

УДК 621.791.14

С.Ю. Смоленский, Р. И. Якимов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ СОЕДИНЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ, ИЗ ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования усталостной прочности сварных соединений, полученных конвенционной сваркой трением, из прецизионного сплава 36НХТЮ. Построение кривой усталости и определение предела выносливости сварных соединений выполнялось с применением многообразцового метода и метода ускоренной оценки – Локати.

Установлено, что сварка трением позволяет получать качественные соединения из прецизионных сплавов, работоспособные в условиях циклического нагружения. Исследования показали, что для рассматриваемых условий ускоренный метод ступенчатого нагружения Локати дает вполне удовлетворительную точность при определении предела выносливости и может быть использован для сварных соединений, выполненных сваркой трением из данных сплавов.

Ключевые слова: усталостные испытания, сварка трением, предел выносливости, метод Локати

Среди работ, посвященных исследованию сопротивления усталости соединений, полученных сваркой трением, большинство работ относится к соединениям, выполненным из различных марок низкоуглеродистых, углеродистых и легированных конструкционных сталей. Данные для соединений из прецизионных сплавов отсутствуют. В то же время надежность и долговечность многих машин и приборов, в которых применяются элементы из прецизионных сплавов, в значительной степени определяются сопротивлением усталости этих элементов.

Определение предела выносливости сварных соединений из прецизионного сплава 36НХТЮ [1], полученных сваркой трением, производилась двумя методами: обычным многообразцовым (длительным) методом и методом ускоренной оценки выносливости – Локати [2]. В последние годы проблемы ускоренного определения предела выносливости приобретают особое значение, так как на предприятиях и в проектных организациях часто отсутствует возможность в проведении длительных и дорогостоящих испытаний на усталость. В тоже время развитие современной техники требует решения круга вопросов, подлежащих исследованию в области усталостных испытаний. Метод Локати среди ускоренных методов усталостных испытаний занимает особое место благодаря более высокой точности и производительности.

При испытаниях на усталость применялась схема нагружения: растяжение – сжатие с мягким нагружением, характерная для эксплуатационных условий работы деталей. Использовался асимметричный цикл напряжений с однозначным изменением величин напряжений, с постоянными амплитудными значениями напряжений при синусоидальной (гармоничной) форме цикла (рис. 1). Коэффициент асимметрии R цикла при испытаниях составлял $R=1/3$, частота нагружения $f=1000$ цикл/мин. Испытания проводились на испытательной машине с гидравлическим пульсатором ЦД-10.

Для определения предела выносливости σ_R соединений и основного металла применялись гладкие образцы круглого профиля типа II с рабочей частью по ГОСТ 23026 (рис. 2), изготовленные из сварных соединений, полученных сваркой трением, и цельного прутка из сплава 36НХТЮ [1].

Сварка выполнялась на режиме, обеспечивающем получение качественных сварных соединений в условиях воздействия статических нагрузок. При испытании на статическое растяжение сварные образцы разрушались по основному металлу вдали от стыка. Угол загиба при испытании на статический изгиб составлял 180° без разрушения соединения. На данном режиме была сварена партия образцов диаметром 12 мм, состоящая из двух серий.

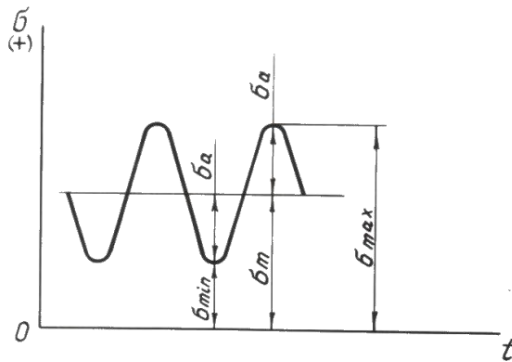


Рис. 1. Цикл напряжений

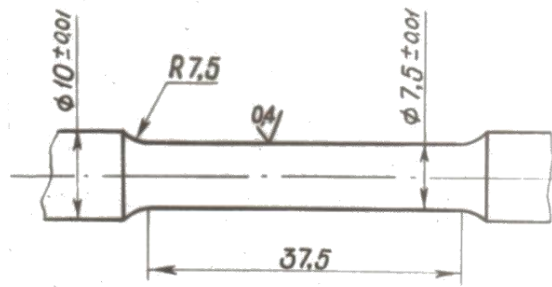


Рис. 2. Рабочая часть образца при определении предела выносливости

База испытаний N_B для сравнительных испытаний сварных и цельных образцов при определении предела выносливости и построения кривой усталости принималась согласно рекомендациям [2] равной 5×10^6 циклов. Построение кривой усталости при использовании многообразцового метода по результатам испытаний ограниченного объема образцов (10–12 шт.) производилось по методу наименьших квадратов. Ускоренные испытания ступенчато-увеличивающейся нагрузкой по Локати и обработка полученных экспериментальных данных выполнялась по методике, изложенной в работе [2]. Найденные значения предела выносливости, определенные ускоренным методом Локати (σ_R^y), для партии образцов усреднялись по формуле:

$$\bar{\sigma}_R^y = (\sum \sigma_R^y) / m \quad (1)$$

где m – число образцов в испытываемой партии.

Первая серия сварных образцов подвергалась испытаниям стандартным многообразцовым методом для определения предела выносливости с построением кривой усталости. Основным критерием при определении предела выносливости и построения кривых усталости принималось полное разрушение испытываемых образцов. Результаты длительных (многообразцовых) усталостных испытаний из сварных соединений представлены в табл. 1 и на рис. 3. Аналитической обработкой [3] результатов длительных усталостных испытаний получено следующее уравнение для кривой усталости

$$\lg N = 8,7107 - 0,7304 \cdot 10^{-2} \sigma. \quad (2)$$

$r_{\text{расч}} = -0,988$, $r_{\text{кр}} = 0,754$ при $f=5$, т. е. линейная связь статистически значима.

Таблица 1

Результаты длительных усталостных испытаний сварных образцов

Номер	Параметры нагружения			$N \cdot 10^5$, цикл	Место разрушения
	σ_{max} , МПа	σ_m , МПа	σ_{min} , МПа		
1	430,8	287,2	143,6	3,82	Основной металл
2	408,6	272,4	136,2	5,14	Основной металл
3	408,6	272,4	136,2	5,81	Основной металл
4	379,7	253,3	126,6	8,42	Основной металл
5	359,7	239,8	119,9	9,83	Основной металл
6	326,4	217,6	108,8	21,88	Основной металл
7	326,4	217,6	108,8	23,82	Основной металл
8	315,3	210,2	105,1	49,03	Основной металл
9	310,9	207,3	103,6	60,0 ^{x)}	Не разрушился
10	310,9	207,3	103,6	60,0 ^{x)}	Не разрушился
11	310,9	207,3	103,6	90,0 ^{x)}	Не разрушился
12	307,5	205,0	102,5	90,0 ^{x)}	Не разрушился

Примечание: ^{x)} – испытание прекращено.

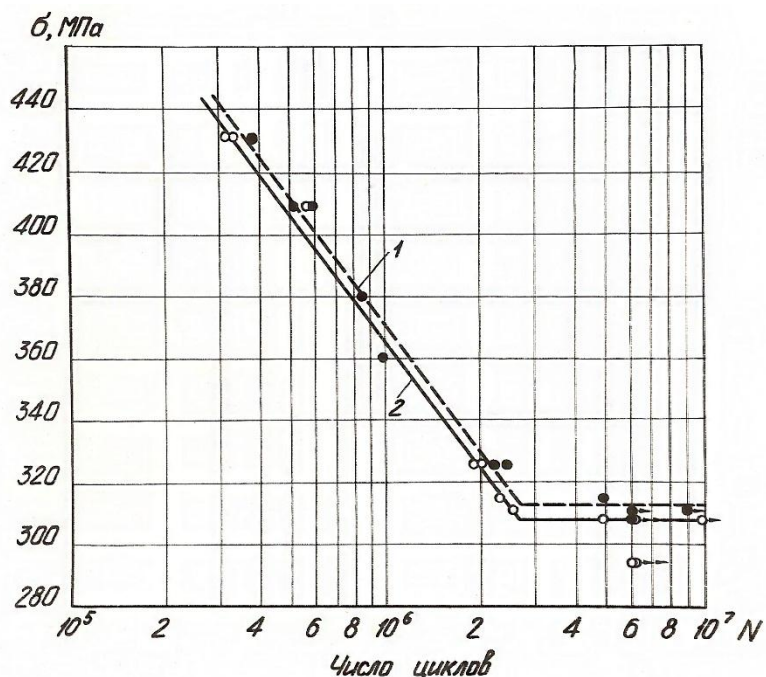


Рис. 3. Кривые усталости. Сплав 36НХТЮ:
 1 – сварные образцы; 2 – цельные образцы

Как показывают результаты длительных усталостных испытаний, разрушение образцов происходит по основному металлу, что свидетельствует о более низком значении σ_R основного металла по сравнению с σ_R сплава в зоне стыка для соединений, выполненных сваркой трением.

Полученная кривая усталости (уравнение 2) и предел выносливости $\sigma_R^D = 313,1$ МПа являются характеристиками сплава 36НХТЮ, полученными на образцах, характеризующихся наличием в них прослойки, представляющей собой сварной шов.

В табл. 2 и на рис.3 представлены результаты длительных усталостных испытаний, полученных на цельных образцах.

Таблица 2

Результаты длительных усталостных испытаний цельных образцов

Номер	Параметры нагружения			N · 10 ⁵ , цикл
	σ_{max} , МПа	σ_m , МПа	σ_{min} , МПа	
1	430,8	287,2	143,6	3,14
2	430,8	287,2	143,6	3,28
3	408,6	272,4	136,2	5,59
4	326,4	217,6	108,8	18,53
5	326,4	217,6	108,8	19,85
6	315,3	210,2	105,1	23,06
7	310,9	207,3	103,6	25,02
8	307,5	205,0	102,5	60,0 ^{x)}
9	307,5	205,0	102,5	48,76
10	307,5	205,0	102,5	100,0 ^{x)}
11	294,2	196,2	98,1	60,0 ^{x)}
12	294,2	196,2	98,1	60,0 ^{x)}

Примечание:^{x)} – испытание прекращено, образец не разрушался.

Кривая усталости описывается статистически значимым уравнением

$$\lg N = 8,6538 - 0,7253 \cdot 10^{-2} \sigma. \quad (3)$$

Расчетный коэффициент корреляции $r_{расч} = -0,988$; $|r_{расч}| > |r_{кр}|$, $r_{кр} = 0,754$ при $f = 5$. При этом предел усталости равен $\sigma_R^D = 307,5$ МПа.

Отклонение коэффициента линейной регрессии кривой усталости, полученной на сварных образцах составило 0,7%, а полученное отклонение предела выносливости σ_R^D равно

$$\Delta = \left| \frac{\sigma_{R(c)}^D - \sigma_{R(u)}^D}{\sigma_{R(c)}^D} \right| \cdot 100\% = 1,8\%, \quad (4)$$

что весьма незначительно.

Полученные результаты свидетельствуют, что наличие в образцах прослойки в виде шва, выполненного сваркой трением, в данных условиях практически не сказывается на величине предела выносливости.

Вторая серия сварных образцов была испытана на выносливость ступенчато-увеличивающейся нагрузкой по методу Локати [2]. При ускоренных испытаниях по методу Локати начальный уровень напряжения σ_0 брался из расчета $0,8\sigma_R^{ож}$ и принимался равным 236 МПа. Оптимальное значение средней скорости роста напряжений определялось по номограмме и составляло $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-5}$ МПа/цикл. Приращение напряжения при переходе на следующую ступень $\Delta\sigma = 29,5$ МПа, число циклов нагружения на ступени $n_i = 3 \cdot 10^5$.

Результаты ускоренных испытаний для определения предела выносливости по методу Локати представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ускоренных усталостных испытаний сварных образцов

Напряжение на ступени, МПа	Число циклов нагружения на ступени, $\times 10^3$		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
236,0	300	300	300
265,5	300	300	300
295,0	300	300	300
324,5	300	300	300
354,0	300	217	300
383,5	300	-	18
413,0	6	-	-

Так как разрушающее напряжение σ_p на последних ступенях меньше 500 МПа, обработка экспериментальных данных для всех образцов производится по методике обработки материалов с $\sigma_p < 500$ МПа. По номограмме по величине σ_p (для 1-го образца) определяли предел выносливости σ_R^6 условной усталостной кривой б (наиболее вероятной), число циклов N_0^6 и напряжение соответствующее долговечности в 10^5 циклов σ_{10^5} . Тангенс угла наклона левой ветви условной кривой усталости б (K_6) определяется уравнением

$$K_6 = \frac{\sigma_{10^5} - \sigma_R^6}{\lg N_0^6 - \lg 10^5}. \quad (5)$$

Полученные значения сведены в табл. 4.

В табл. 5 представлены результаты вычисления суммы $\Sigma n_i/N_i$ (отношение чисел циклов, пройденных образцом на каждой ступени нагружения до разрушения, n_i к ресурсу долго-

вечности условной усталостной кривой б на этих же уровнях напряжений N_i). Значения σ_i и n_i брались из результатов испытаний (табл. 3), значения N_0^b, σ_R^b, K_b из табл. 4.

N_i определялось из уравнения

$$\lg N_i = \lg N_0^b - \frac{\sigma_i - \sigma_R^b}{K_b}. \quad (6)$$

Таблица 4

Определение тангенса угла наклона кривой усталости б

Номер образца	σ_p , МПа	σ_{10^5} , МПа	σ_R^b , МПа	N_0^b , цикл	$\lg N_0^b$	$\lg 10^5$	K_b
1	413	413	340	$1,7 \cdot 10^6$	6,2304	5	59,3303
2	354	354	280	$1,87 \cdot 10^6$	6,2718	5	58,1852
3	383,5	383,5	310	$1,73 \cdot 10^6$	6,2380	5	59,37

Таблица 5

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой б

МПа	σ_i	$n_i \cdot 10^3$, цикл	$\frac{\sigma_i}{K_b}$	$\lg N_i$	N_i , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
	236,0	300	3,9777	7,9833	96227675	0,0031
	265,5	300	4,4749	7,4861	30626685	0,0098
	295,0	300	4,9722	6,9888	9745407	0,0308
	324,5	300	5,4694	6,4916	3101702	0,0967
	354,0	300	5,9666	5,9944	987188	0,3039
	383,5	300	6,4638	5,4972	314196	0,9548
	413,0	6	6,961	5,0	100000	0,06
$(\sum \frac{n_i}{N_i})_b = 1,4591$						

Примечание: $\sigma_R^b = 340$ МПа.

Аналогично производилось определение суммы $\sum n_i/N_i$ для условных усталостных кривых а и в (табл. 6 и табл.7). Вычисления производились при $\sigma_R^a = 1,1\sigma_R^b, \sigma_R^в = 0,9\sigma_R^b, N_0^a = N_0^b = N_0^в$ и $K_a = K_b = K_в$.

Таблица 6

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой а

σ_i , МПа	$n_i \cdot 10^3$, цикл	$\frac{\sigma_i}{K_a}$	$\lg N_i$	N_i , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
236,0	300	3,9777	8,5564	$3,6008083 \cdot 10^8$	0,0008
265,5	300	4,4749	8,0592	$1,1460406 \cdot 10^8$	0,0026
295,0	300	4,9722	7,5619	36466996	0,0082
324,5	300	5,4694	7,0647	11606466	0,0258
354,0	300	5,9666	6,5675	3694026	0,0812
383,5	300	6,4638	6,0703	1175709	0,2552
413,0	6	6,961	5,5731	374197	0,016
$(\sum \frac{n_i}{N_i})_a = 0,3898$					

Примечание: $\sigma_R^a = 374$ МПа

Таблица 7

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой в

σ_i , МПа	$n_i \cdot 10^3$, цикл	$\frac{\sigma_i}{K_b}$	$\lg N_i$	N_i , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
236,0	300	3,9777	7,4103	25721720	0,0117
265,5	300	4,4749	6,9131	8186533	0,0366
295,0	300	4,9722	6,4158	2604954	0,1152
324,5	300	5,4694	5,9186	829087	0,3618
354,0	300	5,9666	5,4214	263876	1,1369
383,5	300	6,4638	4,9242	83985	3,5721
413,0	6	6,961	4,427	26730	0,2245
$(\sum n_i/N_i)_6 = 5,4588$					

Примечание: $\sigma_R^b = 306$ МПа.

По трем суммам относительных долговечностей $(\sum n_i/N_i)_a$, $(\sum n_i/N_i)_b$ и $(\sum n_i/N_i)_c$ и соответствующим условным кривым усталости значениям пределов выносливости σ_R^a , σ_R^b и σ_R^c строили график в координатах $\sigma_R - \sum n_i/N_i$ (рис. 4). Согласно гипотезе линейного суммирования значение предела выносливости при $\sum n_i/N_i = 1$ $\sigma_R^y = 348$ МПа.

В табл. 8 представлены вычисленные аналогичным образом значения величин относительных долговечностей для остальных образцов и соответствующие им пределы выносливости, определенные путем графической интерполяции по трем точкам (рис. 4).

Таблица 8

Результаты расчета значений $\sum n_i/N_i$ и σ_R^y

Образец	Сумма относительных долговечностей			σ_R^y , МПа
	Кривая а	Кривая б	Кривая в	
1	0,3898	1,4591	5,4588	348
2	1,1599	3,5125	0,3831	311
3	0,4742	1,5774	5,250	320

Примечание: значения пределов выносливости, соответствующие условным кривым усталости а, б, в, соответственно: 374, 340, 306 МПа (обр. № 1); 308, 280, 336 МПа (обр. № 2); 341, 310, 279 МПа (обр. № 3).

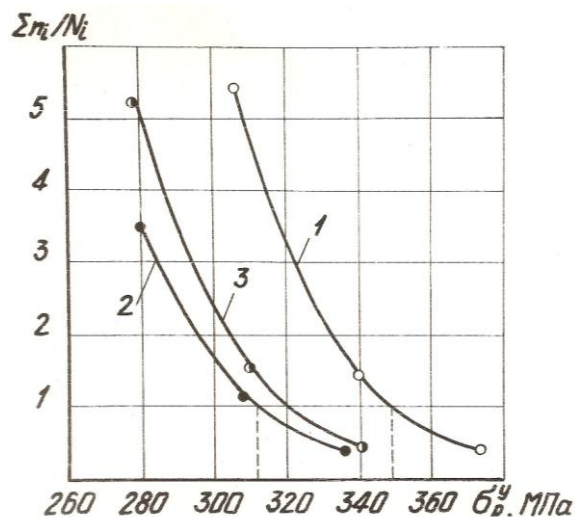


Рис. 4. График зависимости σ_R^y от $\sum n_i/N_i$:
1 – обр. № 1; 2 – обр. № 2; 3 – обр. № 3

Найденные значения σ_R^y усреднялись по формуле (1). Полученное значение $\bar{\sigma}_R^y = 326,3$ МПа является искомой оценкой предела выносливости при ускоренных испытаниях.

Результаты сравнений величин предела выносливости, определенных двумя методами, показывают, что имеет место достаточно хорошее их совпадение (313,1 и 326,3 МПа). Отклонение $\bar{\sigma}_R^y$ от σ_R^D при этом составило

$$\Delta = \left| \frac{\bar{\sigma}_R^y - \sigma_R^D}{\bar{\sigma}_R^y} \right| \cdot 100\% = \frac{326,3 - 313,1}{326,3} \cdot 100\% = 4,0\%.$$

Как видно, метод Локати дает достаточно точные результаты и этим методом можно пользоваться для определения предела выносливости соединений, выполненных сваркой трением из данных сплавов, при этом сварка трением обеспечивает получение качественных сварных соединений

Библиографический список

1. ГОСТ 14119-85.
2. Методика усталостных испытаний: справочник / под ред. Л.М. Школьника. – М.: Metallurgy, 1978. – 304 с.
3. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. – Л.: Химия, 1968. – 824 с.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2016*

S. Yu. Smolensky, R. I. Yakimov

RESEARCH OF ENDURANCE OF JOINTS OBTAINED BY FRICTION WELDING OF PRECISION ALLOYS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: Presents results of a study of the fatigue strength of welded joints obtained by conventional friction welding, precision alloy 36NHTYU.

Design/methodology/approach: The construction of the fatigue curve and the determination of the fatigue strength of welded joints were performed by the multi sample method and the Lokati method of an accelerated estimation.

Findings: It is established that the friction welding allows to obtain high-quality joints of precision alloys which can work in conditions of cyclic loading.

Research limitations/implications: For the considered conditions, studies have shown that accelerated step-loading Lokati method gives satisfactory accuracy in determining the fatigue strength and can be used for welded joints made by friction welding of these alloys.

Key words: fatigue tests, friction welding, fatigue strength, Lokati method.