

5. *Самойлович Ю. А.* Расчет затвердевания слитков // *Металлургическая тепло-техника/ Сб. науч. тр. ВНИИМТ.* – Свердловск: Metallurgizdat, 1965. – Вып. 12. – С. 114–137.

6. *Гольдфарб Э. М.* Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 439 с.

7. *Иванов В. В., Видин Ю. В., Колесник В. А.* Процессы прогрева многослойных тел лучисто-конвективным теплом. – Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1990. – 160 с.

8. *Видин Ю. С.* Инженерные методы теплопроводности. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1992. – 69 с.

9. *Кавадеров А. В., Самойлович Ю. А.* Закономерности нагрева пластины и цилиндра одновременно излучением и конвекцией // *Труды ВНИИМТ.* – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – № 6. – С. 44 – 58.

УДК 669.778

А. С. ЖЕЛТКОВ (РУП БМЗ)*

ОЦЕНКА ВИДА КРИВОЙ УСТАЛОСТИ ХОЛОДНОТЯНУТОЙ ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ, РОЛИ ЧИСТОТЫ СТАЛИ ПО ВКЛЮЧЕНИЯМ И ФАКТОРОВ ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕЕ ВЫНОСЛИВОСТИ

Усталостная выносливость армирующих элементов рукавов высокого давления и автомобильных шин играет важную роль в обеспечении ресурса их долговечности. Для работы резинотехнических изделий важно поведение армирующих элементов в многоциклового области (обычно свыше 5×10^4 циклов) [1, 8], так как база испытаний рукавов высокого давления достигает 10^6 циклов, оценки работоспособности металлокорда в шинах – 40×10^6 [7]. Наиболее распространенными схемами усталостных испытаний являются испытания на изгиб с вращением, растяжение – сжатие, кручение. В общем случае стремятся, чтобы схема испытаний была максимально приближена к схеме работы элемента в изделии.

При расчете рукавов высокого давления принято, что проволока испытывает в них преимущественно растягивающие нагрузки [2]. Поэтому наиболее адекватными для латунированной проволоки, применяемой в этих изделиях, будут испытания на циклическую выносливость при растяжении. Известно, что именно эту схему используют ведущие институты и фирмы, специализирующиеся в области проектирования и изготовления рукавов высокого давления ответственного назначения и проволоки для них, например фирма Векаерт (Бельгия) [3].

* В работе принимали участие А. М. Нагорный, Е. В. Фетищева, Т. А. Акатьева, А. В. Веденеев, О. Н. Хрол и др.

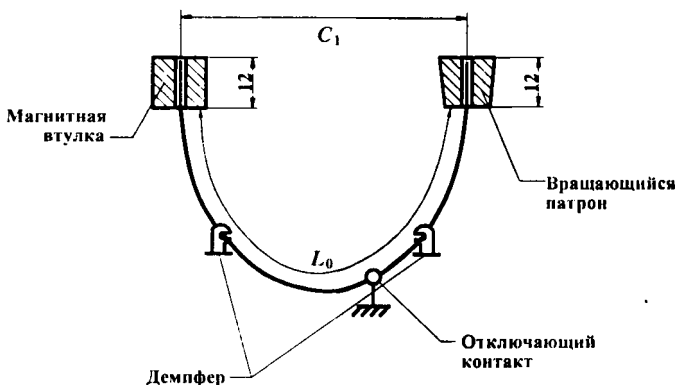


Рис. 1. Схема испытаний по методу Хантера

В то же время специалисты других фирм, например Aeroquip, Parker (США), считают возможным вести оценку усталостной выносливости проволоки также по другой схеме испытаний – изгиб с вращением по методу Хантера. Это схема с симметричным нагружением, при которой наружная часть образца подвергается циклическому растяжению – сжатию, получила широкое распространение при испытаниях металлокорда (рис. 1).

Использование указанного метода в лабораториях заводов по производству армирующих материалов для шин обусловлено, во-первых, большей долей изгибающих нагрузок при работе металлокорда в шинах и, во-вторых, простотой и относительно низкой трудоемкостью. Величина максимальных изгибающих напряжений при этом задается путем выбора длины образца L (мм) и расстояния между захватами C_1 (мм). При разрушении образца не строго посередине величину разрушающего напряжения корректируют путем умножения ее на коэффициент, зависящий от разности длин полученных отрезков образца.

Случайные погрешности при испытаниях вносятся за счет изменения температуры и влажности окружающей среды, наличия загрязнений на поверхности проволоки, а также неправильных определения длины и фиксации образцов в захватах. Для их исключения следили за поддержанием микроклимата в лаборатории, унифицировали подготовку образцов (выпрямление, очистка поверхности в ацетоне, смазка), испытания проводили два обученных лаборанта.

Оценка характеристик усталостной выносливости. Зависимость числа циклов от напряжения до разрушения (кривая Велера) может быть двух типов – с горизонтальным участком, отвечающим пределу усталости, ниже которого разрушение не происходит при сколь угодно большой продолжительности испытаний, и без него [4, 5, 8] (рис. 2).

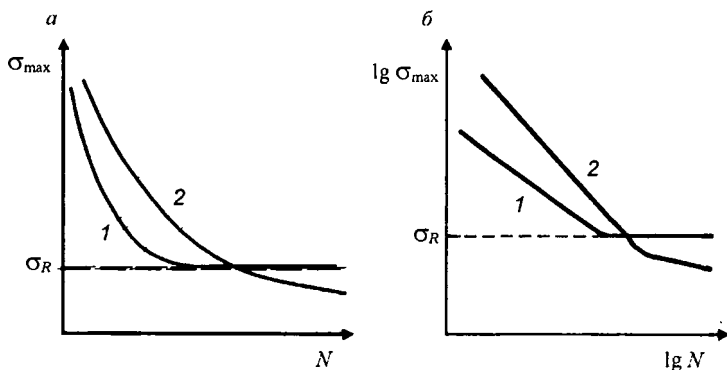


Рис. 2. Кривые усталости в различных координатах

Находят предел ограниченной долговечности (выносливости) материалов, имеющих кривые второго типа, т. е. напряжение, приводящее к разрушению после определенного числа циклов с заданной вероятностью (чаще всего 50%). Классический подход при определении предела выносливости (усталости) заключается в построении кривой Велера для заданной вероятности разрушения [8]. Этот подход крайне трудоемок для оценки усталостной выносливости в производстве, а также при проведении исследований, когда необходимо оценить влияние факторов исходного материала или режимов волочения на усталостные характеристики материала в многоцикловой области. Так, при наиболее часто используемой частоте вращения 3000 мин^{-1} для проведения одного испытания проволоки на базе 10^6 циклов необходимо 5,5 ч, а 4×10^7 циклов – 9,5 сут.

Исследователи по-разному выходят из этого положения, оценивая усталостную выносливость стальной холоднотянутой проволоки. Так, в работах [9, 11], а также ряде других использовали циклическую долговечность при заданном напряжении. Авторы работ [9, 10] строили часть кривой Велера, отвечающую исследуемому числу циклов (обычно до $5,4 \times 10^5$), в некоторых случаях предел выносливости оценивают на базе $10^5 - 10^6$ циклов. Только в работе [12], хотя и на основе относительно небольшого числа образцов, построена кривая усталости проволоки до 10^7 циклов, ее вид соответствует кривой 1 на рис. 2. Мнения о том, что стальная холоднотянутая проволока имеет предел усталости, придерживаются также авторы работ [3, 7], признавая его важной характеристикой для оценки качества проволоки.

Цель настоящей статьи – разработать приемлемый на практике экспрессный метод оценки предела усталости холоднодеформированной проволоки и на его основе оценить влияние на предел усталости чистоты стали по включениям и факторов тонкого волочения.

Из известных экспрессных методов оценки усталостной выносливости (Локати, Х. Б. Кардонского, В. И. Кудрявцева, В. Н. Пантелеева и др.) на основе предварительных испытаний признали наиболее приемлемым усовершенствованный метод Стромайера [8]. Он позволяет получить достаточно надежную оценку предела усталостной выносливости проволоки и металлокорда в многоциклового области без чрезмерного увеличения времени испытаний. Его сущность заключается в экстраполяции на ось ординат прямой регрессии, полученной из предположения, что зависимость напряжения разрушения от числа циклов имеет вид $\sigma(N^{-\alpha})$ (рис. 3).

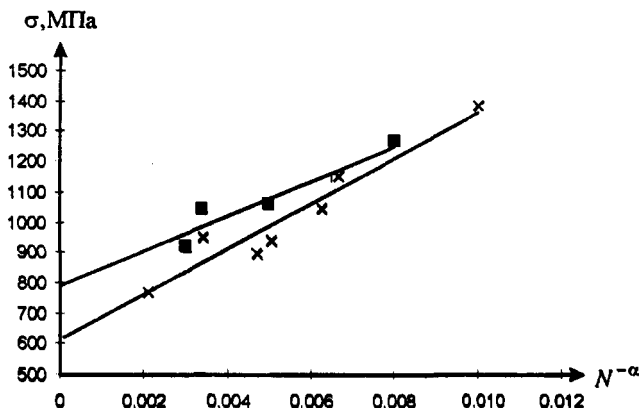


Рис. 3. Схема определения предела выносливости по методу Стромайера

Метод Стромайера базируется на предположении, что вид кривой усталости для большинства металлических материалов хорошо описывается уравнением Вейбулла [8]

$$\sigma = \sigma_{-1} + a (N + b)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости; N – число циклов до разрушения; a , b , α – коэффициенты.

Известно [5], что при испытаниях с числом циклов более 10^4 коэффициентом b можно пренебречь. В этом случае уравнение (1) можно представить в виде

$$\sigma = \sigma_{-1} + a_1 N^{-\alpha}. \quad (2)$$

Недостатком базового метода Стромайера является то, что априори задается $\alpha = 1/4$. Фактически же показатель степени кривой усталости холоднодеформированной латунированной проволоки может отличаться от этой величины, что вносит ошибку в результаты оценки предела выносливости.

Проведение эксперимента. Для определения вида кривой усталости и оценки влияния на ее характеристики чистоты стали по включениям и частых деформаций при волочении выбрана латунированная проволока диаметрами 0,175 и 0,40 мм из стали марок 70 и 80 с временным сопротивлением разрыву 2700 – 2850 МПа. Химический состав катанки дан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали, использованной в эксперименте

Плавка	Содержание элементов, % (по массе)										
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Al	O ₂	N ₂
A	0,82	0,56	0,21	0,009	0,009	0,02	0,01	0,03	0,003	0,005	0,004
B	0,82	0,53	0,21	0,009	0,007	0,02	0,01	0,01	0,003	–	0,004
C	0,74	0,48	0,17	0,005	0,008	0,02	0,02	0,04	0,002	0,005	0,005
D	0,73	0,53	0,19	0,009	0,012	0,03	0,02	0,03	0,002	0,005	0,005

Катанка плавки C имела плотность недеформируемых включений 851 см⁻², максимальный размер – 10 мкм, индекс загрязненности – 3654 мкм²/см², D – 433 см⁻², 5 мкм и 1124 мкм²/см² соответственно.

Проволоку получали по схеме:

T, B, B 5,5 – 3,15; П, T, B, B 3,15 – 1,10; П, T, Л, B 1,10 – 0,175 для марки 70;

T, B, B 5,5 – 1,90; П, T, Л, B 1,90 – 0,40 для марки 80.

Здесь T – травление, B – бурирование, B – волочение, П – патентирование, Л – латунирование.

Первоначально оценивали величину изгибающего напряжения, при котором число циклов достигает значения более 10⁴ для каждого образца путем ступенчатого (по 50 МПа) спуска от величины, составляющей примерно 0,6σ_{0,2}. При этом в каждом из последующих (уменьшающихся через 50 МПа) уровней напряжений проволоку испытывали по 3 раза, фиксируя число циклов и откорректированное разрушающее напряжение. Испытания заканчивали при напряжении, отвечающем отсутствию разрушения образцов после 5,4 × 10⁵ циклов.

Для определения степени α при числе циклов N в уравнении (2) его привели к следующему виду:

$$\ln(\sigma - \sigma_{-1}) = A - \alpha \ln N. \quad (3)$$

Величины, отвечающие напряжениям и числу циклов для трех исследуемых образцов, ввели в таблицу, на базе которой построили регрессионную модель ln(σ – σ₋₁) от ln N, используя программу Microsoft Excel.

Вместо σ_{-1} с шагом от 10 до 50 МПа подставляли значения, составляющие от 20% временного сопротивления разрыву проволоки до минимального напряжения, при котором еще имело место разрушение образцов, поскольку известно, что предел выносливости проволоки обычно составляет более 25% от прочности образца [3]. Напряжения, при которых образцы не разрушались при числе циклов более $5,4 \times 10^5$, в расчет не принимались. Для каждого значения σ_{-1} определяли соответствующие ему значения показателя степени α и коэффициента парной корреляции r^2 . Полученные результаты представлены в виде зависимости $r^2(\alpha)$ на рис. 4.

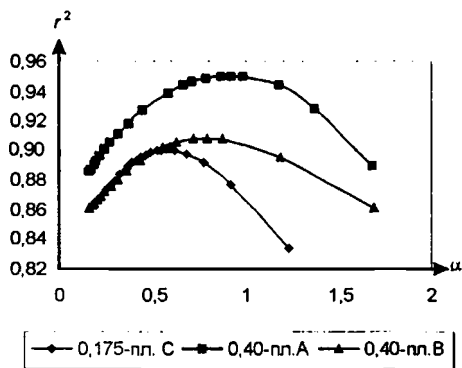


Рис. 4. Зависимость коэффициента парной корреляции r^2 от степени α

Как следует из рис. 4, наибольшие коэффициенты корреляции достигаются при $\alpha = 0,6 - 0,9$. Поэтому для определения предела выносливости σ_{-1} принято уравнение

$$\sigma = \sigma_{-1} + a_1 N^{-3/4}. \quad (4)$$

Для нахождения величины σ_{-1} строили регрессионную зависимость σ от $N^{-3/4}$ при $N \geq 10000$, при этом свободный член уравнения регрессии представ-

лял искомую величину. Для определения предела выносливости на каждом образце проводили 5 – 7 испытаний на разных уровнях напряжений, включая в расчет значения, отвечающие указанному условию. Ошибка определения величины σ_{-1} , по данным расчетной модели, как правило, не превышала 20 МПа.

Усталостная выносливость тонкой проволоки определяется чистой исходной катанки по неметаллическим включениям, наличием на проволоке обезуглероженного слоя и условиями волочения (температурно-скоростной режим, величина частных и суммарных деформаций, качество инструмента, смазки и т. д.). Исследованиями И. Лефевра и Ж. Ломбера (Beckaert) [3] показано, что для проволоки диаметром до 0,25 мм основная часть случаев усталостного разрушения происходит по неметаллическим включениям у поверхности. Для проволоки большего диаметра разрушение в большинстве случаев начинается от дефектов поверхности.

По данным И. А. Юхвеца [6], усталостная выносливость проволоки растет с увеличением суммарного обжатия, уменьшением единичных об-

жати и ростом рабочего угла волок. Полировка, рихтовка, обработка поверхности проволоки песком и дробью также способствуют повышению ее предела выносливости.

Для оценки влияния исходного материала и факторов изготовления в условиях цехов металлокорда на усталостную выносливость изготовили проволоку нескольких вариантов, различающихся чистотой исходной канатки по включениям, частными деформациями при волочении и способами дополнительной обработки проволоки в линии волочильного стана. Варианты изготовления и полученные значения предела выносливости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Варианты изготовления и результаты усталостных испытаний проволоки диаметром 0,175 мм

Плавка	Вариант изготовления	Предел выносливости, МПа
С	В 17 переходов волочения ($q_{cp}^* = 19,4\%$)	717
	В 25 переходов волочения ($q_{cp} = 13,7\%$)	775
	В 21 переход ($q_{cp} = 16,1\%$) с ЗПИР** на роликах $\varnothing 13$ мм	827
D	В 17 переходов волочения ($q_{cp} = 19,4\%$)	914
	В 21 переход ($q_{cp} = 16,1\%$) с последним обжатием 3%	1109
	В 21 переход ($q_{cp} = 16,1\%$) с ЗПИР на роликах $\varnothing 13$ мм	1116

* q_{cp} – средняя единичная деформация (обжатие) при волочении;

** знакопеременный изгиб с растяжением в рихтовках, натяжение проволоки 5 – 8 Н.

Как видно из табл. 2, чистота стали по включениям играет исключительно важную роль в достижении высокой усталостной выносливости готовой проволоки, способствует увеличению ее предела выносливости на 27 – 35% при сопоставимых условиях изготовления. Перераспределение напряжений в проволоке за счет двухплоскостной рихтовки с роликами диаметром 13 мм позволяет увеличить предел выносливости на 15 – 22%. Такой же эффект дает использование дополнительного малого обжатия величиной 3 – 5% на последнем переходе волочильного стана. Уменьшение средних единичных обжатий с 19,4 до 13,7% увеличивает предел выносливости примерно на 10%.

Исследование вида кривой усталости холоднодеформированной латунированной проволоки при изгибе с вращением по методу Хантера позволило сделать вывод, что наиболее достоверной является аппроксимация ее зависимостью вида

$$\sigma = \sigma_{-1} + a_1 N^{-3/4}.$$

На основе этой зависимости предложен метод оценки предела усталости проволоки, близкий к известному методу Стромайера [8], с помощью которого проведена оценка влияния на предел усталости чистоты катанки по неметаллическим включениям, способов дополнительной обработки проволоки в линии волочильного стана, частных деформаций при волочении.

Показано, что главным фактором повышения усталостной выносливости проволоки является снижение загрязненности ее недеформируемыми неметаллическими включениями, несколько менее значимым – перераспределение напряжений в проволоке за счет рихтовок или дробного последнего обжатия, наименьшим – уменьшение частных деформаций по всему маршруту тонкого волочения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические величины: Справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. *Ленетов В. А., Юрцев Л. Н.* Расчет и конструирование резиновых технических изделий. – Л.: Химия, 1987. – 220 с.
3. *Лефевр И., Ломбер Ж.* Металлокорд – требования и ограничения качества. – М.: Черметинформация, 1993. – 15 с.
4. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
5. *Золотаревский В. С.* Механические испытания и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1974. – 304 с.
6. *Юхвец И. А.* Волочильное производство: Ч. 1. – М.: Металлургиздат, 1954. – 272 с.
7. *Dewalue J.* Passenger and truck tyre steel cord construction for a new millennium // Proceeding of TyreTech 2000 conference. – Warsaw, 2000. – Paper 2, 7 p.
8. *Школьник Л. М.* Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
9. *Фетисов В. П., Березуев А. И.* Влияние деформационного старения на усталостное разрушение канатной проволоки // Сталь. – 1992. – № 4. – С. 57 – 59.
10. *Сухинин В. И.* Влияние остаточных напряжений первого рода на долговечность канатной проволоки // Стальные канаты. – Киев: Техника, 1972. – С. 240 – 242.
11. Влияние чистоты металла на механические свойства и циклическую выносливость высокопрочной проволоки / К. Д. Потемкин, С. И. Собкин, А. И. Михайлин и др. // Стальные канаты. – Киев: Техника. 1968. – С. 306 – 310.
12. *Takahashi T., Satoh H., Ochiai I.* Development of ultra-high strength steel wire // Nippon Steel Technical Report. – 1992. No. 53 (April). – P. 101 – 106.