

УДК 620.178.3+620.194.8

А.Н. Гуцин<sup>1</sup>, Ю.Б. Гусев<sup>2</sup>, С.В. Созинов<sup>3</sup>**ПОВЕДЕНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>,  
ОАО «ГАЗ»<sup>2</sup>,  
Волжская государственная академия водного транспорта<sup>3</sup>

Проведены комплексные исследования изменения механических характеристик при статическом и циклическом нагружении предварительно деформированной растяжением малоуглеродистой стали 20. Установлены закономерности изменения механических характеристик, а также длительности периодов усталостного разрушения от степени предварительной деформации.

*Ключевые слова:* деформация, усталость, циклические повреждения, прочность, пластичность, периоды разрушения, упрочнение.

Элементы изделий при изготовлении и эксплуатации подвергаются различным видам и степеням деформации. Влияние степени и вида деформации на механические характеристики, особенно на параметры усталостного разрушения материалов, изучены недостаточно, а сведения литературных источников весьма ограничены и противоречивы. Поэтому исследования по прогнозированию, повышению долговечности и снижению металлоемкости изделий на основании установления изменения механических характеристик и закономерностей усталостного разрушения предварительно деформированных металлических материалов являются весьма актуальными.

**Методика работы**

Образцы для проведения исследований изготавливались из гнутых замкнутых сварных профилей стали 20 размером 80×80×3 мм (ГОСТ 30245-2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные»). Предварительной пластической деформации ( $\varepsilon_{п.д.}$ ) в диапазоне от 0 до 18 % (до предельной равномерной деформации) подвергались пластины с размерами поперечного сечения 3×20 мм, из которых изготавливались образцы как для статических испытаний на растяжение (сечением 3×3 мм при выполнении указанного в ГОСТе 1407-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» 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, согласно ГОСТ 25.502 – 79 «Методы испытаний на усталость»). Статические испытания и предварительное деформирование растяжением проводились на разрывной машине INSTRON со скоростью деформации  $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Усталостные испытания осуществлялись по схеме мягкого нагружения знакопеременным циклическим изгибом на установке, позволяющей регистрировать изменения прогиба образца в процессе нагружения [1]. По результатам статических испытаний, помимо стандартных механических испытаний ( $\sigma_B$  - предел прочности,  $\sigma_{0,2}$  - предел текучести,  $\delta$  - полное относительное удлинение), определялся показатель деформационного упрочнения  $n$  из уравнения кривой упрочнения при статическом растяжении [1, 2]:

$$\sigma_i = \sigma_0 \varepsilon_i^n, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  - истинное текущее напряжение течения;  $\varepsilon_i$  - истинная текущая деформация;  $\sigma_0$  - постоянная, равная напряжению течения при  $\varepsilon = 1$ .

С позиций оценки накопления циклических повреждений кинематические диаграммы усталостного разрушения представлялись как изменение относительной величины прогиба образца ( $f_i$ ) в функции числа циклов перемены напряжений ( $N$ ). При заданном уровне циклического напряжения относительная стрела прогиба образца определялась как

$$\varepsilon_{с.п} = \frac{f_i}{f_0}, \quad (2)$$

где  $f_0, f_i$  – соответственно величины начальной и текущей стрелы прогиба образца в функции  $N$  числа циклов нагружений. Кинематические диаграммы усталостного разрушения представлялись в координатах  $\lg \varepsilon_{п.д} - \lg N$ , по которым проводилась количественная оценка длительности стадий усталостного разрушения – стадии  $N_1$  (до момента раскрытия и распространения усталостной трещины), и стадии  $N_{тр}$  распространения усталостной трещины (с момента раскрытия трещины до полного её распространения по сечению образца).

### Результаты исследований

Результаты испытаний на статическое растяжение предварительно деформированных образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики образцов в зависимости от  $\varepsilon_{п.д}$

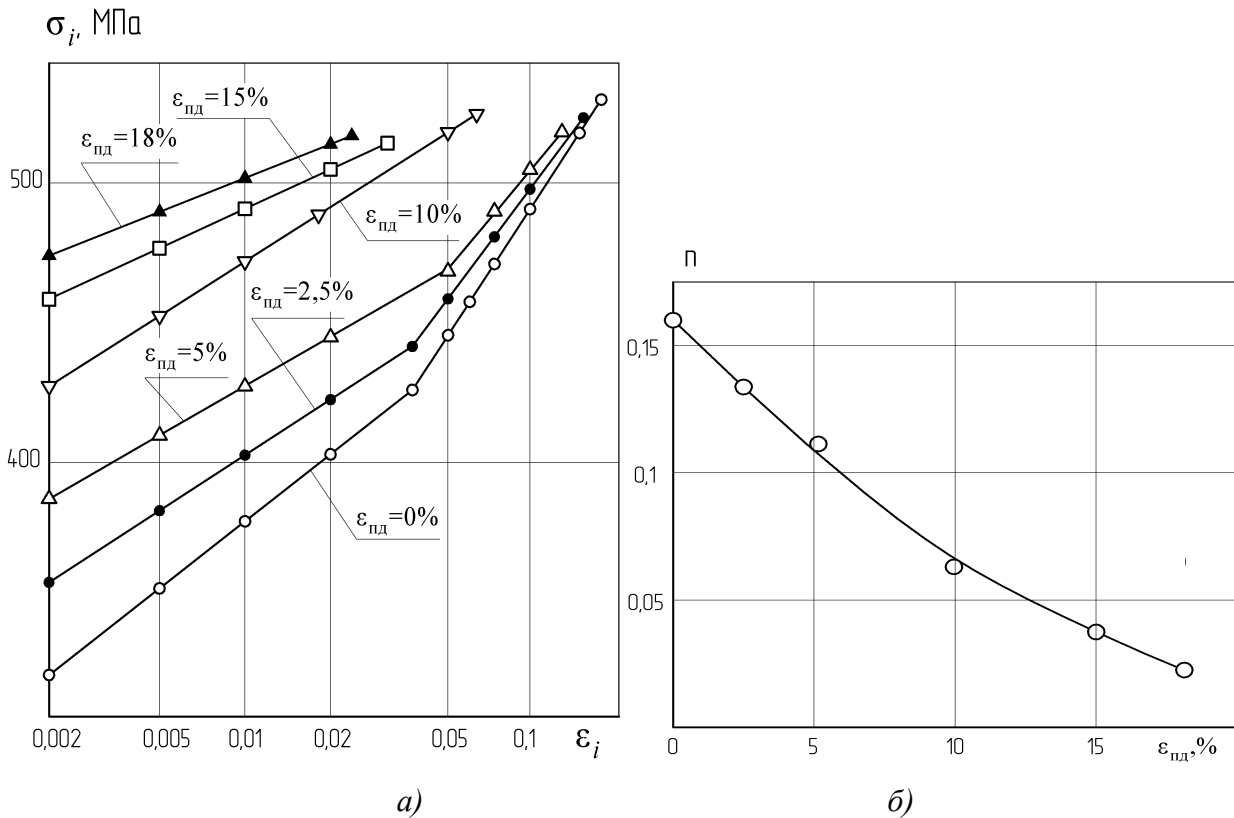
Механические характеристики	Степень предварительной деформации $\varepsilon_{п.д}$ , %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\sigma_B$ , МПа	436	454	464	490	515	520
$\sigma_{0,2}$ , МПа	322	364	390	425	446	460
$\delta$ , %	24,5	22,3	20	14,2	10,5	8,5

Из табл. 1 видно, что пластическая деформация приводит к упрочнению стали, т.е. к росту прочностных и снижению пластических характеристик. Предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  соответственно возрастают в 1,19 и в 1,43 раза, а полное относительное удлинение  $\delta$  снижается в 2,9 раза. При этом эффект упрочнения наиболее полно оценивается показателем деформационного упрочнения  $n$ . Показатель  $n$  является структурно-чувствительной характеристикой материалов: он зависит от типа кристаллической решетки (у сплавов с ГЦК решеткой его величина обычно выше, чем у сплавов с ОЦК и ГПУ решетками), от содержания примесей и легирующих элементов, а также от предшествующей обработки при выплавке, пластической деформации и термической обработке. Показатель деформационного упрочнения  $n$  с увеличением прочности сплава, как правило, уменьшается. Кривые упрочнения, представленные в логарифмических координатах  $\lg \sigma_i - \lg \varepsilon_i$ , и изменение показателя  $n$  в функции степени предварительной деформации приведены на рис. 1. Уравнения кривых упрочнения, выведенные методом корреляционного анализа, имеют общий вид

$$\lg \sigma_i = \lg \sigma_0 + n \lg \varepsilon_i. \quad (3)$$

Параметры этих уравнений и величина показателя  $n$  в зависимости от степени предварительной деформации  $\varepsilon_{п.д}$  представлены в табл. 2. Из рис. 1 и табл. 2 видно, что с ростом степени предварительной деформации  $\varepsilon_{п.д}$  кривые деформационного упрочнения располагаются выше, а величина структурно – чувствительного показателя  $n$  монотонно снижается – с увеличением  $\varepsilon_{п.д}$  от 0 до 18% показатель деформационного упрочнения  $n$  снижается в 7,3 раза. Таким образом, предварительная пластическая деформация растяжением приводит к

росту прочностных, падению пластических характеристик и снижению деформационной способности исследуемых образцов.



**Рис. 1. Кривые упрочнения (а) и изменение показателя деформационного упрочнения  $n$  (б) от степени предварительной деформации растяжением**

**Таблица 2**

**Параметры уравнений кривых упрочнения и показатель  $n$  от  $\epsilon_{п.д.}$**

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д.}$ , %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \sigma_0$	2,582	2,829	2,818	2,798	2,768	2,737
$n$	0,161	0,135	0,114	0,061	0,041	0,022
$r$	0,982	0,978	0,987	0,989	0,992	0,988

Примечание:  $r$  - коэффициент корреляции.

Предварительная пластическая деформация, упрочняя металлические материалы, неоднозначно влияет на их усталостные характеристики [1, 2]. Сопротивление циклическим нагрузкам (сопротивление усталости) определяется комплексом действующих внешних и внутренних факторов. Между прочностными и пластическими характеристиками, определяемых при стандартных испытаниях на растяжение, и характеристиками сопротивления усталости существуют определенные корреляционные зависимости. При изготовлении многих металлоизделий в качестве формообразующей операции применяется холодная пластическая деформация, сопровождающаяся изменением микро- и субмикроструктуры, наклепом и накоплением повреждаемости. Во многих случаях прослеживается корреляция предела усталости и прочностных характеристик: повышение предела прочности, предела текучести (при легировании, термической обработке) приводит и к повышению предела усталости, в то же время снижение пластических характеристик может ухудшать усталостные характеристики,

к которым, кроме предела усталости, можно отнести и тангенсы углов наклона кривой усталости в координатах «амплитудное напряжение цикла – число циклов до разрушения». Холодная пластическая деформация повышает прочностные характеристики, но уменьшает пластические, а также и скорость деформационного упрочнения. Поэтому зависимости усталостных параметров от степени предварительной деформации немонотонны и неоднозначны. Кривые усталости строились в логарифмических координатах  $\lg \sigma - \lg N$ , уравнения которых имеют общий вид

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \beta \lg N, \tag{4}$$

где  $\beta$  - тангенс угла наклона кривой усталости, характеризующий интенсивность накопления циклических повреждений.

Параметры уравнений кривых усталости, а также величины пределов усталости  $\sigma_{-1}$  на базе испытаний  $N = 10^7$  циклов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры уравнений кривых усталости и изменение  $\sigma_{-1}$  от  $\epsilon_{п.д}$

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д}$ , %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \sigma_0$	3,114	3,593	4,210	4,324	4,408	4,751
$\beta$	0,111	0,273	0,315	0,328	0,342	0,410
$\sigma_{-1}$ , МПа	240	200	215	235	240	225
$r$	- 0,985	- 0,984	- 0,979	- 0,968	- 0,974	- 0,968

Примечание:  $r$  – коэффициент корреляции.

На рис. 2 показаны зависимости изменения  $\sigma_{-1}$  и показателя  $\beta$  в функции степени предварительной деформации  $\epsilon_{п.д}$ . Из рис. 2 видно, что зависимости изменения показателя  $\beta$ , характеризующего интенсивность накопления циклических повреждений, и предела усталости  $\sigma_{-1}$  на базе испытаний  $N = 10^7$  циклов от степени предварительной деформации  $\epsilon_{п.д}$  можно разделить на три участка: первый участок  $\epsilon_{п.д}$  изменяется от 0 до 5%; второй –  $\epsilon_{п.д}$  изменяется от 5 до 15%, третий участок  $\epsilon_{п.д} > 15\%$ .

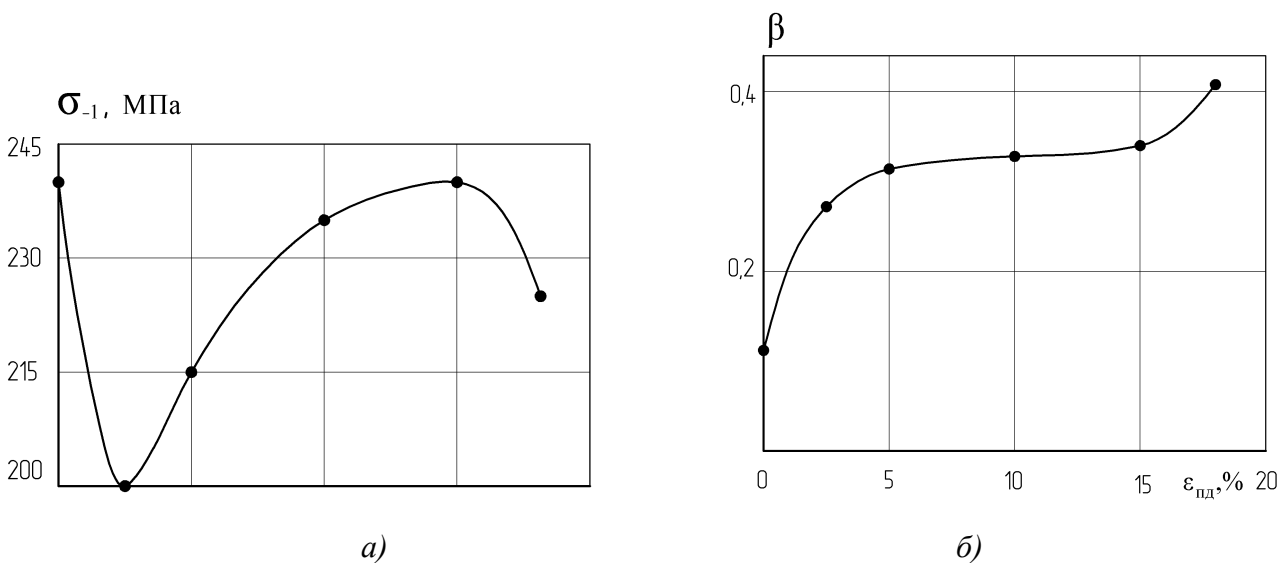


Рис. 2. Изменение предела усталости  $\sigma_{-1}$  (а) и показателя  $\beta$  (б) в зависимости от  $\epsilon_{п.д}$

Первый участок характеризуется резким увеличением показателя  $\beta$ , величина которого  $\beta = 0,315$  при  $\varepsilon_{п.д.} = 5\%$  в 2,84 раза выше, чем у недеформированных образцов, и снижением предела усталости до минимума  $\sigma_{-1} = 200$  МПа при  $\varepsilon_{п.д.} = 2,5\%$  (по сравнению с недеформированными образцами  $\sigma_{-1}$  снижается на 20%), что может быть связано с возникновением повреждаемости в наиболее слабых поверхностных зернах металла, с характером и уровнем внутренних остаточных напряжений, степенью неоднородности пластической деформации [1, 2].

На втором участке рост показателя  $\beta$  существенно замедляется (при  $\varepsilon_{п.д.} = 15\%$   $\beta = 0,342$ , то есть на 8,6% больше, чем у образцов, деформированных на  $\varepsilon_{п.д.} = 5\%$ ), а предел усталости непрерывно возрастает и при  $\varepsilon_{п.д.} = 15\%$  достигает максимума  $\sigma_{-1} = 240$  МПа, что соответствует пределу усталости недеформированных образцов.

Падение  $\sigma_{-1}$  до 225 МПа и дальнейший рост показателя  $\beta$  до 0,41 при  $\varepsilon_{п.д.} = 18\%$  предопределяет ухудшение усталостных характеристик на третьем участке, которое очевидно обусловлено возникновением в процессе пластического деформирования растяжения дефектной структуры, когда в локальных объемах металла с критической плотностью дислокаций зарождаются субмикроскопические трещины, инициирующие при циклическом нагружении развитие микропластических деформаций и снижающие сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин [3].

При этом следует отметить, что с увеличением  $\varepsilon_{п.д.}$  уменьшение показателя деформационного упрочнения  $n$  удовлетворительно согласуется с ростом показателя  $\beta$  кривых усталости, то есть снижению деформационной способности предварительно деформированных образцов соответствует рост интенсивности накопления усталостных повреждений с уменьшением амплитуд напряжений цикла  $\sigma_a$ .

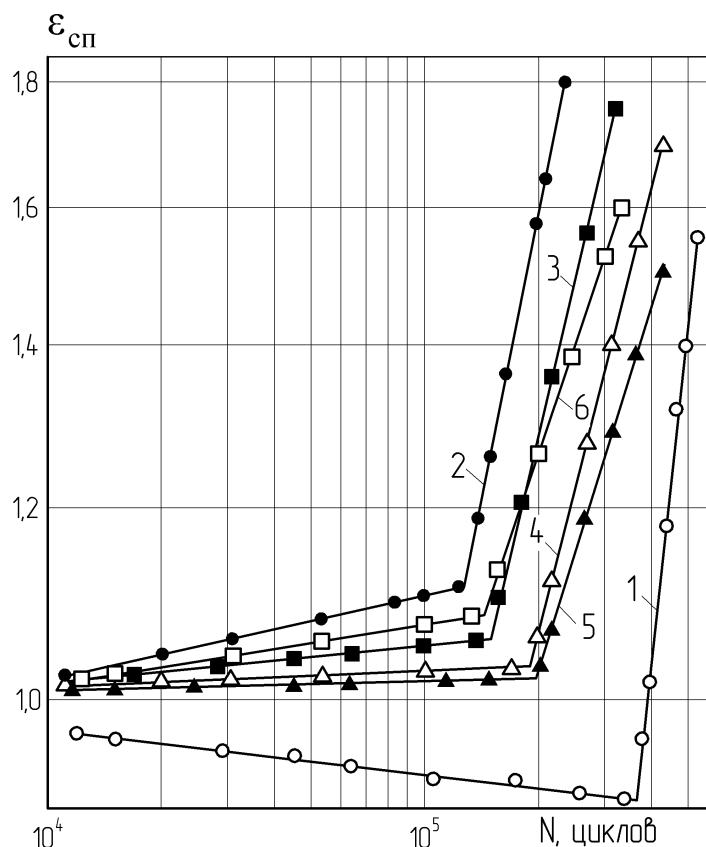
Кроме построения кривых усталости с определением предела усталости  $\sigma_{-1}$  и показателя интенсивности накопления усталостных повреждений  $\beta$ , важную дополнительную информацию о накоплении циклических повреждений с оценкой длительности распространения усталостной трещины можно получить при рассмотрении изменения стрелы прогиба образца  $\varepsilon_{с.п} = f_i/f_0$ , где  $f_0, f_i$  – соответственно величины начальной и текущей стрелы прогиба образца, в функции  $N$  числа циклов нагружений.

На рис. 3 в координатах  $\lg \varepsilon_{с.п} - \lg N$  представлены кривые  $\varepsilon_{с.п} = f(N)$  при амплитудном напряжении цикла 300 МПа. Из рис. 3 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  $N_{тр}$  распространения усталостной трещины (с момента раскрытия трещины до полного её распространения по сечению образца), которой соответствует крутой участок кривой  $\varepsilon_{с.п} = f(N)$ . При этом точке перегиба соответствует наведенная циклическим нагружением трещина, длина которой порядка 450 мкм.

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

$$\lg \varepsilon_{с.п} = \lg \varepsilon_0 \pm C \lg N_1. \quad (5)$$

Параметры этого уравнения в зависимости от величины  $\varepsilon_{п.д.}$  даны в табл. 4.



**Рис. 3. Изменение стрелы прогиба образца при  $\sigma_a = 300$  МПа в зависимости от степени предварительной деформации растяжением:**

1 -  $\epsilon_{пд} = 0$ ; 2 -  $\epsilon_{пд} = 2,5\%$ ; 3 -  $\epsilon_{пд} = 5\%$ ; 4 -  $\epsilon_{пд} = 10\%$ ; 5 -  $\epsilon_{пд} = 15\%$ ; 6 -  $\epsilon_{пд} = 18\%$

**Таблица 4**

**Параметры уравнений кривых прогиба на стадии  $N_1$  при  $\sigma_a = 300$  МПа**

Параметры уравнений	Степень предварительной деформации $\epsilon_{п.д.}$ , %					
	0	2,5	5	10	15	18
$\lg \epsilon_0$	0,0549	- 0,1299	- 0,0479	- 0,0247	- 0,0159	- 0,0915
$C$	- 0,0174	0,0346	0,0143	0,0073	0,0047	0,0243
$r^*$	- 0,985	0,976	0,967	0,981	0,968	0,973

Примечание:  $r$  – коэффициент корреляции.

Анализ результатов, представленных на рис. 3 и в табл. 4, показывает, что превалирующим процессом при циклическом нагружении недеформированных образцов является циклическое упрочнение ( $\epsilon_{п.д} < 1$ ), показатель  $C = - 0,0174$ ;  $N = 5,2 \cdot 10^5$  циклов. Предварительная пластическая деформация приводит к смене механизма, контролирующего скорость процесса усталости, так как упрочнение сменяется разупрочнением ( $\epsilon_{п.д} < 1$ ). При этом следует отметить удовлетворительное соответствие способности упрочненной структуры к циклическому разупрочнению при  $\sigma_B / \sigma_{0,2} < 1,2$  [3]. Долговечность при  $\epsilon_{п.д} = 2,5\%$  снижается до  $N = 2,4 \cdot 10^5$  циклов при значении показателя  $C = 0,0346$ . Дальнейшее увеличение  $\epsilon_{п.д.}$  от 5 до 15 % уменьшает показатель  $C$ , что соответствует увеличению долговечности предвари-

тельно деформированных образцов. Так, при  $\varepsilon_{п.д} = 5\%$  ( $C = 0,0143$ )  $N = 3,2 \cdot 10^5$  циклов, а при  $\varepsilon_{п.д} = 15\%$  ( $C = 0,0047$ )  $N = 4,45 \cdot 10^5$  циклов. Из рис. 3 видно, что долговечность недеформированных образцов в большей степени определяется длительностью стадии до момента образования усталостной трещины  $N_1$ . С увеличением степени предварительной деформации  $\varepsilon_{п.д}$  точка перегиба кривых прогиба смещается в область меньших долговечностей, что свидетельствует о снижении длительности стадии  $N_1$  и предположении о том, что долговечность предварительно деформированных образцов определяется длительностью стадии распространения усталостной трещины по сечению образца.

Результаты обработки кинетических диаграмм усталостного разрушения  $\varepsilon_{с.п} = f(N)$  с определением коэффициента  $m = N_1/N$ , определяющего относительную продолжительность стадий усталостного разрушения, представлены в табл. 5 и на рис. 4. Из табл. 5 и рис. 4 следует, что долговечность предварительно недеформированных образцов и деформированных на  $\varepsilon_{п.д} = 2,5\%$  определяется длительностью стадии  $N_1$ , которая от долговечности  $N$  составляет соответственно 69 и 54 %.

Таблица 5

Длительность стадий усталостного разрушения в зависимости от  $\varepsilon_{п.д}$ .

$\varepsilon_{п.д}, \%$	Число циклов $\cdot 10^5$ при $\sigma_a = 300$ МПа			$m$
	$N$	$N_1$	$N_{ТР}$	
0	5,25	3,65	1,6	0,69
2,5	2,4	1,3	1,1	0,54
5	3,1	1,48	1,62	0,48
10	4,18	1,9	2,28	0,45
15	4,45	1,96	2,49	0,44
18	3,4	1,45	1,95	0,42

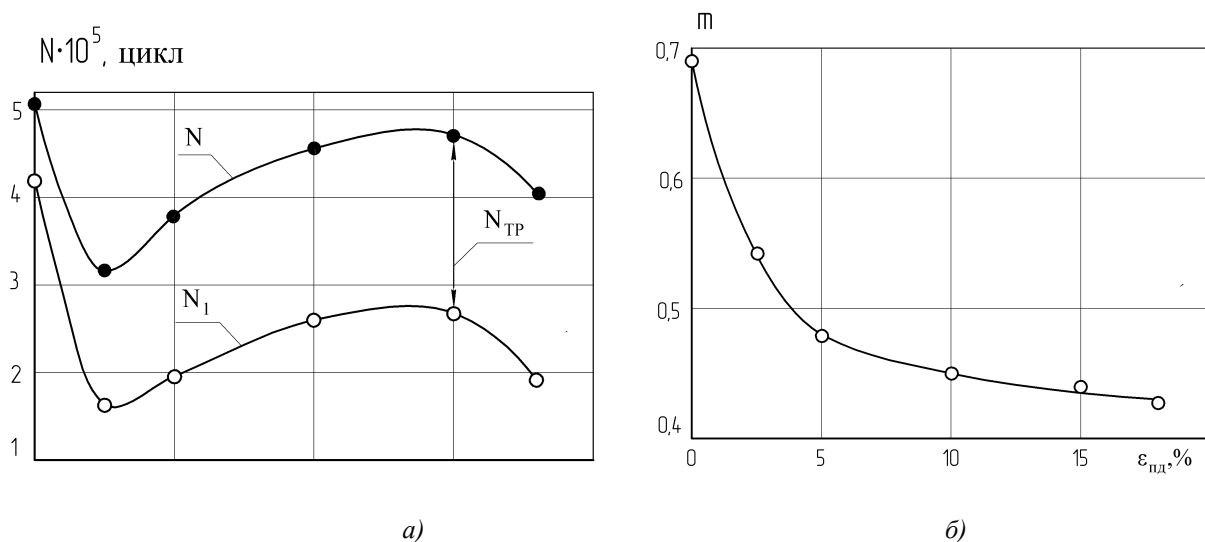


Рис. 4. Изменение длительности стадии усталостного разрушения (а) и показателя  $m$  (б) в зависимости от степени предварительной деформации растяжением:

$N$  – число циклов до полного разрушения;  $N_1$  – число циклов до момента образования усталостной трещины;  $N_{ТР}$  – число циклов распространения усталостной трещины

При этом долговечности  $N$ ,  $N_1$ , и  $N_{ТР}$  предварительно деформированных образцов на

$\varepsilon_{п.д.} = 2,5\%$  ниже, чем недеформированных соответственно в 2,2; 2,8 и 1,45 раза. При  $\varepsilon_{п.д.} > 2,5\%$  долговечность предварительно деформированных образцов определяется длительностью распространения усталостной трещины по сечению образца, и при  $\varepsilon_{п.д.} = 18\%$  длительность стадии  $N_1$  составляет всего 42% от полной долговечности образца до разрушения. С ростом степени предварительной деформации в интервале  $2,5\% < \varepsilon_{п.д.} \leq 15\%$  происходит непрерывное одновременное увеличение долговечностей  $N$ ,  $N_1$ , и  $N_{тр.}$ . По сравнению с  $\varepsilon_{п.д.} = 2,5\%$  долговечности  $N$ ,  $N_1$ , и  $N_{тр.}$  при  $\varepsilon_{п.д.} = 10 - 15\%$  возрастают соответственно в 1,74 - 1,85; 1,46 - 1,51 и 2,1 - 2,26 раза при  $m = 0,45 - 0,44$ . Очевидно, что степени деформации, соответствующие верхним пределам указанного интервала ( $\varepsilon_{п.д.} = 10-15\%$ ) являются оптимальными с позиций повышения долговечности методами холодного пластического деформирования растяжением. Увеличение степени пластической деформации выше указанного интервала снижает долговечности  $N$ ,  $N_1$ , и  $N_{тр.}$ . В последнем случае усталостная трещина возникает на ранних стадиях циклического деформирования и длительность распространения ее по сечению образца составляет порядка 60% его долговечности. Следует отметить, что превалирование длительности стадии распространения усталостной трещины в предварительно деформированных образцах связано с наличием в их структуре дефектов дислокационного характера, таких как границы субзерен, плотность дислокаций, полосы скольжения, внесенные пластической деформацией растяжения.

### Выводы

1. Установлены закономерности изменения стандартных механических характеристик (прочностных и пластических) и показателя деформационного упрочнения от степени предварительного пластического деформирования растяжением  $\varepsilon_{п.д.}$ .

2. Построены кривые усталости на базе испытаний  $N = 10^7$  циклов, на основании которых выявлено неоднозначное изменение предела усталости  $\sigma_{-1}$  и показателя интенсивности накопления циклических повреждений  $\beta$ . Зависимости изменения  $\sigma_{-1}$  и  $\beta$  в функции  $\varepsilon_{п.д.}$  соответствуют трем характерным участкам, на каждом из которых поведение  $\sigma_{-1}$  и  $\beta$  определяется структурным состоянием предварительно деформированных образцов.

3. Установлены закономерности изменения длительности периодов усталостного разрушения (циклического деформирования до момента раскрытия и распространения усталостной трещины  $N_1$  и с момента раскрытия усталостной трещины до полного ее распространения по сечению образца  $N_{тр.}$ ) в зависимости от степени предварительной пластической деформации растяжением  $\varepsilon_{п.д.}$ . Показано, что долговечность предварительно деформированных образцов при  $\varepsilon_{п.д.} > 5\%$  в большей степени определяется длительностью стадии распространения усталостной трещины  $N_{тр.}$ . Продолжительность стадии распространения усталостной трещины растет с увеличением степени предварительной деформации и при  $\varepsilon_{п.д.} = 18\%$  и составляет порядка 60% от полной долговечности образца  $N$ .

### Библиографический список

1. **Пачурин, Г.В.** Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в различных условиях нагружения / Г.В. Пачурин, А.Н.Гущин. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 138 с.



2. **Пачурин, Г.В.** Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий / Г.В. Пачурин, А.Н. Гущин; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 173 с.
3. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2002. – 287 с.

*Дата поступления  
в редакцию 09.12.2013*

**A.N. Guschin<sup>1</sup>, Y.B. Gusev<sup>2</sup>, S.V. Sozinov<sup>3</sup>**

## **BEHAVIOR OF LOW CARBON STEEL PREVIOUSLY DEFORMED UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC «GAZ»<sup>2</sup>,  
Volga state academy of water transport<sup>3</sup>

**Purpose:** To establish patterns of change in mechanical properties under static loading and fatigue fracture parameters on the rate of preliminary plastic deformation by stretching.

**Methodology:** Experimental and analytical research methods are used.

**Results:** The patterns of changes in the mechanical characteristics under static loading and fatigue fracture parameters on the rate of pre-tensile strain have been installed.

*Key words:* deformation, fatigue, cyclic damage, strength, plasticity, periods of destruction, hardening.