

ВЛИЯНИЕ НАТЯЖЕНИЯ МЕТАЛЛОКОРДА ПРИ НАМОТКЕ НА ЕГО ПРЯМОЛИНЕЙНОСТЬ

Ю. Л. БОБАРИКИН, Ю. В. МАРТЬЯНОВ, А. В. ВЕДЕНЕЕВ*

Рассмотрены теоретические основы проблемы отклонения от прямолинейности металлокорда при промышленном производстве на канатных машинах двойного кручения. Указана актуальность предлагаемой тематики исследования.

Исследовано влияние совместного воздействия натяжения и изгиба металлокорда в узле намотки на приемную катушку канатной машины на его прямолинейность после релаксации напряжений в процессе выдержки на катушках в течение нескольких суток. Значение параметра натяжения способно оказывать влияние на распределение и величину остаточных напряжений в металлокорде на уровне изменения контактного взаимодействия между проволокой металлокорда в его конструкции (макроуровень). В процессе изгиба металлокорда на деформирующем ролике формируются напряжения изгиба, а также смещения в конструкции металлокорда, выраженные в смещении точек контакта.

Построена численная модель изгиба металлокорда простой однослойной конструкции с различным натяжением металлокорда в качестве варьируемого параметра. Диаметр деформирующего ролика выбран согласно рекомендациям предыдущих исследований. Для оценки влияния варьируемого параметра натяжения использовали предложенный комплексный критерий оценки совместно с методом локальной оптимизации. При помощи предложенных методов определено влияние натяжения металлокорда на прямолинейность металлокорда.

Проведены эксперименты по влиянию натяжения металлокорда в промышленных условиях. Получены положительные результаты по соответствию практических результатов результатам численного моделирования. На практике подтверждены результаты, полученные при численном моделировании поведения металлокорда 2х0,30НТ в условиях сложных видов напряженно-деформированных воздействий на тонкую проволоку при свивке металлокорда и дальнейшей обработке готового металлокорда в рихтовальных устройствах и при намотке на приемную катушку.

Ключевые слова: металлокорд, прямолинейность, напряжения, макропрелемещения, моделирование, натяжение, критерий.

*УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», Гомель, Республика Беларусь:

канд. техн. наук Ю. Л. Бобарикин, зав. кафедрой «Металлургия и технология обработки материалов» (МиТОМ);
Ю. В. Мартынов, аспирант кафедры МиТОМ;

ОАО «БМЗ – Управляющая компания холдинга «БМК», Жлобин, Республика Беларусь:

канд. техн. наук А. В. Веденеев, ведущий инженер-технолог Лаборатории метизного производства исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологии металлургического и метизного производства;

эл. почта: bobarikin@tut.by

© Бобарикин Ю. Л., Мартынов Ю. В., Веденеев А. В., 2019

Введение

Величина отклонения металлокорда от прямолинейности после свивки является важным технологическим параметром этого вида метизной продукции. Причиной является релаксация остаточных напряжений, вызывающая деформацию металлокорда уже после его изготовления. Важно, что остаточную деформацию металлокорда вызывают только неравномерно распределенные остаточные напряжения в объеме металлокорда [1–3]. Таким образом,

для снижения или устранения остаточных деформаций металлокорда требуется устраниТЬ, уменьшить или уравновесить остаточные напряжения в объеме металлокорда. Однако на имеющемся уровне развития металлокордного производства полное устранение остаточных напряжений в металлокорде невозможно. Поэтому задача повышения прямолинейности металлокорда после его свивки решается применением различных методов снижения и уравновешивания остаточных напряжений в объеме металлокорда. Снижать или выравнивать остаточные напряжения можно на уровне отдельной тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки, образующей конструкцию металлокорда, или на уровне контактного взаимодействия между проволокой металлокорда. Воздействие на проволоку возможно посредством оптимизации структуры металла проволоки, зависящей от его химического состава, режимов термической и деформационной обработки. Воздействие на конструкцию металлокорда возможно посредством изменения режимов его свивки. Например, использование деформаторов в узлах канатных машин перед намоткой металлокорда на приемную катушку является эффективным способом повышения прямолинейности металлокорда [4–7].

Целью данной работы было определение влияния натяжения металлокорда при намотке на его прямолинейность.

Методика эксперимента

При анализе варьируемых параметров процесса производства металлокорда была определена величина натяжения металлокорда перед его намоткой на приемную катушку как возможный фактор влияния на прямолинейность металлокорда после свивки. Этот параметр способен влиять на распределение и величину остаточных напряжений в металлокорде на уровне изменения контактного взаимодействия между проволокой металлокорда. Данное предположение можно сделать на основе того, что величина упругого растяжения витой конструкции металлокорда вызывает изменения контактного взаимодействия между отдельными проволоками металлокорда.

В исследованиях была поставлена задача изучить влияние величины натяжения металлокорда при намотке на приемную катушку на прямолинейность металлокорда после свивки. Математическое моделирование поведения металлокорда в роликовом узле перед намоткой металлокорда на приемную катушку было описано в работе [7]. Однако в данной работе не анализировали влияние натяжения металлокорда перед намоткой на приемную катушку на прямолинейность металлокорда после свивки.

Методика выполнения настоящих исследований заключалась в численном моделировании поведения металлокорда при воздействии разных натяжений при намотке с определением оптимального значения

натяжения по предложенному ранее критерию [1]. Также проводили эксперимент на действующем оборудовании с воздействием исследуемых значений усилий натяжения металлокорда перед намоткой и экспериментально определяли прямолинейность металлокорда после намотки. Далее выполняли проверку целесообразности использования предложенного ранее критерия Sg [1, 6, 7] для определения требуемого натяжения, обеспечивающего максимальную прямолинейность металлокорда.

Результаты и их обсуждение

В модели приняты допущения, которые в незначительной степени влияют на конечный результат, но позволяют вести расчеты с достаточной точностью:

- два длинномерных цилиндрических тела (проводка) диаметром 0,25 мм скручивают, образуя объемную спираль (металлокорд) с шагом спиральной линии 14 мм;
- поверхность проволок принимают абсолютно гладкой [8–10];
- две вспомогательные секущие плоскости расположены в начале и в конце шага свивки металлокорда, т. е. расстояние между ними равно шагу свивки металлокорда [8–10];
- на верхнюю и нижнюю вспомогательные секущие плоскости действует натяжение варьируемой величины: на верхнюю в направлении $+Z$, на нижнюю — $-Z$;
- полученную конструкцию металлокорда изгибают на гладком цилиндре диаметром $R = 45$ мм;
- коэффициент трения принят постоянным и равен 0,15 [8–10].

При построении модели были приняты во внимание математические зависимости, отражающие положение точек спиральной линии вокруг базисной спирали, отраженные в работах [11–14].

В моделировании влияния натяжения металлокорда перед намоткой на его прямолинейность после нее учтены эквивалентные остаточные деформации и эквивалентные остаточные напряжения, полученные в результате свивки металлокорда. Полученные в моделировании зоны пиковых напряжений

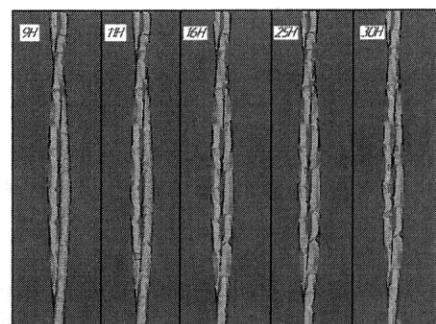


Рис. 1. Влияние натяжения металлокорда $2 \times 0,30\text{НТ}$ при прохождении через деформирующий ролик перед намоткой

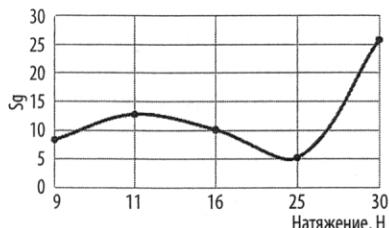


Рис. 2. Зависимость оптимизационного критерия Sg от натяжения металлокорда в узле намотки

соотносятся с зонами разрушения металлокорда [15, 16].

Конструкция металлокорда предполагает наличие точек контакта между проволоками. В процессе изгиба металлокорда на деформирующем ролике формируются напряжения изгиба, а также смещения в конструкции металлокорда, выраженные как смещение точек контакта (рис. 1).

Смещения в конструкции металлокорда, выраженные смещением точек контакта в пределах шага свивки металлокорда, вызывают его неравновесное состояние, которое приводит к появлению в его конструкции остаточных напряжений, стремящихся уравновесить конструкцию металлокорда после намотки. В результате металлокорд после намотки имеет отклонение от прямолинейности. Для снижения или устранения этого отклонения требуется приблизить состояние металлокорда к равновесному. Для этого требуется достичь условия изгиба металлокорда на деформирующем ролике, при котором смещение точек контакта и изменение эквивалентных напряжений в пределах шага свивки металлокорда минимально.

После выполнения моделирования были получены данные по напряжениям при изгибе и по осевому смещению проволок в металлокорде. Относительная разница по значениям напряжений и осевому сдвигу между текущим значением и предыдущим определяли по следующим выражениям:

$$\varepsilon\sigma_i = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\sigma_{i-1}} \cdot 100%; \quad (1)$$

$$\varepsilon\Delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{\Delta_{i-1}} \cdot 100%, \quad (2)$$

где $\varepsilon\sigma_i$ — относительная разница значений напряжений; $\varepsilon\Delta_i$ — относительная разница значений осевого сдвига; σ_i — напряжения изгиба, МПа; Δ_i — осевой сдвиг, мм.

Так как изменения напряжений и смещений связаны, но разнородны, то в мнимом пространстве всех параметров, влияющих на свойства металлокорда, их можно представить как две непараллельные плоскости. В связи с этим для обеспечения принципа

Таблица 1
Выходные модели для металлокорда 2x0,30НТ

Натяжение металлокорда, Н	Напряжения, МПа			Осьное смещение, мм			Сумма смещений, мм	Sg
	min	max	Среднее	min	max	Среднее		
9	36	282	159	0,159	0	0,0795	0,159	5,92
11	35	226	130,5	0,167	0	0,0835	0,167	22,78
16	38	238	138	-0,08	0,123	0,0215	0,203	18,34
25	39	286	162,5	-0,067	0,103	0,018	0,17	3,85
30	45	314	179,5	-0,13	0,154	0,012	0,284	6,21

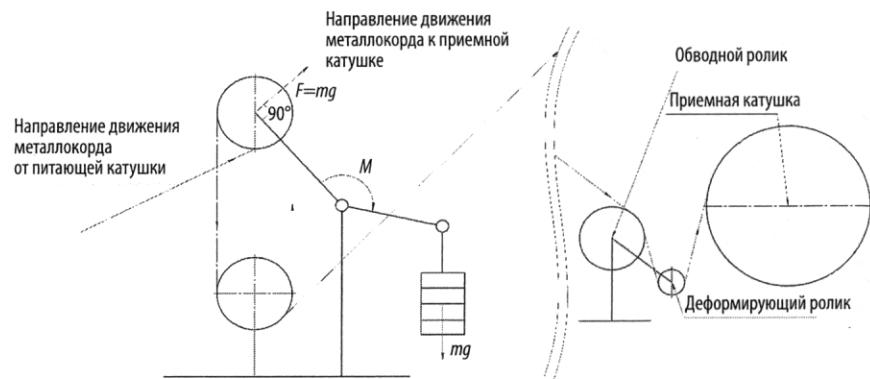


Рис. 3. Схема узла натяжения перемоточной машины

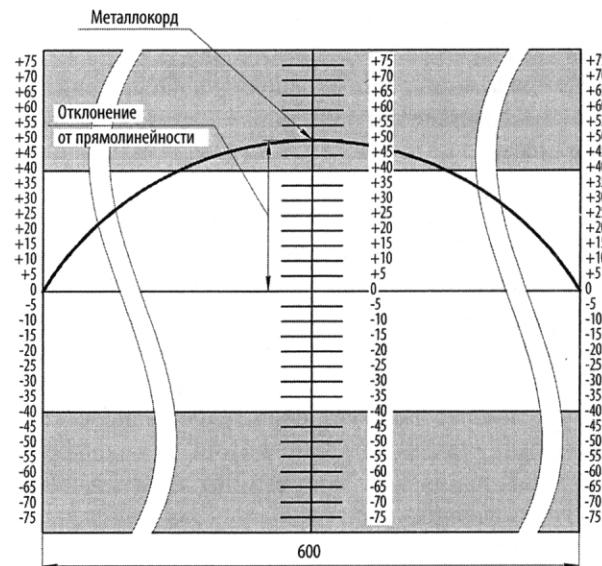


Рис. 4. Линейка для измерения величины отклонения от прямолинейности металлокорда

работы предлагаемого критерия [1] справедливо следующее:

$$\begin{cases} \varepsilon\sigma_i \rightarrow 0 \\ \varepsilon\Delta_i \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{\nabla}_n = \left(\frac{\partial \varepsilon\sigma}{\partial Sg}; \frac{\partial \varepsilon\Delta}{\partial Sg} \right); \quad (4)$$

$$|\bar{\nabla}_n| \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$Sg_i = \sqrt{\varepsilon\sigma_i^2 + \varepsilon\Delta_i^2} \rightarrow 0, \quad (6)$$

где Sg_i — скалярное значение суммы относительных изменений напряжений и смещений;

Таблица 2 Результаты измерений отклонения от прямолинейности металлокорда 2x0,30НТ			
Натяжение при намотке, Н	Замеры прямолинейности металлокорда перед испытанием	Замеры прямолинейности металлокорда после испытаний	Повторные замеры прямолинейности металлокорда после выдержки 4 сут на приемной катушке
9	20	10	50
11	20	20	60
16	20	20	95
25	20	30	50
30	20	60	80

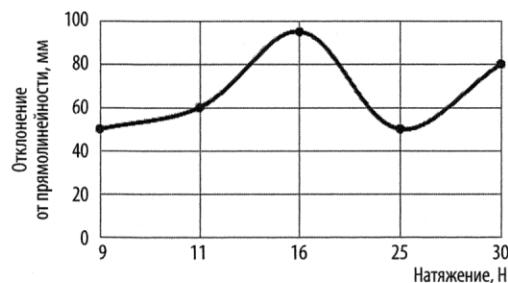


Рис. 5. Зависимость отклонения от прямолинейности металлокорда от его натяжения

$\bar{\nabla}_n$ — градиент изменения относительных разниц напряжений и смещений; $|\bar{\nabla}_n|$ — модуль градиента.

По методу локальной оптимизации функции при $R = \text{const}$ и переменном значении натяжения в выбранной точке расчета модели модуль градиента должен стремиться к минимальным значениям для выполнения принципиального положения критерия [1]. Следовательно, на основании выражения (6) справедливо условие

$$Sg \rightarrow \min. \quad (7)$$

Выполнение условия (7) обеспечивает, согласно выражению (4), минимальный градиент изменений напряжений и смещений точек контакта проволок в конструкции металлокорда. Условие (7) будет способствовать снижению уровня остаточных напряжений и остаточных деформаций, которые и вызывают снижение прямолинейности металлокорда.

Результаты были получены для выбранных расчетных точек модели для натяжений согласно табл. 1. В каждой расчетной точке численной модели был вычислен критерий Sg для качественной оценки отклонения от прямолинейности [6]. Результаты представлены в виде графика на рис. 2.

По полученным результатам численного моделирования можно определить оптимальное натяжение металлокорда для обеспечения его минимального отклонения от прямолинейности.

Для оценки целесообразности использования критерия Sg для определения требуемого натяжения, обеспечивающего максимальную прямолинейность металлокорда, были проведены дополнительные испытания в промышленных условиях на

перемоточной машине (рис. 3). При перемотке металлокорда 2x0,30НТ при помощи грузов натяжения металлокорда регулировали на деформирующем ролике перед намоткой на приемную катушку.

Величину отклонения металлокорда от прямолинейности определяли измерением при помощи «линейки» (рис. 4) длиной 600 мм. Перед замером отклонения от прямолинейности металлокорда

отрезали пробу длиной больше длины линейки на 20–30 %. Свободной укладкой пробу металлокорда помещали на линейку с совмещением точек отсчета на линейке с металлокордом. По вторичной оси линейки проводили замер отклонения от прямолинейности. Замер повторяли три раза и определяли среднее значение (табл. 2).

По полученным данным испытаний построен график зависимости отклонения от прямолинейности металлокорда от натяжения металлокорда в узле намота канатной машины (рис. 5).

Выводы

Согласно рис. 2 и 5, графики имеют подобие по форме зависимости с совпадением экстремума в одной точке при одинаковой величине натяжения. Из рис. 2 и 5 видно, что наилучшим вариантом обеспечения низкого отклонения от прямолинейности металлокорда 2x0,30НТ является натяжение 25 Н. Натяжение 9 Н также способно обеспечить низкое отклонение от прямолинейности металлокорда, однако малое значение его натяжения в узле намота может нарушить плотность свивки металлокорда, что снизит технологичность его производства. В связи с этим для металлокорда 2x0,30НТ рекомендовано использовать натяжение, равное 25 Н. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования критерия Sg для определения требуемого натяжения, обеспечивающего максимальную прямолинейность металлокорда. ЧМ

Библиографический список

- Бобарик Ю. Л., Мартынов Ю. В., Веденеев А. В. Определение влияния диаметра ролика деформации металлокорда перед намоткой на прямолинейность металлокорда после намота // Пластична деформація металів : Колективна монографія. 2017. С. 236–240.
- Ширяев О. П. ОАО «ММК-Метиз»: сохранение, преумножение, модернизация // Черные металлы. 2013. № 10. С. 24–26.
- Сухоруков В. В., Воронцов А. Н., Волоховский В. Ю. Контроль износа канатов заливочных кранов металлургических предприятий // Черные металлы. 2013. № 10. С. 56–60.
- Бобарик Ю. Л., Авсейков С. В., Мартынов Ю. В., Веденеев А. В. Определение диаметра ролика обратной деформации для канатной машины в узле намотки металлокорда // Обработка материалов давлением. 2015. № 1(40). С. 146–151.
- Веденеев А. В., Бобарик Ю. Л., Мартынов Ю. В. Зависимость прямолинейности металлокорда от параметров деформации

- перед намоткой на катушку // БНТЭИ «Черная металлургия». 2017. № 9. С. 77–81.
6. Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V., Vedeneev A. V. Effect of deformation parameters of steel cord before lapping on straightness // XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics» / A collective monograph edited by J. Borica, D. Musial: monograph № 68, Chestohowa (Poland). 2017. P. 133–141.
 7. Бобарикин Ю. Л., Мартянов Ю. В. Способы повышения прямолинейности металлокорда // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3 кн., книга 3: Обработка металлов давлением / редколлегия: А. В. Белый (гл. ред) и др. — Минск : ФТИ НАН Беларусь, 2017. — 129 с.
 8. Hobbs R. E., Nabijou S. Changes in wire curvature as a wire rope is bent over a sheave // Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1995. Vol. 30, Iss. 2. P. 155–165.
 9. Costello G. A. Mechanics of Wire Rope // Mordica Lecture—Interwire 2003, Wire Association International, Atlanta, Georgia — May 12, 2003. P. 28.
 10. Ømrak E., Erdonmez C. On the problem of wire rope model generation with axial loading // Association for Scientific Research, Mathematical and Computational Applications. 2010. Vol. 15, No. 2. P. 259–268.
 11. Ping Z. Construction of Mathematical Model for the Bending State of Braided Wire // Advances in computer science research, 4th International conference on machinery, Materials and information technology applications, Atlantis press. 2016. Vol. 71. P. 1421–1425.
 12. Wu Juan, Kou Ziming. Numerical simulation of stress and strain of steel wire in wire rope strand // Coal Journal. 2015. Vol. 40, Iss. 6. P. 1463–1468.
 13. Чабби Л. Моделирование микроструктуры и свойств при прокатке проволоки и прутков // Черные металлы. 2017. № 9. С. 57–62.
 14. Guo W., Lu Zh. X., Zhang W. Geometric modeling theory of bent wire rope based on Pro/E // China Mechanical Engineering. 2015. Vol. 26, Iss. 17. P. 2362–2368.
 15. Фетисов В. П. Пластичность высокопрочной проволоки. — М. : Интермет Инжиниринг, 2011. — 128 с.
 16. Фетисов В. П., Бирюков Б. А. Влияние технологии свивки методом двойного кручения на формирование остаточных кручений и прямолинейности металлокорда // Черные металлы. 2012. № 10. С. 44–47.

“ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ”, 2019, № 4, pp. 46–50

THE EFFECT OF STEEL CORD TENSION ON ITS STRAIGHTNESS DURING WINDING

Yu. L. Bobarikin¹, Cand Eng., Head of the chair “Metallurgy and technology of metal forming”

Yu. V. Martyanov¹, Post-graduate

A. V. Vedeneev², Cand. Eng., Leading engineer-technologist of the laboratory of metalware production

¹Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy (Gomel, Belarus)

²Byelorussian Steel Works — Management Company of “Byelorussian Metallurgical Company” Holding (Zhlobin, Belarus)

E-mail: **bobarikin@tut.by**

Theoretical bases of the decision of a deviation from the steel cord straightness at industrial manufacture on double twisting cable machines are considered. Specified relevance of the proposed research topic.

The influence of tension and bend application to the steel cord before stress relaxation during the discharge on the coils for several days on steel cord straightness was studied. (Macro level). In the process of a steel cord bending on a deforming roller, the bending stresses were formed, as well as the displacements in the construction of the steel cord, expressed in the displacement of the contact points.

A numerical model of the steel cord bending with a simple single-layer structure with different steel cord tension as a variable parameter is constructed. The diameter of the deforming roller was selected with recommendations of previous studies. To assess the impact of the proposed values the integrated evaluation criterion in conjunction with the optimization method was used. With the proposed methods, the effect of steel cord tension on its straightness was established.

Experiments of the effect of steel cord tension have been conducted in industrial conditions. Positive results have been obtained with the correspondence of the practical results of numerical simulation. In practice, the results in the numerical modeling of the behavior of the steel cord 2x0.30HT under the influence of complex stress-strain materials on a thin wire during the assembly of the steel cord and subsequent processing of the finished steel cord in the straightening devices and when winding onto the take-up reel are confirmed.

Keywords: steel cord, straightness, stresses, macrodisplacements, modeling, tension, criteria.

References:

1. Bobarikin Y. L., Martyanov Yu. V., Vedeneev A. V. Determination of the effect of the steel cord deformation roller diameter on its straightness after winding. Plastic deformation of metals: Collective monograph. 2017. pp. 236–240.
2. Shiryaev O. P. MMK-METIZ: preservation, accumulation, modernization. Chernye Metally. 2013. No. 10. pp. 24–26.
3. Sukhorukov V. V., Vorontsov A. N., Volokhovsky V. Yu. Control of hoisting rope wear for hot-metal cranes of metallurgical enterprises. Chernye Metally. 2013. No. 10. pp. 56–60.
4. Bobarikin Yu. L., Avseykov S. V., Martyanov Yu. V., Vedeneev A. V. Determination of the diameter of an inverse deformation roller for a rope machine in a steel wire cord winding unit. Obrabotka materialov davleniem. 2015. No. 1 (40). pp. 146–151.
5. Vedeneev A. V., Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V. The dependence of steel wire cord straightness on deformation parameters before winding on a bobbin. Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii. 2017. No. 9. pp. 77–81.
6. Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V., Vedeneev A. V. Effect of deformation parameters of steel cord before lapping on straightness. XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics». A collective monograph edited by J. Borica, D. Musial: monograph № 68, Chestohowa (Poland). 2017. pp. 133–141.
7. Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V. Methods for enhancing steel cord straightness. State-of-the-art methods and technologies for creating and processing materials: collection of scientific works. In 3 books, book 3: Metal forming. Editorial board: Bely A. V. (Editor-in-chief) et al. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2017. 129 p.
8. Hobbs R. E., Nabijou S. Changes in wire curvature as a wire rope is bent over a sheave. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1995. Vol. 30, Iss. 2. pp. 155–165.
9. Costello G. A. Mechanics of Wire Rope. Mordica Lecture—Interwire 2003, Wire Association International, Atlanta, Georgia — May 12, 2003. p. 28.
10. Ømrak E., Erdonmez C. On the problem of wire rope model generation with axial loading. Association for Scientific Research, Mathematical and Computational Applications. 2010. Vol. 15, No. 2. pp. 259–268.
11. Ping Z. Construction of Mathematical Model for the Bending State of Braided Wire. Advances in computer science research, 4th International conference on machinery, Materials and information technology applications, Atlantis press. 2016. Vol. 71. pp. 1421–1425.
12. Wu Juan, Kou Ziming. Numerical simulation of stress and strain of steel wire in wire rope strand. Coal Journal. 2015. Vol. 40, Iss. 6. P. 1463–1468.
13. Chabbi L. Simulation of microstructure and mechanical properties in section rolling. Chernye Metally. 2017. No. 9. pp. 57–62.
14. Guo W., Lu Zh. X., Zhang W. Geometric modeling theory of bent wire rope based on Pro/E. China Mechanical Engineering. 2015. Vol. 26, Iss. 17. pp. 2362–2368.
15. Fetisov V. P. Ductility of high strength wire. Moscow: Internet Inzhiniring, 2011. 128 p.
16. Fetisov V. P., Biryukov B. A. Influence of the lay technology via double twisting on forming residual twisting and straightness of steel wire cord. Chernye Metally. 2012. No. 10. pp. 44–47.