



УДК 669.046:539.4.013.3

**В.В. Мыльников,**  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет»  
г. Нижний Новгород, Россия  
E-mail: mrmylnikov@mail.ru

**А.И. Пронин,**  
ФГБОУ ВО «Комсомольский –на-Амуре  
государственный университет»  
г. Комсомольск–на-Амуре, Россия  
E-mail: mdsov@knastu.ru

**О.Б. Кондрашкин,**  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет»  
г. Нижний Новгород, Россия  
E-mail: tsp-nngasu@mail.ru

**Д.И. Шетулов**  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
технический университет»  
г. Нижний Новгород, Россия  
E-mail: Schetulov@mail.ru  
Дата поступления 01.12.2021

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАЛОСТЬ ПО СХЕМЕ КОНСОЛЬНОГО ИЗГИБА С ВРАЩЕНИЕМ

### Аннотация

Проведены испытания на усталость строительной стали по схеме консольного изгиба с вращением цилиндрических образцов различных размеров. Структурным микроанализом выявлено наличие полос скольжения на поверхности образцов и определено, что образование этих полос зависит от масштаба образца: в больших образцах полосы скольжения более развиты и их интенсивность выше, чем в малых, что свидетельствует о более развитом поверхностном эффекте в первом случае. Показано, что чем сильнее развито поперечное скольжение, тем круче наклон кривых усталости к оси долговечности - сопротивление усталости больших образцов уменьшается, по сравнению с малыми, при этом масштаб образцов незначительно сказывается на стабильности работы исследованного материала.

**Ключевые слова:** строительная сталь, кривые усталости, прочность, долговечность, масштабный эффект.

### Введение

Изучение закономерностей сопротивления усталости конструкционных материалов имеет первостепенное значение при прогнозировании прочности, долговечности и остаточного ресурса деталей машин и конструкций [1-3]. На прочностные параметры сплавов при усталостных испытаниях влияют многие факторы, такие как температура, асимметрия нагружения, масштабный эффект, частота, шероховатость поверхности, концентрация напряжений и

т.д., при этом каждый фактор может испытывать комплексное взаимодействие, действующих одновременно с ним, других факторов, которые могут как усиливать его действие, так и ослаблять или вообще исключать его влияние на развитие процесса повреждений [4-7]. При тщательном изучении характеристик изменения показателей сопротивления усталости с одновременным учетом всех факторов и различных схем нагружений возникают значительные труд-

ности, поэтому удобнее разбить этот процесс на экспериментально-теоретическое изучение отдельных факторов.

### Схема нагружения при испытаниях на усталость

Существует большое количество различных схем нагружения при испытаниях на усталость [8-11], наиболее распространенными являются испытания, осуществляемые по схемам представленных на рисунке 1.

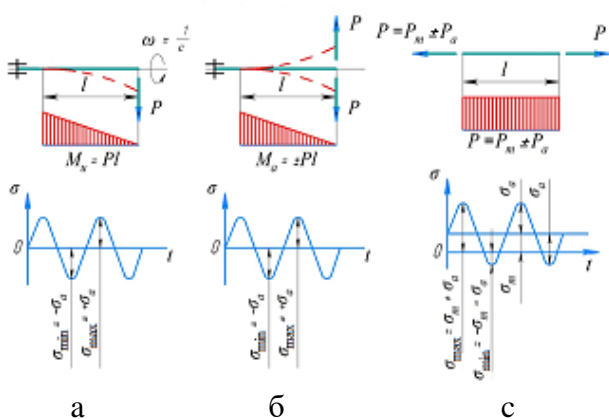


Рисунок 1. Схемы нагружения образцов при испытаниях на усталость:

- а – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца;
- б – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца;
- с – осевое растяжение по пульсирующему циклу

В представленной работе испытания проводили по схеме консольного изгиба вращающегося цилиндрического образца показанной на рис. 1,а. Циклические испытания механических свойств материалов имеют важное значение, поскольку большинство деталей машин и конструкций в процессе эксплуатации претерпевают воздействие знакопеременных нагрузок [12]. Переменную нагрузку описывают с помощью закона (графика) нагружения. Нагружение может быть нерегулярным, случайным или подчиняться определенному правилу. Идентичное повторение нагрузок в течении постоянных интервалов времени, называемых периодами, характерно для периодического нагружения, т.е. цикличе-

ского. Под действием циклически изменяющихся переменных напряжений или деформаций происходит процесс постепенного накопления повреждений, приводящий к критической степени искажения кристаллической решетки в отдельных объемах (зернах) вследствие протекания микропластической деформации, к созданию локальных пиковых деформаций, имеющих возможность вызвать разрыв межатомных связей, к образованию зародышевых усталостных микротрещин их развитию и последующего разрушения материала [13-15].

### Материал исследования

В данной работе исследованиям на циклическую прочность была подвергнута сталь марки Ст 3 – основной стали, применяемой в строительстве. Без стали Ст 3 пока невозможно строить, возводить подземные и наземные коммуникации, производить транспорт, необходимые станки и агрегаты. Из данной разновидности сырья получают стальной лист, круг, балку, шестигранник, швеллер, – т.е. самые востребованные продукты черного металлопроката.

Характеристики и свойства исследуемой стали представлены в таблицах 1-4:

Таблица 1  
Характеристики стали Ст 3

Марка:	Ст3сп
Классификация:	Сталь конструкционная углеродистая обыкновенного качества
Дополнение:	По ГОСТ 27772-88 сталь Ст3сп5 соответствует стали для строительных конструкций С245; сталь Ст3сп соответствует стали С285
Применение:	Несущие элементы сварных и несварных конструкций и деталей, работающих при положительных температурах, арматура класса Ат400С

Стоит отметить, что одним из основных раскислителей при выплавке сталей на сегодня является кремний. По сути, этот элемент и определяет тип стали. В полуспокойных сталях его содержание доходит до

0,10 %, тогда как в спокойных – до 0,40 %. Кремний увеличивает прочность феррита, почти не снижая его пластичности, при концентрации в сплаве до 0,30 % - полностью растворяется. Известно, что содержание данного элемента в большем объеме (более 0,40 %) только ухудшает отмеченные стали 3 характеристики. В сочетании с марганцем или молибденом кремний обеспечивает сплаву высокую закаливаемость, увеличивает предел упругости и предел текучести, сообщает устойчивость к воздействию перепадов температур. Именно плотность стали 3, раскисленная и обогащенная подобным образом обуславливает ее востребованность и широкий спектр применения.

### Методика испытаний

Цилиндрические образцы пятикратной длины относительно диаметра испытывались на усталость на установке, в которой

действует схема изгиба вращающегося образца. Конструкция установки представлена на рис. 2.

Образец 1 зажимается в цанговый захват 2 промежуточной опоры, которая соединена с электродвигателем 3 через резиновую муфту 4. Свободный конец образца вставляется в подшипник 5, который расположен в опоре нагружающего устройства 6. Нагрузка образца осуществляется с помощью грузов 7. При помощи тросика 8, перекинутого через блок 9, усилие передается на опору. На валу электродвигателя укреплен кулачок, связанный с электромагнитным счетчиком числа оборотов двигателя. Имеющийся в установке стоп-механизм 10 и счетчик количества оборотов электродвигателя позволяет фиксировать текущее количество циклов до разрушения образца.

Таблица 2

Химический состав в % стали Ст 3

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0.14 - 0.22	0.15 - 0.3	0.4 - 0.65	до 0.3	до 0.05	до 0.04	до 0.3	до 0.008	до 0.3	до 0.08

Таблица 3

Технологические свойства стали Ст 3

Свариваемость:	без ограничений
Флокеночувствительность:	не чувствительна
Склонность к отпускной хрупкости:	не склонна

Таблица 4

Механические свойства при T=20°C стали Ст 3

Сортамент	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta$
Прокат, ГОСТ 535-2005	320	220	26

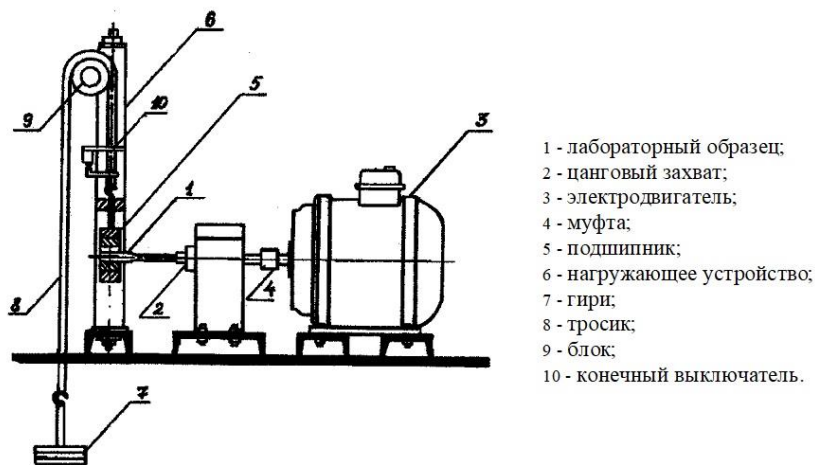


Рисунок 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для испытания металлов на усталость по схеме изгиб вращающегося образца

Перед началом испытаний в месте предполагаемого излома снимаются размеры поперечного сечения, которые заносятся в протокол. При испытании первого образца назначается напряжение, равное 2/3 от предела прочности испытуемого материала. Гири плавно кладутся на поддон после определения абсолютной нагрузки и начала вращения образца. После полной наработки электродвигатель автоматически отключается и фиксируется количество циклов. Данные заносятся в протокол испытаний.

Каждый последующий образец испытывается при напряжении меньшем, чем предыдущие, на 100÷200 МПа и т.д. У места предполагаемого излома кривой усталости изменение напряжения уменьшается до 50÷30 МПа для более точного определения его места на кривой усталости, построенной в логарифмических координатах.

Для построения уравнений кривых усталости и обработки полученных результатов использовали методы математической статистики. С целью спрямления аппроксимирующих линий экспериментальных данных для построения кривой усталости применили логарифмические координаты в уравнении:

$$\lg \sigma = (\lg \sigma)_0 - \operatorname{tg} \alpha_w \lg N, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение при достижении соответствующего  $N$ ;  $\sigma_0$  – напряжение при  $N=1$ , отсекаемое линией кривой усталости;  $N$  – количество циклов нагружения до разрушения (долговечность).

Наклона кривой усталости  $\operatorname{tg} \alpha_w$  к оси количества циклов  $N$ , определяли по соотношению:

$$\operatorname{tg} \alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – циклическое напряжение;  $N$  – количество циклов.

Значения величин  $(\lg \sigma)_0$  вычисляли по формулам:

$$(\lg \sigma_0)_0 = \overline{\lg \sigma} - \kappa_\beta \overline{\lg N}, \quad (3)$$

где  $\overline{\lg \sigma}$  – среднее значение по логарифму напряжения,  $\overline{\lg N}$  – среднее значение по логарифму количества циклов, которые считали следующим образом:

$$\overline{\lg \sigma} = \frac{\sum \lg \sigma}{n}; \quad \overline{\lg N} = \frac{\sum \lg N}{n}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в выражение (3) получим:

$$(\lg \sigma_0)_0 = \frac{\sum \lg \sigma - \kappa_\beta \sum \lg N}{n}, \quad (5)$$

Дисперсию по  $\lg \sigma$  и  $\lg N$  определяли по выражению:

$$S_{\lg N} = \frac{1}{n-1} \left[ \sum \lg N^2 - \frac{(\sum \lg N)^2}{n} \right], \quad (6)$$

где  $S_{\lg N}$  – дисперсия по количеству циклов,  $n$  – число экспериментальных данных.

$$S_{\lg \sigma} = \frac{1}{n-1} \left[ \sum \lg \sigma^2 - \frac{(\sum \lg \sigma)^2}{n} \right], \quad (7)$$

где  $S_{\lg \sigma}$  – дисперсия по напряжению.

Для определения коэффициента корреляции использовали уравнение:

$$K_{\text{кор}} = \kappa_\beta S_{\lg N} / S_{\lg \sigma}, \quad (8)$$

$\kappa_\beta$  – коэффициент регрессии, который определяет наклон кривой усталости  $\kappa_\beta = \operatorname{tg} \alpha_w$ .

$K_{\text{кор}}$  – коэффициент корреляции, отображает степень сходимости построенного графика кривой усталости с полученными результатами эксперимента, который применили как показатель степени стабильности поведения исследованных сплавов.

### Результаты исследований

Испытания стали марки Ст3 показывает увеличение циклической прочности с уменьшением диаметра рабочей части образца (рисунок 3, кривая 1), т.е. с ростом абсолютных размеров образцов наклон кривых усталости увеличивается. При этом следует отметить, что при увеличении размеров образца (кривая усталости 2 на рисунке 3) в области малых значений долговечности  $N$  она имеет более высокую циклическую прочность, однако, за счет более крутого наклона левой ветви кривой усталости она опускается ниже и на базе  $N = 105$  циклов видна заметная разница в величинах ограниченных циклов усталости.

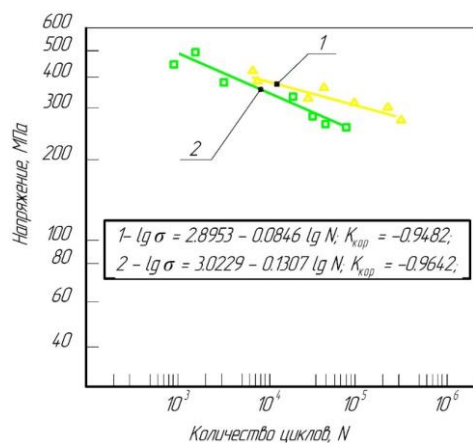
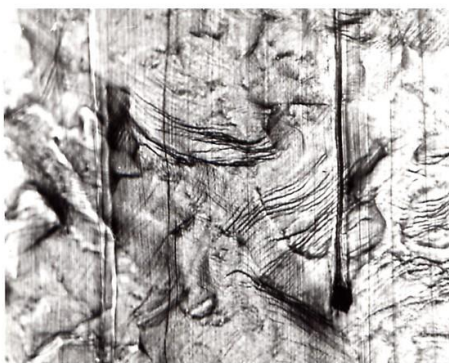


Рисунок 3. Кривые усталости образцов, изготовленных из стали Ст3:

- 1 - диаметр  $d=5$  мм;  
2 – диаметр  $d=13$  мм – изгиб вращающегося образца



а



б

Рисунок 4. Микроструктура стали Ст. 3 после циклического нагружения X450,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $N = 5 \cdot 10^4$

а – диаметр 5 мм, б – диаметр 13 мм

Эксперименты выявили наличие полос скольжения на поверхности всех испытанных образцов. Однако оказалось, что образование этих полос зависит от масштаба образца: в больших образцах полосы скольжения более развиты и их интенсивность

выше, чем в малых (рис. 4), что свидетельствует о более развитом поверхностном эффекте в первом случае. Это в свою очередь говорит о более сильно развитом поперечном скольжении в поверхностном слое больших образцов. В результате оказывается, что чем сильнее развито поперечное скольжение, тем круче наклон кривых усталости к оси  $N$  (рис. 3).

### Выводы

Таким образом, можно сказать, что шкала  $N$  связана с пластичностью. Ее уменьшение сжимает абсциссу  $N$ , и наклон кривой усталости растет, сопротивление усталости больших образцов уменьшается, по сравнению с малыми. Зарождение усталостных трещин объясняется тем, что в малых образцах полосы скольжения располагаются на большом расстоянии друг от друга, а в больших они расположены плотнее. Масштаб образцов незначительно сказывается на стабильность работы материала при знакопеременном нагружении - коэффициенты  $K_{кор}$  имеют и в том, и в другом случае имеют достаточно высокие значения.

### Библиографический список

1. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. Киев: Наукова думка, 1987. 1303 с.
2. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 479 с.
3. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Прогнозирование циклической прочности и долговечности конструкционных материалов. М: Из-во "Спутник+", 2013. 145 с.
4. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 5. С. 427-435.
5. Yasnii P.V., Maruschak P.O., Hlado V.V. Effect of Temperature, Frequency and Loading Waveform on Fatigue Crack Growth in Bimaterial of the Roll for Continuous Casting Machines // Proc. Int. Conf. «Progressive Technologies and Materials in Engineering», 28-30 June 2005, Rzeszow-Bezmiechowa, Poland. Rzeszow: RUT, 2005. P. 117-124.

6. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the Surface Damage of Pure Metals Allowing for the Cyclic Loading Frequency // Russ. J. Non-Ferr. Met. 2013. Vol. 54, No. 3. p.229–233.
7. Чернышов Е.А., Романов А.Д., Мыльников В.В. Некоторые аспекты влияния природы масштабного эффекта при циклических испытаниях на эксплуатацию и надежность изделий из алюминиевых сплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2018. № 5. С. 56-65.
8. Радон Дж. Зависимость роста трещин от частоты при усталости в условиях циклического нагружения с постоянной и случайной амплитудой // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. №2. С. 81-89.
9. Myl'nikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I., Chernyshov E.A., Pronin A.I. Fatigue Resistance Changes Of Structural Steels At Different Load Spectra // Steel in Translation. 2019. Т. 49. № 10. С. 678-682.
10. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.
11. Suresh S. Fatigue of metals. – Cambridge University Press, 2006. 701 p.
12. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений / Пер. с англ. Э.М. Лазарева, И.Ю. Шкадиной. Под. ред. Л.Р. Ботвиной. М.: Техносфера, 2010. 416 с.
13. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Пер. с англ. Под ред. Б.А. Любова. М.: Из-во «Мир», 1972. 408 с.
14. Мак Лин Д. Механические свойства металлов / Пер. с англ. Л.И. Миркина. Под ред. Я.Б. Фридмана. М.: Металлургия. 1965. 432 с.
15. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

---

*Information about the paper in English*

**V.V. Mylnikov,**  
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: mrmylnikov@mail.ru

**A.I. Pronin,**  
Komsomolsk-on-Amur State University  
Komsomolsk-on-Amur, Russia  
E-mail: mdsov@knastu.ru

**O.B. Kondrashkin,**  
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: tsp-nngasu@mail.ru

**D.I. Shetulov**  
Nizhny Novgorod State Technical University  
Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: Schetulov@mail.ru

Received 01.12.2021

PERFORMING CANTILEVER-TYPE ROTATING BEAM FATIGUE TESTS ON CONSTRUCTION STEEL

**Abstract**

Fatigue tests on construction steel were performed according to a schedule of cantilever-type rotating of cylindrical samples of various sizes. The structural microanalysis showed slip bands on the sample surface and determined that such band formation depended on the sample scale: large samples had more propagated slip bands and their rate was higher than in small samples, suggesting more evolved surface effect in the first case. It is shown that the more evolved cross slips are, the steeper slope of fatigue curves to the axis of durability is; fatigue resistance of large samples decreases as compared to small ones and the scale of the samples has a slight influence on consistency of stability of the material under study.

**Keywords:** construction steel, fatigue curves, strength, durability, scale effect.

---