результаты исследований параметров усталостного разрушения малоуглеродистых листовых сталей в зависимости от степени предварительной деформации растяжением ($\epsilon_{п.д.}$).

Методика проведения эксперимента

Для решения этой задачи были выбраны широко применяемые в автомобильной и других отраслях промышленности низкоуглеродистые листовые холоднокатаные стали 08кп, 08Ю, горячекатаные стали 08ЮА, 08ГСЮТ, 07ГСЮФТ и 07ГБЮ после различной степени предварительной пластической деформации.

Предварительная деформация образцов осуществлялась в диапазоне от 0 до 29% при комнатной температуре растяжением на разрывной маши-

не «INSTRON» со скоростью деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и осадкой на прессе через подкладной инструмент со скоростью деформации 10^{-1} с^{-1} . При этом осадке подвергался не весь образец, а только его участок в опасном сечении.

Предварительной пластической деформации подвергались пластины с размерами поперечного сечения $3 \times 20 \text{ мм}$, из которых изготавливались образцы как для статических испытаний на растяжение (сечением $3 \times 3 \text{ мм}$ при соблюдении соотношения $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$ между начальной расчетной длиной образца l_0 и площадью поперечного сечения A_0), так и для усталостных испытаний (размеры рабочей части соответствовали IV типу плоских образцов [3]).

Усталостные испытания осуществлялись по схеме мягкого нагружения знакопеременным циклическим изгибом на установке, позволяющей реги-

стрировать изменения прогиба образца в процессе нагружения [3].

Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 1 приведены кривые усталости в логарифмических координатах, уравнения которых имеют общий вид [6]:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \beta \lg N,$$

где β – тангенс угла наклона кривой усталости, характеризующий способность материала сопротивляться циклическому нагружению.

Параметры уравнений кривых усталости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уравнения кривых усталости сталей 08 кп, 08Ю, 08ЮА, 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ

№ п/п	Сталь	Предварительная деформация		$\lg \sigma = -\text{tg } \alpha_{\omega} \lg N + \lg \sigma_a$ или $Y = -A X + B$
		схема	степень, %	
1	08кп	–	ИС (х/к)	$Y = -0,088 X + 3,024$
2	08кп	Осадка	5	$Y = -0,999 X + 3,066$
3	08кп	Осадка	17	$Y = -0,085 X + 3,005$
4	08кп	Осадка	29	$Y = -0,083 X + 2,980$
5	08Ю	–	ИС (х/к)	$Y = -0,132 X + 2,921$
6	08Ю	Осадка	12	$Y = -0,134 X + 2,910$
7	08ЮА	–	ИС (г/к)	$Y = -0,121 X + 3,163$
8	08ЮА	Растяжение	2,5	$Y = -0,194 X + 3,484$
9	08ЮА	Растяжение	5	$Y = -0,204 X + 3,582$
10	08ЮА	Растяжение	10	$Y = -0,291 X + 4,157$
11	08ЮА	Растяжение	15	$Y = -0,339 X + 4,364$
12	08ЮА	Растяжение	20	$Y = -0,416 X + 4,812$
13	08ГСЮТ	Осадка	ИС (г/к)	$Y = -0,096 X + 2,933$
14	08ГСЮТ	Осадка	5	$Y = -0,067 X + 2,812$
15	08ГСЮТ	Осадка	17	$Y = -0,089 X + 2,925$
16	08ГСЮТ	Осадка	29	$Y = -0,090 X + 2,943$
77	07ГСЮФТ	Осадка	ИС (г/к)	$Y = -0,161 X + 3,258$
18	07ГСЮФТ	Осадка	5	$Y = -0,150 X + 3,240$
19	07ГСЮФТ	Осадка	17	$Y = -0,142 X + 3,207$
20	07ГСЮФТ	Осадка	29	$Y = -0,109 X + 3,067$

Влияние видов и режимов технологической обработки на сопротивление усталостному разрушению сталей зависит от их природы, исходного структурного состояния и амплитуды циклического нагружения.

Холоднокатаная сталь 08 кп на воздухе имеет ограниченный предел выносливости на базе 10^6 циклов в 1,9 и 1,7 раза выше, чем у горячекатаных сталей 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ соответственно.

После деформации на 29% ограниченный предел выносливости на этой же базе снижается в 1,05 у стали 08 кп и в 1,3 и 1,1 раза соответственно у сталей 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ, однако для стали

08кп остается все-таки в 1,2 раза выше, чем у низколегированных сталей [4, 6]. Хотя эти стали и имеют более высокие значения пределов прочности и текучести [7], чем сталь 08 кп, сопротивлением же усталости (на базе 10^6 циклов) обладают более низким – в 1,6 и 1,4 раза соответственно. Таким образом, сталь 08кп показывает более стабильные и превосходящие сталей 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ параметры сопротивления усталостному разрушению.

Структура стали 08 кп состоит из феррита с небольшим количеством перлита, а характер усталостного разрушения образцов, испытанных на воздухе, в основном

вязкий. Низколегированные стали 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ имеют карбидные включения [2], которые препятствуют движению дислокаций и приводят к повышению прочностных свойств при статическом растяжении. Однако карбидные включения являются также источниками образования микротрещин при растяжении, что отрицательно сказывается на параметрах пластичности. Под действием циклических нагрузок эти трещины активируют развитие процессов усталостного разрушения и инициируют продольное растрескивание образцов, а следовательно, способствуют понижению их долговечности. Поэтому независимо от режимов предварительной технологической обработки образцы из стали 08 кп имеют более высокое сопротивление усталости, чем низколегированные стали 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ [3].

Предварительная деформация осадкой холоднокатаной стали 08Ю на 12% при высоких напряжениях, например, при $\sigma_a = 250$ МПа, снижает долговечность в 1,37 раза. При пониженных уровнях амплитуд нагружения (например, при $\sigma_a = 150$ МПа) деформация 12% долговечности холоднокатаной стали снижается в 1,42 раза.

В результате усталостных испытаний стали 08ЮА установлено, что с увеличени-

ем степени предварительной деформации растяжением предел усталости σ_{-1} на базе испытаний $N = 10^7$ циклов изменяется неоднозначно.

Так, например, предварительная деформация растяжением до $\varepsilon_{пд} = 2,5\%$ снижает предел усталости по сравнению с недеформированными образцами на 15%, что может быть связано с возникновением повреждаемости в наиболее слабых поверхностных зернах металла, характером и уровнем внутренних остаточных напряжений, степенью неоднородности пластической деформации. Дальнейший рост степени предварительной деформации приводит к увеличению σ_{-1} , значение которого достигает максимума $\sigma_{-1} = 197$ МПа при $\varepsilon_{пд} = 15\%$, не превышающего значения предела усталости недеформированных образцов $\sigma_{-1} = 200$ МПа.

При этом следует отметить, что с увеличением $\varepsilon_{пд}$ снижается деформационная способность предварительно деформированных образцов и повышается интенсивность накопления усталостных повреждений с уменьшением амплитудного напряжения цикла σ_a .

Параметры уравнений кривых усталости даны в табл. 2, где r – коэффициент корреляции.

Таблица 2

Параметры уравнения кривой усталости и уравнения изменения относительной стрелы прогиба образца из горячекатаной стали 07ГБЮ на стадии N_1

№ п/п	$\varepsilon_{пд}, \%$	Параметры уравнений кривой усталости			Параметры уравнения кривой $\varepsilon_{с.п} = f(N_1)$ при $\sigma_a = 300$ МПа		
		$\lg \sigma_0$	β	r	$\lg \varepsilon_0$	C	r
1	0	3,078	0,106	-0,95	0,032	-0,0117	-0,96
2	2,5	3,474	0,186	-0,93	-0,087	0,0235	-0,95
3	5	3,869	0,257	-0,91	-0,062	0,0169	-0,97
4	10	4,073	0,288	-0,94	-0,046	0,0122	-0,98
5	14	4,108	0,291	-0,93	-0,022	0,00645	-0,95
6	17	4,395	0,349	-0,92	-0,031	0,0079	-0,97

В результате усталостных испытаний установлено (табл. 2), что зависимости изменения показателя β и предела усталости σ_{-1} на базе испытаний $N = 10^7$ циклов от степени предварительной деформации $\varepsilon_{пд}$ можно разделить на три участка:

- первый участок $\varepsilon_{пд} = 0-5\%$;
- второй участок $\varepsilon_{пд} = 5-14\%$;
- третий участок $\varepsilon_{пд} > 14\%$.

Первый участок характеризуется резким увеличением показателя β , величина которого $\beta = 0,257$ при $\varepsilon_{пд} = 5\%$ в 2,4 раза выше, чем у недеформированных образцов, и снижением предела усталости до миниму-

ма $\sigma_{-1} = 200$ МПа при $\varepsilon_{пд} = 2,5\%$ (по сравнению с недеформированными образцами σ_{-1} снижается на 15%), что может быть связано с возникновением повреждаемости в наиболее слабых поверхностных зернах металла, с характером и уровнем внутренних остаточных напряжений, степенью неоднородности пластической деформации [3].

На втором участке рост показателя β существенно замедляется (при $\varepsilon_{пд} = 14\%$ $\beta = 0,291$, то есть на 13% больше, чем у образцов, деформированных на $\varepsilon_{пд} = 5\%$), а предел усталости непрерывно возрастает и при $\varepsilon_{пд} = 14\%$ достигает максимума

$\sigma_{-1} = 230$ МПа, что соответствует пределу усталости недеформированных образцов.

Снижение величины σ_{-1} до 216 МПа и дальнейший рост показателя β до 0,349 при $\varepsilon_{п.д} = 17\%$ обуславливают ухудшение усталостных характеристик на третьем участке, которое, очевидно, вызвано возникновением в процессе пластического деформирования растяжением дефектной структуры, когда в локальных объемах металла с критической плотностью дислокаций зарождаются субмикроскопические трещины, которые при циклическом нагружении инициируют развитие микропластических деформаций и снижают сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин [1].

Дополнительную информацию о накоплении циклических повреждений можно получить при рассмотрении изменения стрелы прогиба образца,

$$\varepsilon_{с.п.} = \frac{f_i}{f_0},$$

где f_0, f_i – соответственно величины начальной и текущей стрелы прогиба образца в функции N числа циклов нагружений.

Ранее [2] подобные экспериментальные данные нами были получены для предварительно деформированной растяжением горячекатаной стали 08ЮА.

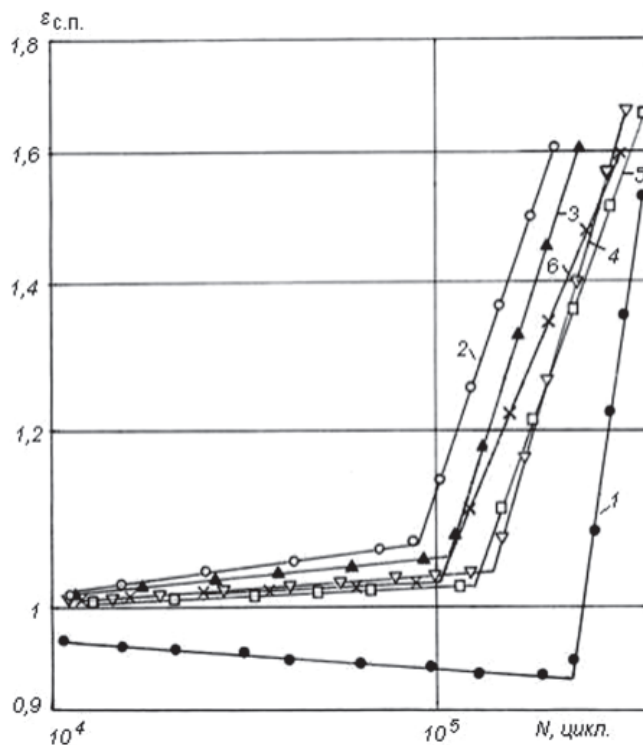
На рисунке в координатах $\lg \varepsilon_{с.п.} - \lg N$ представлены кривые $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$ при $\sigma_a = 300$ МПа для стали 07ГБЮ.

Из рисунка видно, что процесс усталостного разрушения можно разделить на две стадии: стадию N_1 (до момента раскрытия и распространения усталостной трещины), которой соответствует пологий участок кривой $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$, и стадию N_2 распространения усталостной трещины (с момента раскрытия трещины до полного её распространения по сечению образца), которой соответствует крутой участок кривой $\varepsilon_{с.п.} = f(N)$.

Долговечность N до разрушения, как правило, определяется показателем C , характеризующим скорость накопления усталостных повреждений в первый период усталостного разрушения, величину которого можно определить из уравнения $\lg \varepsilon_{с.п.} = \lg \varepsilon_0 \pm C \lg N_1$ [1].

Параметры этого уравнения в зависимости от величины $\varepsilon_{п.д}$ даны в табл. 2.

Анализ результатов, представленных на рисунке и в табл. 2, показывает, что преобладающим процессом при циклическом нагружении недеформированных образцов является циклическое упрочнение ($\varepsilon_{с.п.} < 1$), показатель $C = -0,0117$; $N = 3,45 \cdot 10^5$ цикл.



Изменение относительно стрелы прогиба образца предварительно деформированной растяжением стали 07ГБЮ при $\sigma_a = 300$ МПа:

1 – $\varepsilon_{н.д} = 0\%$; 2 – $\varepsilon_{н.д} = 2,5\%$; 3 – $\varepsilon_{н.д} = 5\%$; 4 – $\varepsilon_{н.д} = 10\%$; 5 – $\varepsilon_{н.д} = 14\%$; 6 – $\varepsilon_{н.д} = 17\%$

Предварительная пластическая деформация приводит к смене механизма, контролирующего скорость процесса усталости, так как упрочнение сменяется разупрочнением ($\epsilon_{с.п} > 1$). При этом следует отметить удовлетворительное соответствие способности упрочненной структуры к циклическому разупрочнению при выполнении соотношения $\frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} < 1,2$ [1, 2].

Долговечность при $\epsilon_{п.д} = 2,5\%$ снижается до $N = 2 \cdot 10^5$ циклов при значении показателя $C = 0,0235$. Дальнейшее увеличение $\epsilon_{п.д}$ от 5 до 14% уменьшает показатель C , что соответствует увеличению долговечности предварительно деформированных образцов. Так, при $\epsilon_{п.д} = 5\%$ ($C = 0,0169$), $N = 2,4 \cdot 10^5$ циклов, а при $\epsilon_{п.д} = 14\%$ ($C = 0,00645$), $N = 3,5 \cdot 10^5$ циклов.

Из рисунка также следует, что продолжительность первой стадии процесса накопления усталостных повреждений для недеформированных образцов $N_1 = 2,25 \cdot 10^5$ циклов, что по отношению к общему числу циклов до разрушения N составляет $\frac{N_1}{N} = 0,65$; при $\epsilon_{п.д} = 2,5\%$ отношение $\frac{N_1}{N} = 0,47$; при $\epsilon_{п.д} = 5-17\%$ отношение $\frac{N_1}{N}$ находится в пределах 0,45–0,3, то

есть предварительная деформация растяжением приводит к монотонному снижению продолжительности первой стадии процесса усталостного разрушения, и долговечность деформированных образцов в большей степени определяется длительностью стадии распространения усталостной трещины с момента её раскрытия.

Выводы

1. Влияние предварительной деформации на циклическую долговечность и ограниченный предел выносливости носит немонотонный характер и зависит от структуры материала, технологии обработки и амплитуды знакопеременного нагружения. При этом предварительная деформация в пределах равномерной обуславливает повышение сопротивления усталости.

2. Получены кривые усталости для широко применяемых в автомобильной и других отраслях промышленности низкоуглеродистых листовых холоднокатаных сталей 08кп, 08Ю, и горячекатаных сталей 08ЮА, 08ГСЮТ, 07ГСЮФТ и 07ГБЮ после различных степеней предварительной пластической технологической деформации.

3. По кинетическим диаграммам усталостного разрушения дана оценка изменения

долговечности от скорости накопления усталостных повреждений на стадии циклического деформирования до момента раскрытия и распространения усталостной трещины.

4. Установлено соотношение длительности стадий усталостного разрушения в зависимости от степени предварительной деформации растяжением при заданном амплитудном напряжении цикла.

Список литературы

1. Гушин А.Н., Пачурин Г.В. Анализ закономерностей усталостного разрушения сварных соединений из титана по изменению относительной стрелы прогиба образца // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 5. – С. 39–42.
2. Гушин А.Н., Пачурин Г.В. Эксплуатационные свойства штампованной низкоуглеродистой стали марок 08Ю и 08ЮА // Вестник машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 34–38.
3. Пачурин Г.В., Гушин А.Н., Пачурин К.Г., Пименов Г.В. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в различных условиях нагружения: учеб. пособие для студентов вузов / НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 139 с.
4. Пачурин Г.В. Долговечность листовых штампованных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Материаловедение. – 2003. – № 7. – С. 29–32.
5. Пачурин Г.В. Повышение долговечности листовых штампованных деталей из высокопрочных сталей и сплавов // КШП. ОМД. – 2003. – № 11. – С. 7–11.
6. Пачурин В.Г., Гушин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гушин, В.В. Галкин, В.Г. Пачурин; НГТУ. – Н.Новгород, 2006. – 173 с.
7. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – № 3. – Т. 38. – P. 217–220.

References

1. Goushchin A.N., Pachurin G.V. Analysis of patterns of fatigue fracture of welded joints made of titanium to change the relative deflection of the sample // Hardening and coating technologies, 2006. no. 5. pp. 39–42.
2. Goushchin A.N., Pachurin G.V. Operational properties of low carbon steel forged and 08U 08YUA // Bulletin of mechanical engineering. 2009, no. 7. pp. 34–38.
3. Pachurin G.V., Goushchin A.N., Pachurin K.G., Pimenov G.V. Technology integrated study destruction of deformed metals and alloys under different loading conditions: studies. manual for students / NSTU. Nizhny Novgorod, 2005. 139 p.
4. Pachurin G.V. Durability of stamped sheet materials in air and in a corrosive environment // Materials. 2003. Number 7. pp. 29–32.
5. Pachurin G.V. Increased durability of sheet stampings of high-strength steels and alloys // CSE. OMD. 2003. Number 11. pp. 7–11.
6. Pachurin V.G., Goushchin A.N., Galkin V.V., Pachurin V.G. Theoretical basis for improving the operational life of stamped metal: Textbook. Manual / G.V. Pachurin, A.N. Gushin, V.V. Galkin, V.G. Pachurin; NSTU. Nizhny Novgorod, 2006. 173 p.
7. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. 2008. Number 3. T. 38. pp. 217–220.

Рецензенты:

Панов А.Ю., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», директор ИПТМ, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Хлыбов А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Материаловедение, технология материалов, термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Работа поступила в редакцию 16.12.2013.