

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 621.778:620.17

Куренкова Т.П., Кухаренко М.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ НА УСТАЛОСТНУЮ ВЫНОСЛИВОСТЬ МЕТАЛЛОКОРДА

**Аннотация.** В современных условиях эксплуатации машин в число основных задач выдвигается повышение прочности и долговечности. Для сохранения целостности и прочности шины требуется корд с высоким сопротивлением усталости при циклическом нагружении. Обеспечение усталостной долговечности является важной проблемой применения металлокорда. Именно поэтому вопрос о повышении усталостной прочности является актуальным для ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», в связи с чем была проведена исследовательская работа по влиянию качества стали, из которой изготовлен металлокорд, на усталостные свойства. Для определения влияния чистоты стали на усталостные свойства металлокорда были проведены сравнительные испытания циклической выносливости образцов металлокорда различных конструкций, изготовленных на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», из катанки разных производителей. Все плавки, использованные в эксперименте, имеют одинаковое содержание углерода (0,82-0,83%). Существенное различие имеют плавки обоих производителей по содержанию примесей и азота. Загрязненность стали неметаллическими включениями оценена плотностью и индексом загрязненности. Факторы метизного производства (термообработка, скорость волочения, величина частных и суммарных обжатий) при проведении анализа результатов не учитывались. Изучение усталостных свойств металлокорда проводилось с использованием метода Хантера, при котором образец подвергается циклическому изгибу с вращением при различных напряжениях до наступления разрушения. При этих условиях наружные и внутренние волокна образца подвергаются попеременно нагрузке растяжения и сжатия, создающей напряжения в проволоке. Получены результаты, подтверждающие зависимость усталостных свойств металлокорда от содержания цветных металлов и азота в стали.

**Ключевые слова:** усталость, сталь, образец, металлокорд, циклы, прочность, напряжение, катанка, жесткость.

Большое значение в исследованиях армирования автомобильных шин металлокордом придается оценке его усталостных свойств, прогнозирование рабочих характеристик по лабораторным данным. Анализ литературы показывает, что на усталостные свойства металлокорда влияет качество стали, из которой он изготовлен: чем чище сталь по содержанию примесей и неметаллических включений, тем выше его усталостная долговечность. Также известно, что на усталостные свойства проволоки и металлокорда в значительной степени влияют условия волочения: скорость, величина частных и суммарных обжатий, качество волочильного инструмента и смазки [1, 2].

При движении автомобиля и перекачивании шины, корд непрерывно испытывает циклические деформации. Под действием знакопеременных повторяющихся нагрузок металл (а в случае наших исследований – металлокорд) разрушается при напряжениях меньших, чем предел текучести. Это явление называется усталостью. Сопротивление металлов усталости характеризуют пределом усталости, т.е. тем максимальным напряжением, при котором многократное повторение циклов нагружения не вызывает разрушения образца.

Основным принципом выбора метода испытания металлокорда для определения усталостной выносливости является то, что схема испытаний должна быть

максимально приближена к схеме работы элемента в изделии. Одним из используемых методов испытания является метод Хантера – изгиб с вращением, при котором наружная часть образца подвергается циклическому растяжению – сжатию. Величина максимальных изгибающих напряжений задается путем выбора длины образца (А) и расстояния между захватами (С) (рис. 1). Результат выражается в виде величины изгибающего напряжения, при котором образец выдерживает заданное количество циклов без разрушения или количества циклов до разрушения при заданном изгибающем напряжении.

Данный метод испытаний определен технологией производства металлокорда на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”», используется с момента пуска производства и соответствует требованиям отдельных потребителей металлокорда. Он отличается простотой исполнения и относительно низкой трудоемкостью.

Для определения влияния чистоты стали на усталостные свойства металлокорда в лаборатории физико-механических испытаний были проведены сравнительные испытания циклической выносливости образцов металлокорда различных конструкций, изготовленных на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”» из катанки разных производителей (далее – производитель 1 и производитель 2). Основными отличительными особенностями катанки является то, что на заводах производителя 1 высококаче-

ственную сталь получают конвертерным способом с использованием чугуна, производитель 2 выплавляет сталь в дуговой сталеплавильной печи с применением скрап-процесса. Сталь, полученная разными производителями, имеет отличия по химическому составу и неметаллическим включениям. Было принято, что проволока из катанки обоих производителей нарабатывалась в одинаковых условиях, поэтому факторы метизного производства (термообработка, скорость волочения, величина частных и суммарных обжатий) при проведении анализа результатов не учитывались. Химический состав катанки различных производителей и характеристики неметаллических включений представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, все плавки, использованные в эксперименте, имеют одинаковое содержание углерода (0,82-0,83%). Существенное различие имеют плавки обоих производителей по содержанию примесей и азота. Так, в катанке производителя 1 содержание серы в 1,5–2 раза ниже, чем у производителя 2. Содержание меди значительно (в 5 раз) выше у производителя 2. Также у производителя 2 более высокое содержание азота в стали (0,006-0,007% по сравнению с 0,004% у производителя 1). Анализируя состав стали обоих производителей, можно предположить, что

более высокое содержание азота и примесей цветных металлов в катанке производителя 2 может привести к более интенсивным процессам деформационного старения проволоки, что окажет влияние на ее усталостную долговечность.

Загрязненность стали неметаллическими включениями оценена коэффициентами  $D_1$  (плотность неметаллических включений) – число включений на  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения образца катанки и  $D_2$  (индекс загрязненности) – площадь, занимаемая включениями на  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения катанки. Данные показатели определялись с помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного системой микроанализа. Как видно из данных табл. 1, оба коэффициента незначительно отличаются для катанки обоих производителей. Необходимо отметить, что максимальный размер включений на катанке обоих производителей составил 10 мкм. Химический состав включений имеет некоторое различие: в составе неметаллических включений производителя 2 несколько большее содержание труднодеформируемого оксида алюминия, что наглядно видно по характерным для катанки каждого производителя тройным диаграммам, представленным на рис. 2.

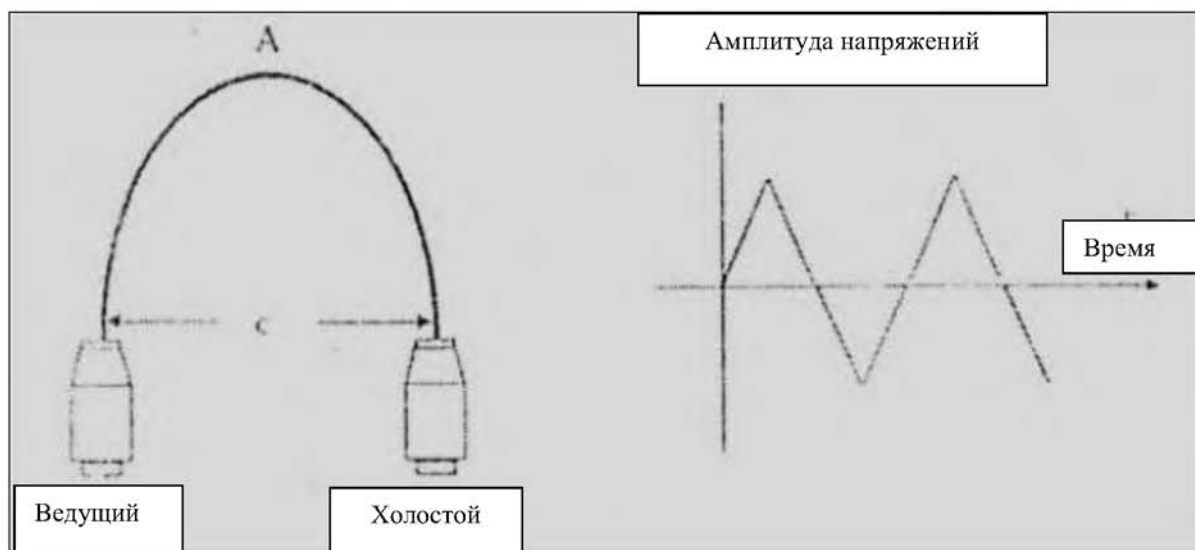


Рис. 1. Схема испытаний по методу Хантера

Таблица 1

Химический состав катанки и характеристики неметаллических включений различных производителей

Конструкция металлокорда	Производитель	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	N, %	$D_1$ , вкл/см <sup>2</sup>	$D_2$ , мкм <sup>2</sup> /см <sup>2</sup>
2+1x0,30НТ	1	0,83	0,22	0,50	0,007	0,008	0,02	0,01	0,01	0,004	518	1775
	2	0,82	0,22	0,53	0,010	0,007	0,02	0,03	0,05	0,006	360	1270
3+2x0,35СТ	1	0,83	0,24	0,50	0,005	0,008	0,02	0,01	0,01	0,004	470	1795
	2	0,83	0,22	0,56	0,012	0,007	0,03	0,03	0,05	0,007	381	1573
2x0,30СНТ	1	0,83	0,23	0,50	0,005	0,007	0,03	0,02	0,01	0,004	385	1775
	2	0,82	0,22	0,54	0,011	0,007	0,03	0,03	0,05	0,006	398	2055

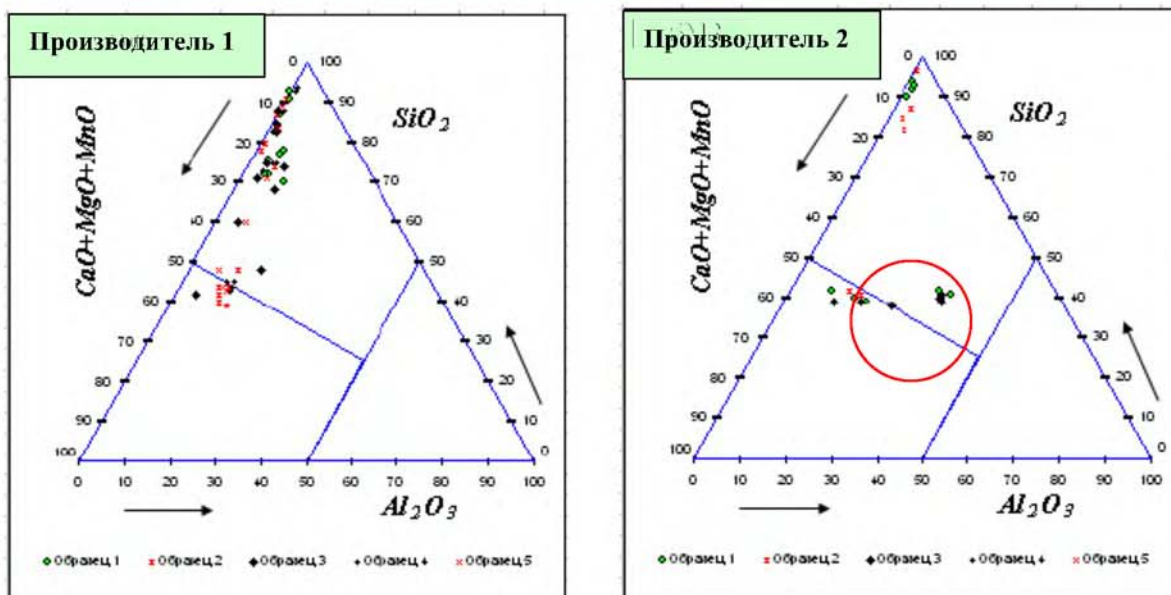


Рис. 2. Тройные диаграммы распределения неметаллических включений

Для проведения испытаний было отобрано по 2 образца металлокорда конструкций 2+1x0,30 НТ, 3+2x0,35 СТ, 2x0,30 ШТ. Усталостную прочность испытывали на приборе RBT 144 фирмы «ВЕКАЕРТ», Бельгия (рис. 3). Для получения характеристик выносливости были испытаны по два образца металлокорда (кроме конструкции 2x0,30ШТ, изготовленного из катанки производителя 1).

Отрезок корда, длина которого  $L_0$ , мм, определяется диаметром наружной проволоки металлокорда и изгибающим напряжением (формула 1), закрепляется концами в оправках испытательного прибора:

$$L_0 = \frac{2,62 \cdot E \cdot d}{S}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости стальной проволоки ( $E = 195 \text{ кН/мм}^2$ );  
 $d$  – диаметр наружной проволоки металлокорда, мм  
 $S$  – изгибающее напряжение,  $\text{Н/мм}^2$ .

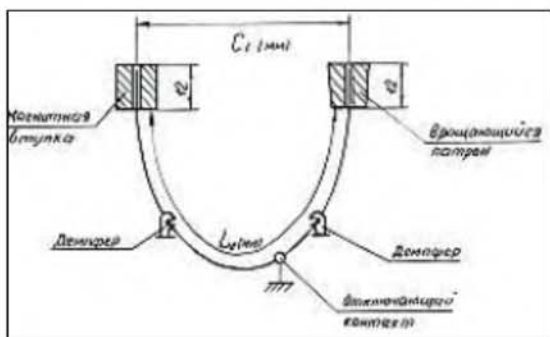


Рис. 3. Прибор для проведения усталостных испытаний RBT 144 фирмы «ВЕКАЕРТ», Бельгия

Один конец образца жестко соединяется с оправкой, а другой конец свободно вращается. При вращении оправки с жестким соединением образец металлокорда поворачивается вокруг собственной оси. При этих условиях наружные и внутренние волокна образца подвергаются попеременно нагрузке растяжения и сжатия, создающей напряжения в проволоке. Прибор снабжен счетчиком числа циклов и устройством для автоматического прерывания испытаний при разрушении хотя бы одной проволоки в металлокорде.

Суть испытания сводится к тому, что к образцу корда прикладывается изгибающее усилие и фиксируется число циклов нагружения до разрушения образца. При достижении 1 млн циклов испытание прекращается и принимается, что при данном напряжении образец не разрушился. Далее нагрузка на образец увеличивается и испытание продолжается. Для повышения точности исследования испытание при каждом уровне нагружения проводится три раза. Итоговое число циклов, выдержанных образцом при определенной нагрузке, является среднее из трех измерений.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Количество циклов нагружения до разрушения металлокорда при испытании на выносливость, тыс.

Конструкция	Производитель	Образец	Изгибающее напряжение, Н/мм <sup>2</sup>										
			850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
2+1x0,30 НТ	1	1					не разр.	632,8					
		2				не разр.	787,2	681,7					
	2	1			не разр.	970,8	659,1	544,7					
		2			не разр.	488,7	208,8						
3+2x0,35 СТ	1	1			не разр.	537,9	240,3						
		2		не разр.	672,3	605,4							
	2	1		не разр.	378,0	575,4							
		2	не разр.	800,5	280,0	171,6							
2x0,30 СНТ	1	1									не разр.	572,1	47,1
		2									не разр.	39,6	
	2								не разр.	54,0	27,3		

Как видно из данных табл. 2, образцы 1 и 2 металлокорда 2+1x0,30 НТ, изготовленного из катанки производителя 1, не разрушились при достижении 1 млн циклов при изгибающем напряжении 1050 и 1000 Н/мм<sup>2</sup>, соответственно. Образцы, изготовленные из катанки производителя 2, при напряжении 1000 Н/мм<sup>2</sup> разрушились, не достигнув 1 млн циклов.

На рис. 4 представлен график изменения числа циклов нагружения до разрушения металлокорда в зависимости от приложенного напряжения. Из рисунка видно, что при испытании в одинаковых условиях образцы металлокорда, изготовленного из катанки производителя 1 показали более высокую усталостную долговечность. Важно отметить, что зависимости, представленные на графике, не определяют вид кривой усталости, так как количество испытаний для ее построения недостаточно [2].

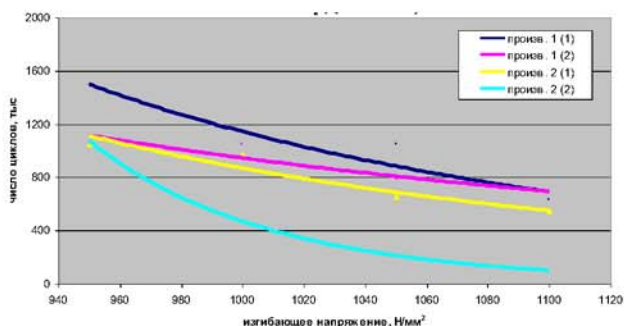


Рис. 4. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 2+1x0,30 НТ

Образцы металлокорда 3+2x0,35 СТ, изготовленные из катанки производителя 1, не разрушились при достижении 1 млн циклов при изгибающем напряжении 950 и 900 Н/мм<sup>2</sup> соответственно. Образцы, изготовленные из катанки производителя 2, при не разрушились при напряжении 850 и 900 Н/мм<sup>2</sup>. На рис. 5 представлен график зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 3+2x0,35 СТ.

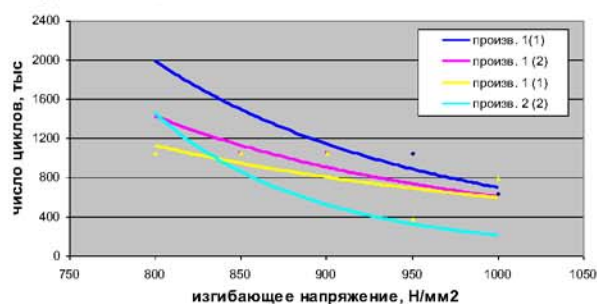


Рис. 5. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 3+2x0,35 СТ

Образец металлокорда конструкции 2x0,30 СНТ, изготовленного из катанки производителя 1, не разрушился при изгибающем напряжении 1250 Н/мм<sup>2</sup> (рис. 6). Образцы 1 и 2, полученные из катанки производителя 2, не разрушились при напряжении 1250 и 1200 Н/мм<sup>2</sup> соответственно. Однако при напряжении 1300 Н/мм<sup>2</sup> эти образцы выдержали более чем в 10 раз меньшее количество циклов нагружения, чем образец из катанки производителя 1.

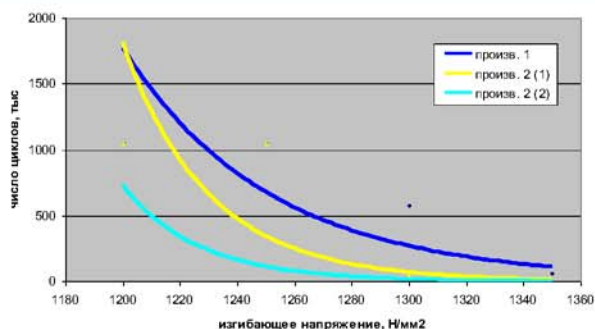


Рис. 6. График зависимости числа циклов нагружения от изгибающего напряжения для металлокорда 2x0,30 SHT

Таким образом, образцы металлокорда всех испытанных конструкций, изготовленных из катанки производителя 1, показали более высокую усталостную долговечность при проведении лабораторных испытаний. Проведенные испытания позволяют утверждать, что в лабораторных условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”» получены результаты, подтверждающие зависимость усталостных свойств металлокорда от качества стали исходной катанки, в нашем случае от ее химического состава. Вероятно, что более низкие усталостные свойства металлокорда, изготовленного из катанки производителя 2, связаны с более интенсивным протеканием процессов деформационного старения в проволоке из-за присутствия большего количества примесей. В связи с тем, что существенных отличий в катанке двух производителей по неметаллическим включениям не было выявлено, мы считаем, что данный эксперимент не является показательным для оценки влияния неметаллических включений на выносливость металлокорда. Для оценки влияния неметаллических включений необходимо испытание образцов, изготовленных из катанки с различной плотностью, размером и химическим составом.

#### Сведения об авторах

**Куренкова Татьяна Петровна** – заместитель начальника Центральной заводской лаборатории, Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”»), Жлобин, Республика Беларусь. E-mail: [zamm.czl@bmz.gomel.by](mailto:zamm.czl@bmz.gomel.by)

**Кухаренко Маргарита Анатольевна** – инженер лаборатории физико-механических испытаний производства металлокорда №2 Центральной заводской лаборатории, Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК”»), Жлобин, Республика Беларусь.

#### Выводы:

1. Проведены сравнительные усталостные испытания металлокорда конструкций 2+1x0,30HT, 3+2x0,35ST, 2x0,30SHT, изготовленного из катанки различных производителей. Анализ качества катанки двух производителей показал существенное различие по чистоте стали в части содержания примесей цветных металлов и азота.

2. Результаты испытаний показали, что металлокорд, изготовленный из катанки с минимальным содержанием цветных металлов и азота, имеет более высокие усталостные свойства.

3. Вероятной причиной различия усталостных свойств металлокорда, изготовленного из катанки различных производителей, является разная степень развития процессов деформационного старения, зависящая от чистоты исходной стали.

#### Список литературы

1. Фетисов В.П. Деформационное старение стали при волочении проволоки. Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1996.
2. Фетисов В.П. Деформационное упрочнение углеродистой стали. М.: Мир, 2005.
3. Желтков А.С. Оценка вида кривой усталости холоднотянутой латунированной проволоки при изгибе с вращением, роли чистоты стали по включениям и факторов тонкого волочения в обеспечении ее выносливости // Металлургия: научный сборник. Минск, 2002.
4. Улучшение технологии внепечной обработки кордовой стали с целью снижения содержания оксидных неметаллических включений / В.В. Эндерс, Д.С. Якшук, М.П. Гуляев, В.В. Пивцаев, В.Ю. Гуненков // Сборник научных трудов специалистов белорусского металлургического завода. Т. 3. 2009.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### STUDY OF STEEL QUALITY EFFECT ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL CORD

**Kurenkova Tatyana P.** – Deputy Head of Central Plant Laboratory, Open Joint Stock Company “Byelorussian Steel Works – management company of “Byelorussian Metallurgical Company” holding”, (OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”), Zhlobin, Belarus. E-mail: [zamm.czl@bmz.gomel.by](mailto:zamm.czl@bmz.gomel.by).

**Kukharenska Margarita A.** – an engineer of Physical and mechanical test laboratory of the steel cord production No. 2 of Central Plant Laboratory, Open Joint Stock Company “Byelorussian Steel Works – management company of “Byelorussian Metallurgical Company” holding”, (OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”), Zhlobin, Belarus.

**Abstract.** *In current conditions of machine operation, increasing the strength and durability is among the main tasks. In order to maintain the integrity and strength of the tire, the steel cord is required with a high fatigue resistance at the cyclic load. Ensuring the fatigue life is an important issue in the steel cord application. That is why the issue of increasing the fatigue strength is challenging for OJSC “BSW - management company of “BMC” holding”, in this connection research work was carried out on the effect of the quality of steel from which the steel cord is manufactured on fatigue properties. In order to determine the effect of steel purity on the fatigue properties of the steel cord, comparative tests of the cyclic endurance of steel cord samples of various constructions manufactured at OJSC “BSW - management company of “BMC” holding” from wire rod of different manufacturers were carried out. All heats used in the experiment have the same carbon content (0.82-0.83%). The heats of both manufacturers differ significantly in the content of impurities and nitrogen. Contamination of the steel with non-metallic inclusions has been estimated by density and contamination index. The factors of steel cord and wire production (heat treatment, drawing speed, the value of concrete and total reductions) have not been taken into account when analyzing the results. The study of the fatigue properties of the steel cord has been carried out using the Hunter method, in which the sample is subjected to cyclic bending with rotation at various stresses until destruction occurs. Under these conditions, the outer and inner fibers of the sample are alternately subjected to tensile and compressive loads that create stresses in the wire. Results obtained have confirmed the dependence of the fatigue properties of the steel cord on the content of non-ferrous metals and nitrogen in steel.*

**Key words:** *fatigue, steel, sample, steel cord, cycle, strength, stress, wire rod, rigidity.*

---

Ссылка на статью:

Куценкова Т.П., Кухаренко М.А. Исследование влияния качества стали на усталостную выносливость металлокорда // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 37-42.

Kurenkova T.P., Kukharenska M.A. Study of steel quality effect on the fatigue strength of steel cord. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 37-42.