

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ИЗГИБА МЕТАЛЛОКОРДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

¹В. А. Томило, ²Ю. Л. Бобарикин, ²Ю. В. Мартьянов

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

²Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
г. Гомель, Республика Беларусь

Исследования влияния знакопеременного изгиба металлокорда на формирование эквивалентных напряжений в поперечном сечении показали на различие в распределении эквивалентных напряжений для стандартной и разработанной рихтовки. Разработанная конструкция рихтовки отличается более высокой равномерностью распределения эквивалентных напряжений по поперечному сечению металлокорда и позволяет достигнуть величины среднего значения эквивалентных напряжений, соответствующей 65–70 % от предела прочности проволоки металлокорда. В результате предложенная схема рихтовки металлокорда обеспечит большую релаксацию остаточных напряжений в металлокорде, что в значительной степени улучшит технологические свойства готового металлокорда без существенного изменения механических свойств.

Ключевые слова: металлокорд, рихтовка, моделирование, свойства

STUDY OF THE INFLUENCE OF VARIABLE SIGN BENDING OF METAL CORD ON THE FORMATION OF EQUIVALENT STRESSES IN CROSS SECTION

¹V. A. Tomilo, ²Yu. L. Bobarikin, ²Yu. V. Martyanov

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

²Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi
Gomel, Republic of Belarus

Research on the effects of alternating bending of steel cords on the formation of equivalent stresses in the cross-section has shown differences in the distribution of equivalent stresses for the standard and the developed straightening methods. The developed straightening design features a higher uniformity in the distribution of equivalent stresses

across the cross-section of the steel cord and allows achieving an average equivalent stress value corresponding to 65–70 % of the tensile strength of the steel cord wire. As a result, the proposed steel cord straightening scheme will ensure greater relaxation of residual stresses in the steel cord, significantly improving the technological properties of the finished steel cord without substantially changing its mechanical properties.

Key words: metal cord, straightening, modeling, properties

e-mail: stamila@rambler.ru; bobarikin@outlook.com, yourock935@ya.ru

В процессе производства металлокорда на этапе свивки несколько стальных тонких высокоуглеродистых проволок переплетаются многократным изгибом и кручением, приобретают окончательную витую форму в металлокорде в процессе многократного изгиба и кручения. При такой интенсивной деформации в проволоке металлокорда формируется неравномерное распределение эквивалентных остаточных напряжений, которые, в свою очередь, подвергаются релаксации уже после изготовления металлокорда. Релаксация остаточных напряжений приводит к непрогнозируемой избыточной пластической деформации проволок, что в значительной степени ухудшает технологические свойства готового металлокорда за счет его искривления от первоначальной формы. Для уменьшения эффекта релаксации в проволоке металлокорда используются дополнительные деформирующие роликовые устройства перед намоткой металлокорда на приемную катушку. Наиболее распространенными деформирующими роликовыми устройствами являются рихтовальные устройства и деформаторы с преформирующими роликами. Общий принцип работы таких устройств построен на контролируемом изгибе металлокорда после его свивки перед намоткой на приёмную катушку. Роликовые рихтовальные устройства дополнительно используют принцип знакопеременного изгиба. В процессе знакопеременного изгиба металлокорда формируются эквивалентные активные напряжения, которые перераспределяют остаточные напряжения в проволоке металлокорда, повышают их равномерность и уменьшают экстремальные значения напряжений. Воздействие рихтовального устройства знакопеременным изгибом на металлокорд до конца не изучено. Поэтому исследование формирования эквивалентных напряжений при знакопеременном изгибе металлокорда в рихтовальном устройстве является актуальной научной задачей.

Известно, что формирование более равномерно распределенных остаточных эквивалентных напряжений в проволоке можно обеспечить воздействием дополнительного эквивалентного напряжения величиной, соответствующей 65–70 % от предела прочности стали проволоки, в конце последнего этапа изготовления тонкой проволоки. На практике это благоприятно влияет на технологические свойства металлокорда уменьшением отклонения от прямолинейности металлокорда [1]. Это положение учитывалось при исследовании знакопеременного изгиба металлокорда на формирование эквивалентных напряжений в поперечном сечении. Предполагается, что воздействие на металлокорд после свивки в рихтовке аналогичной величиной эквивалентного напряжения приводит к росту равномерности распределения остаточных напряжений в проволоке металлокорда. Следующим критерием эффективности обработки в рихтовке является равномерность распределения напряжений в сечении металлокорда: чем выше равномерность, тем эффективнее действует рихтовка.

Для исследования использованы методы численного моделирования процессов свивки и изгиба металлокорда.

Вначале исследования построена модель свивки металлокорда 2×0,30 НТ для 8 шагов со следующими параметрами:

- материал – Сталь 80;
- диаметр проволоки – 0,30 мм;
- количество проволок – 2 шт;
- натяжение при свивке – 40 Н;
- частота вращения ротора (скорость свивки) – 3000 об/мин;
- предел прочности проволоки – (3000 ± 100) МПа;
- шаг свивки металлокорда – 14 мм.

Результаты численного моделирования свивки металлокорда представлены на рис. 1. Модель свивки показывает наличие в поперечном сечении проволоки металлокорда значительное количественное преобладание эквивалентных напряжений в области 1100 МПа, что указывает на существенную неравномерность распределения эквивалентных напряжений по сечению металлокорда после свивки. Обработка металлокорда в рихтовальных устройствах и деформаторах с преформирующими роликами повышает равномерность распределения напряжений.

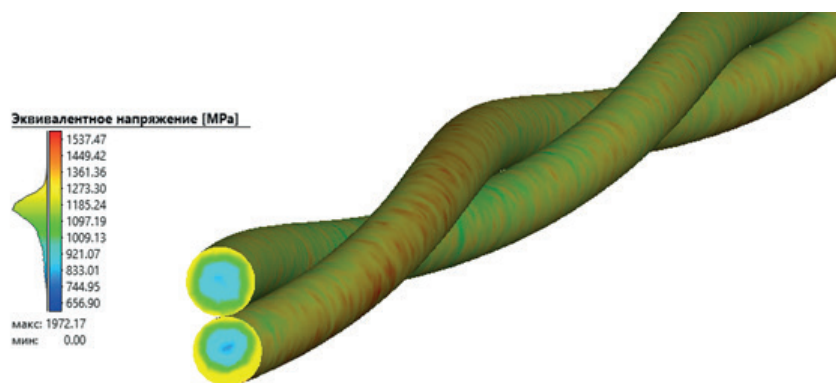


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений при свивке металлокорда 2×0,30НТ

На рис. 2 представлена стандартная конструкция рихтовального устройства. Диаметр ролика по дну V-образной канавки – 13 мм, количество роликов – 7 шт. Максимальное перекрытие роликов, которое может быть достигнуто конструктивно, составляет 1,5 мм.

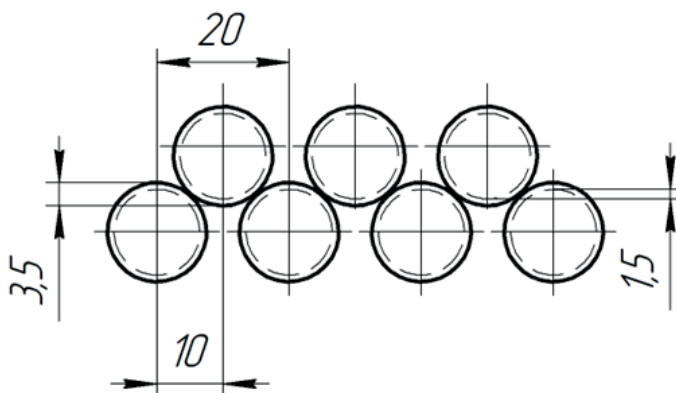


Рис. 2. Стандартная семироликовая конструкция роликового рихтовального устройства

Была построена численная модель деформации металлокорда в стандартной семироликовой конструкции роликового рихтовального устройства. Свитый металлокорд с параметрами, наследуемыми из процесса свивки, заправлен и протянут со скоростью

100 мм/с через стандартную семироликовую конструкцию роликового рихтовального устройства (рис. 2). Результаты изгиба металлокорда в стандартной семироликовой конструкции рихтовального устройства представлены на рис. 3.

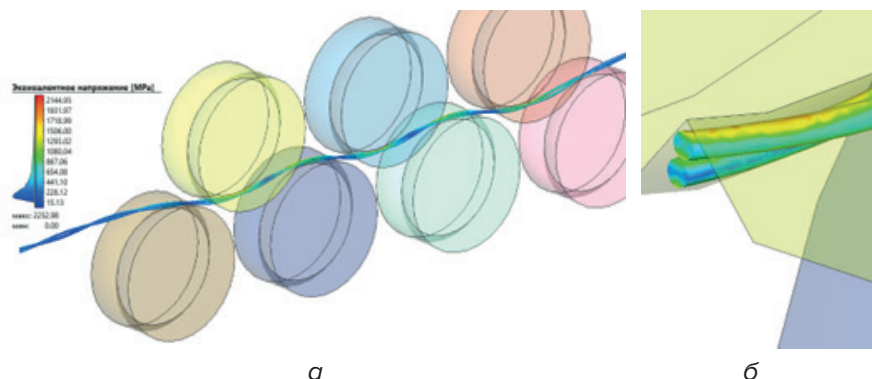


Рис. 3. Результаты изгиба металлокорда в стандартной семироликовой конструкции рихтовального устройства:
а – общий вид модели; б – поперечное сечение металлокорда

Из рис. 3 следует наличие максимальных напряжений, соответствующих 65–70 % от предела прочности проволоки, то есть 1950–2100 МПа. Распределение напряжений существенно неравномерное, т. к. выделяется количественное преобладание эквивалентных напряжений в области 50–300 МПа, контактное взаимодействие проволок практически отсутствует. При таком режиме изгиба металлокорда остаточные напряжения снижаются неэффективно. Кроме того, наблюдается неравномерность распределения остаточных напряжений вследствие несимметричного воздействия на металлокорд. В стандартной семироликовой рихтовке 3 изгиба металлокорда осуществляется в одном направлении и 2 изгиба в обратном. Вследствие конструктивного ограничения стандартного рихтовального устройства невозможно осуществить более глубокую и равномерную деформацию металлокорда.

После анализа формирования эквивалентных напряжений в металлокорде при изгибе в стандартной семироликовой рихтовке разработана новая схема рихтовального устройства, обеспечивающая более глубокую проработку поперечного сечения металлокорда. Схема роликового рихтовального устройства разработана на основании ранее выполненных исследований, в которых было теоретически определено и экспериментально подтверждено, что наиболее благоприятным режимом изгиба является 4 знакопеременных изгиба (по 2 в разных направлениях) с перекрытием роликов 2–2,5 мм [2]. Разработанная схема представлена на рис. 4.

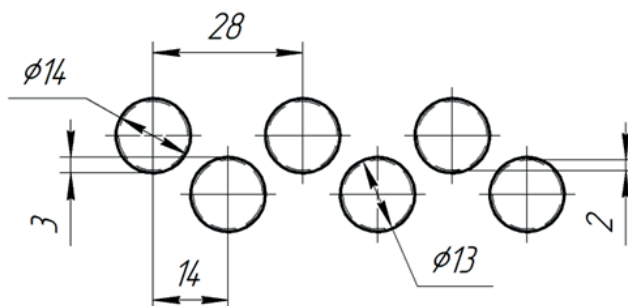


Рис. 4. Схема роликового рихтовального устройства

В разработанной схеме шаг между роликами увеличен на 40 %, что позволяет осуществлять полное перекрытие роликов, что, в свою очередь, позволит осуществлять более глубокую деформацию и более полную проработку поперечного сечения металлокорда изгибом. На основе разработанной схемы построена численная модель изгиба металлокорда. Свитый металлокорд с параметрами, наследуемыми из процесса свивки заправлен и протянут со скоростью 100 мм/с через роликовое рихтовальное устройство с шестью роликами и перекрытием роликов 2 мм (рис. 4). Величина перекрытия выбрана исходя из ранее полученных рекомендаций, а также вследствие витой конструкции металлокорда.

Результаты численного моделирования знакопеременного изгиба металлокорда в разработанной роликовой рихтовке представлены на рис. 5.

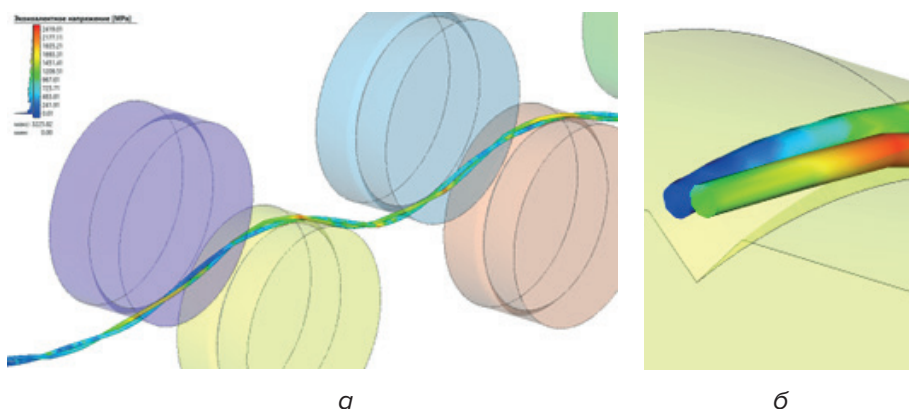


Рис. 5. Результаты численного моделирования знакопеременного изгиба металлокорда:
а – общий вид модели; б – поперечное сечение металлокорда

Как следует из рис. 5, равномерность распределения напряжений значительно выше в сравнении с обработкой металлокорда в стандартной семи роликовой рихтовке (рис. 3). Также присутствуют максимальные напряжения, соответствующие 65–70 % от предела прочности проволоки, т. е. 1950–2100 МПа.

Для исследования процесса изгиба металлокорда в рихтовальном устройстве модель была разбита на условные сечения, как показано на рис. 6.

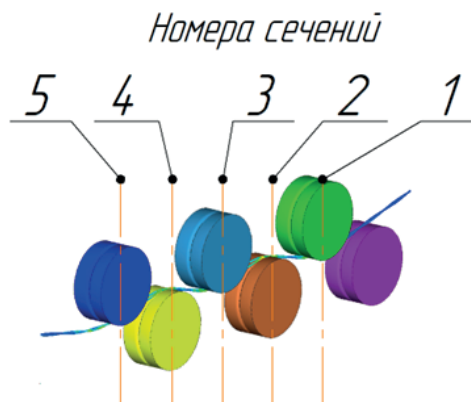


Рис. 6. Исследуемые поперечные сечения металлокорда

По данным с модели построены графики эквивалентных напряжений в поперечном сечении металлокорда в зависимости от количества изгибов металлокорда в рихтовальном устройстве (рис. 7).

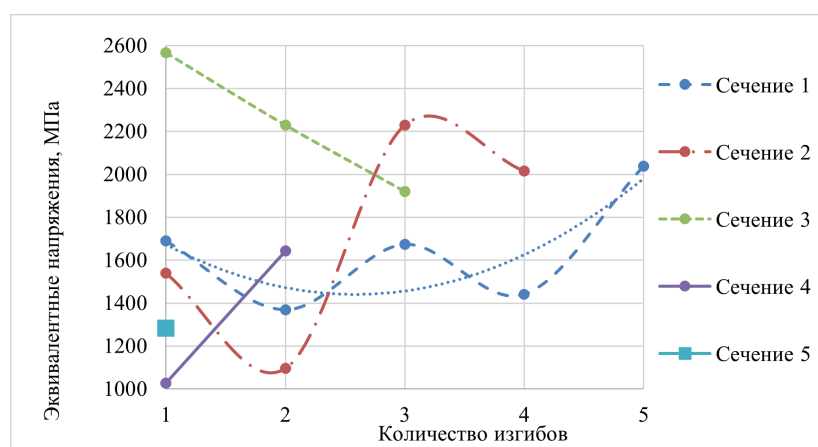


Рис. 7. Графики средних эквивалентных напряжений в поперечном сечении металлокорда в зависимости от количества изгибов металлокорда

По результатам экспериментальных исследований определено, что наилучшими показателями технологических свойств металлокорда обладает вариант с четырьмя знакопеременными изгибами [3]. Это соответствует результатам моделирования пяти изгибов металлокорда на роликах (рис. 7). При этом пять изгибов на роликах означают два полных изгиба в одном направлении и два полных изгиба в обратном направлении. Последний пятый неполный изгиб выполняет функцию вывода металлокорда из рихтовального устройства и глубоко не деформирует металлокорд (рис. 6). Таким образом, осуществляется симметрия изгибов, когда количество изгибов в одном направлении равно количеству в обратном направлении. Пять изгибов металлокорда на роликах обеспечивают средний уровень эквивалентных напряжений в поперечном сечении проволоки металлокорда на уровне 2035 МПа (рис. 7), что соответствует 65–70 % от предела прочности проволоки металлокорда (3000 МПа).

Зависимость величины эквивалентных напряжений в проволоке металлокорда от количества изгибов металлокорда в рихтовальном устройстве имеет вид:

$$\sigma = 92,634x^2 - 479,01x + 2060, \quad (1)$$

где σ – эквивалентные напряжения в проволоке металлокорда, МПа; x – количество изгибов в рихтовальном устройстве.

Работа рихтовального устройства на основе знакопеременной деформации сечения проволоки позволяет вызвать дополнительную пластическую деформацию менее деформированных слоёв металла. В результате менее деформированные слои металла получают дополнительное упрочнение, приводящее к выравниванию суммарной деформации всех слоёв металла. Знакопеременная дополнительная нагрузка в рихтовальном устройстве вследствие действия закона Баушингера влияет на механические свойства проволоки.

Проведены расширенные испытания по определению механических свойств тонкой высокоуглеродистой латунированной проволоки диаметром 0,30 мм класса прочности НТ. Отобранные образцы проволоки после натяжения рассортированы и отобраны для испытаний на знакопеременный изгиб с помощью стандартного семи роликового рихтовального устройства с диаметром ролика 13 мм. Из отобранных образцов в лабораторных условиях свит однослойный металлокорд конструкции 2×0,30 НТ.

После обработки металлокорда конструкции 2×0,30 НТ через семи роликовую рихтовку осуществлен агрегатный разрыв полученного металлокорда с получением механических свойств металлокорда. Полученные механические свойства представлены в табл. 1

Табл. 1

**Механические свойства металлокорда 2×0,30 НТ
после изгиба в рихтовальном устройстве**

| Количество роликов | Относительное удлинение, % | Предел прочности, МПа |
|--------------------|----------------------------|-----------------------|
| 2 | 2,31 | 3005 |
| 3 | 2,29 | 3001 |
| 4 | 2,46 | 3005 |
| 5 | 2,36 | 3002 |
| 6 | 2,57 | 3007 |
| 7 | 2,34 | 3007 |

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что предел прочности проволоки в среднем изменяется на величины до 3–5 %, а относительное удлинение проволоки изменяется в диапазоне 2–3 %, что соответствует классу прочности НТ. Из этого следует, что используемая обработка знакопеременным изгибом незначительно влияет на механические свойства металлокорда. Предел прочности остаётся в диапазоне своего класса прочности. Таким образом, неглубокий знакопеременный изгиб, применяемый для улучшения технологических свойств металлокорда, не ухудшает механических свойств металлокорда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана зависимость влияния количества изгибов при знакопеременном изгибе металлокорда на распределение остаточных напряжений в поперечном сечении металлокорда. Определено, что 5 изгибов металлокорда на роликах (4 полных знакопеременных изгиба) формируют более равномерное распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении металлокорда. Обеспечивают достижение величины среднего значения эквивалентных напряжений, соответствующей 65–70 % от предела прочности проволоки металлокорда. В результате предложенная схема рихтовки металлокорда обеспечит большую релаксацию остаточных напряжений в металлокорде, что в значительной степени улучшит технологические свойства готового металлокорда.

ЛИТЕРАТУРА

- Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с.
- Бобарикин, Ю. Л. Исследование процесса рихтовки тонкой высокоуглеродистой стальной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, О. Ю. Ходосовская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2024. – Кн. 2. : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением. – С. 288–293.
- Бобарикин, Ю. Л. Влияние деформации проволоки в рихтовке на снижение остаточных напряжений / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы I междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 95–96.

REFERENCES

- Bobarikin Yu. L., Vereshchagin M. N., Martyanov Yu. V. *Tonkoe volochenie i svivka v metallokord stal'noi latunirovannoi provoloki* [Fine drawing and twisting of brass-plated steel wire into metal cord]. Gomel, Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi Publ., 2018, 304 p. (in Russian).

2. Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V., Khodosovskaya O. Yu. Issledovanie protsessa rikhtovki tonkoi vysokouglerodistoi stal'noi provoloki [Study of the straightening process of thin high-carbon steel wire]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki. Obrabotka metallov davleniem* [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing. Technologies and Equipment of Mechanical and Physical and Technical Processing. Metal Forming Processes]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2024, pp. 288–293. (in Russian).
3. Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V. Vliyanie deformatsii provoloki v rikhtovke na snizhenie ostatochnykh napryazhenii [Effect of wire deformation during straightening on the reduction of residual stresses]. *Materialy I mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnoe stankostroenie, tekhnologii i instrument"* [Materials of the I International Scientific and Practical Conference on Innovative Machine Tool Engineering, Technologies, and Tools], Gomel, Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi Publ., 2023, pp. 95–96. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 12.05.2025 г.