

УДК 621.778.073

Ю.Л. БОБАРИКИН, канд. техн. наук, доц.; Ю.В. МАРТЪЯНОВ

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Республика Беларусь

О.Ю. ХОДОСОВСКАЯ

ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ ИЗГИБЕ В РИХТОВАЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ

В процессе знакопеременного изгиба образуются эквивалентные активные напряжения, влияющие на последующее распределение эквивалентных остаточных напряжений. Построена адекватная численная модель знакопеременного изгиба проволоки в рихтовальном устройстве. С помощью аналитических методов проведена верификация численной модели. Расчетным методом установлены величины эквивалентных остаточных напряжений, образующиеся при знакопеременном изгибе тонкой проволоки в роликовой рихтовке. В результате проведенного исследования установлено, что при увеличении перемещения роликов возрастает неравномерность распределения остаточных напряжений. Получены зависимости величины эквивалентных остаточных напряжений от расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки и величины суммарной кривизны расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки. Полученные зависимости позволят учитывать вклад изгиба тонкой проволоки в стане тонкого волочения на величину эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве волочильного стана.

Ключевые слова: проволока, эквивалентные остаточные напряжения, кривизна, отклонение от прямолинейности

В современном метизном производстве используются различные приемы обработки тонкой проволоки для снижения остаточных напряжений в металлокорде, свитом из тонкой проволоки. Металлокорд представляет собой витое изделие, состоящее из прядей проволоки, каждая из которых оказывает влияние на свойства металлокорда [1–5]. Наиболее распространенным методом обработки является использование рихтовальных устройств. Основной принцип действия рихтовальных устройств заключается в перераспределении и уменьшении величины остаточных напряжений в проволоке и металлокорде за счет знакопеременного изгиба. В процессе знакопеременного изгиба также образуются эквивалентные активные напряжения, влияющие на последующее распределение эквивалентных остаточных напряжений. Эффективность использования рихтовального устройства оценивается комплексом технологических свойств готовой продукции [6]. Основным технологическим свойством тонкой проволоки и металлокорда является величина отклонения от прямолинейности металлокорда после свивки.

В процессе свивки металлокорда проволока подвергается крутящим и изгибающим напряжениям. Это в совокупности с напряженно-деформированным состоянием проволоки в процессах волочения и свивки, а также с уровнем внутренних остаточных напряжений, возникающих в проволоке после волочения, делает невозможным прогнозирование изменения свойств проволоки и корда известными расчетными способами. Для корректного расчета свивки металлокорда требуется точный прогноз уровня внутренних остаточных напряжений, возникающих при волочении [7].

Цель работы — исследовать величины эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве волочильного стана.

Главным методом исследования величины эквивалентных остаточных напряжений является метод численного моделирования. Использование этого метода, основанного на методе конечных элементов, позволяет получить общую картину напряжений и деформаций проволоки в рихтовальном устройстве с высокой точностью расчетов. Главными требованиями при численном моделировании являются правильное построение модели с точки зрения геометрии, выбор начальных и граничных условий, а также выбор оптимального типа сетки конечных элементов. От выбранного типа конечного элемента, его геометрической формы будет зависеть точность и длительность расчетов, а также адекватность построенной модели.

Численное моделирование, в отличие от аналитических способов, с достаточной точностью показывает картину напряжений и деформаций не только в упругой, но и в пластической зоне деформации. Это является основным преимуществом перед аналитическими расчетами.

Для построения математической модели использовали метод конечных элементов. В качестве объекта исследования выступает тонкая высокопрочная проволока.

Начальные условия:

- конечный элемент — четырехузловой тетраэдр;
- количество элементов — 34 000 шт.;
- материал проволоки — сталь 80;
- диаметр проволоки — 0,30 мм;
- класс прочности — НТ (3000 МПа).

Граничные условия:

- температура окружающей среды — 20 °С;
- скорость прохождения проволоки через рихтовку — 150 мм/с;
- диаметр роликов рихтовального устройства по дну проточки — 13 мм.

Варьируемым параметром является изменение силы изгиба проволоки за счет изменения расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки.

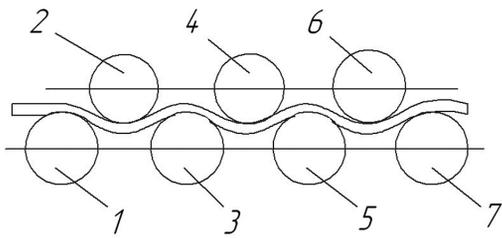


Рисунок 1 — Схематическое изображение рихтовального устройства: 2, 4, 6 — ролики верхней части рихтовки; 1, 3, 5, 7 — ролики нижней части рихтовки

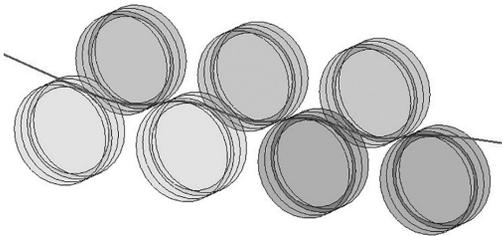


Рисунок 2 — Внешний вид построенной численной модели рихтовального устройства с проволокой

Схематичное изображение рихтовального устройства представлено на рисунке 1.

Относительно прямого положения проволоки перемещение подвижного ряда роликов рихтовального устройства изменялось в диапазоне от 0,5 до 3,5 мм, с шагом 0,5 мм. Три верхних ролика являются подвижными в вертикальном направлении. Четыре нижних ролика являются неподвижными.

Внешний вид построенной численной модели имеет вид, показанный на рисунке 2.

Результаты моделирования представлены в виде цветокодированных диаграмм (рисунок 3). В качестве выходного параметра модели производилась оценка величины и распределения эквивалентных напряжений в поперечном сечении проволоки.

Анализ результатов моделирования (см. рисунок 3) показывает, что при увеличении изгиба проволоки за счет уменьшения расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки увеличивается разница между \min и \max остаточными напряжениями, что говорит об увеличении неравномерности их распределения при увеличении изгиба проволоки. Следствием роста не-

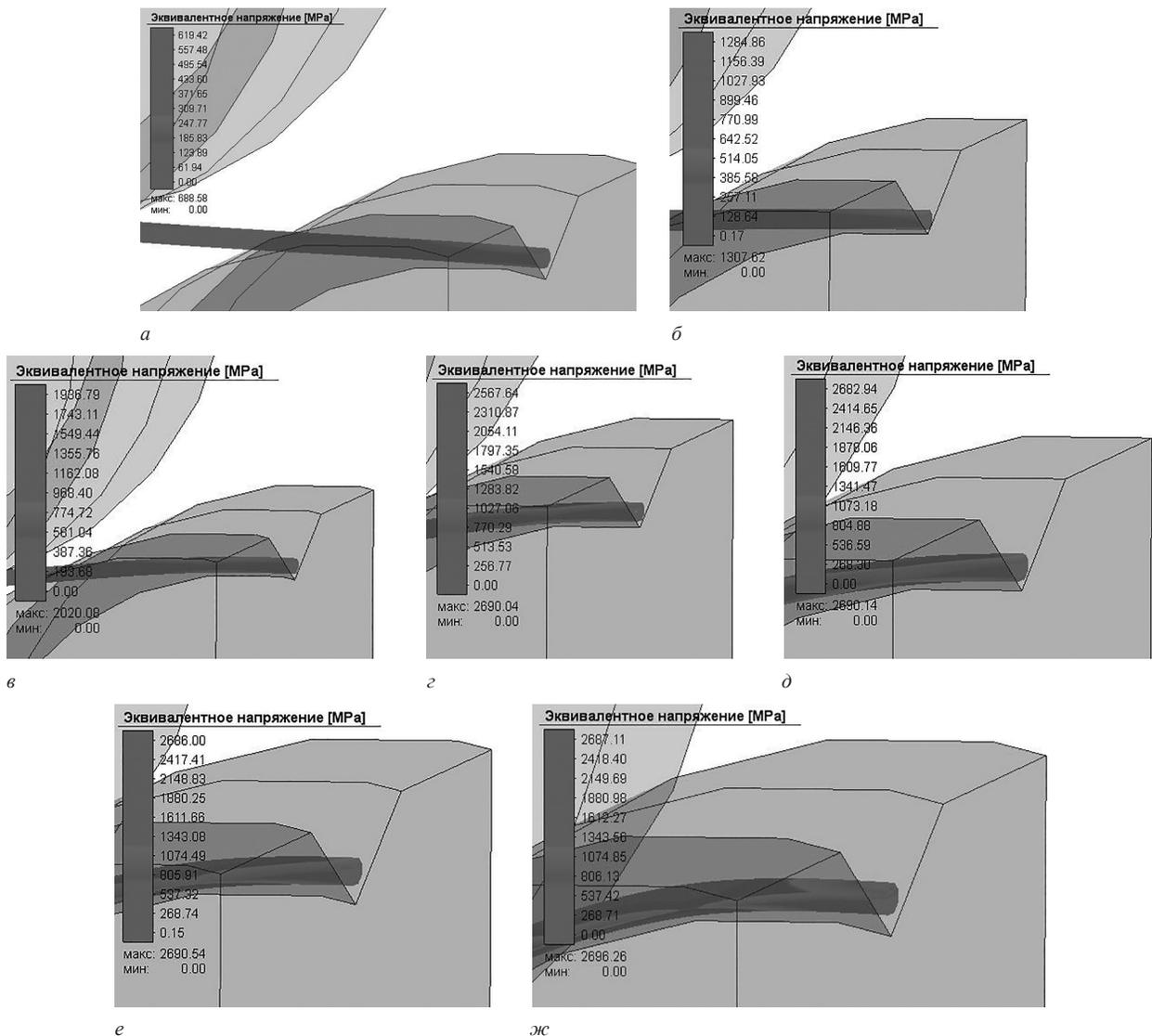


Рисунок 3 — Величина эквивалентных остаточных напряжений в проволоке для различных вариантов перемещения подвижного ряда роликов рихтовального устройства относительно прямого положения проволоки, мм: а — 0,5; б — 1; в — 1,5; г — 2; д — 2,5; е — 3; ж — 3,5

равномерности эквивалентных остаточных напряжений будет являться ухудшение технологических свойств получаемой проволоки.

Верификация результатов численного моделирования на данном этапе исследований осуществляется сравнением результатов аналитических вычислений с результатами моделирования. Для верификации численного моделирования был проведен аналитический расчет влияния силы изгиба проволоки за счет изменения расстояния между секциями верхних и нижних роликов. Расчетная схема представлена на рисунке 4.

При изменении величины перемещения верхней части рихтовки по отношению к неподвижной нижней части рихтовки угол охвата соответствующего ролика можно рассчитать, исходя из известных данных:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{h}{R}, \quad (1)$$

где h — высота, мм; R — радиус ролика (6,5 мм); α — центральный угол.

В таблице и на рисунках 5 и 6 приведены рассчитанные значения углов охвата роликов и значения коэффициентов степени проработки проволоки [8–10]. Коэффициент степени проработки проволоки K рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{\alpha}{360}, \quad (2)$$

где α — угол охвата соответствующего ролика, град.

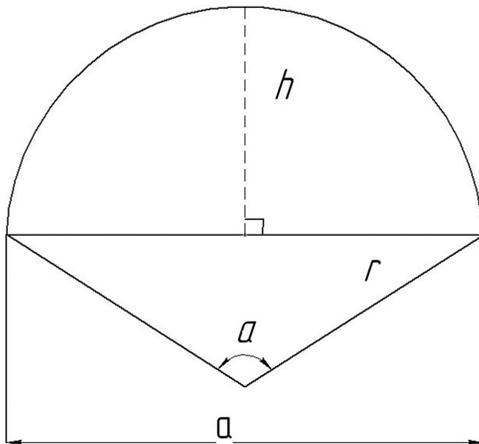


Рисунок 4 — Расчетная схема сегмента окружности: h — высота, мм; r — радиус ролика, мм; α — угол охвата соответствующего ролика, град.

Таблица — Результаты обработки моделирования изгиба

Величина перемещения, мм	Значение угла охвата α , град.	Значение коэффициента степени проработки металлокорда	Разница между min и max остаточными напряжениями, МПа	Суммарная кривизна роликов рихтовки, $\sum \frac{K}{R}$
0,5	46	0,1278	185,83	0,0197
1,0	64	0,1778	513,88	0,0274
1,5	80	0,2222	581,04	0,0342
2,0	92	0,2556	1027,05	0,0393
2,5	104	0,2889	1609,76	0,0444
3,0	114	0,3167	2417,29	0,0487
3,5	126	0,35	2418,37	0,0538

Анализ таблицы показывает, что при уменьшении расстояния между верхней и нижней секциями рихтовки наблюдается увеличение отклонения от нуля $\sum \frac{K}{R}$, что

подтверждает результаты численного моделирования. Значения величин эквивалентных остаточных напряжений σ (МПа) при перемещении роликов на Δx (мм) представлены в виде гистограммы на рисунке 5.

Полиномиальная зависимость величины эквивалентных остаточных напряжений от перемещения верхнего ряда подвижных роликов рихтовки имеет вид:

$$\sigma = -263,79\Delta x^4 + 1954,8\Delta x^3 - 4655,5\Delta x^2 + 4700,9\Delta x - 1228,6, \quad (3)$$

где σ — эквивалентные остаточные напряжения, МПа; Δx — величина перемещения верхнего ряда подвижных роликов рихтовки, мм.

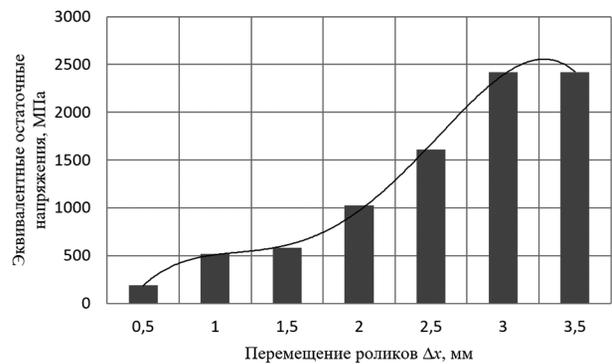


Рисунок 5 — Значения величин эквивалентных остаточных напряжений σ (МПа) при перемещении роликов на Δx (мм)

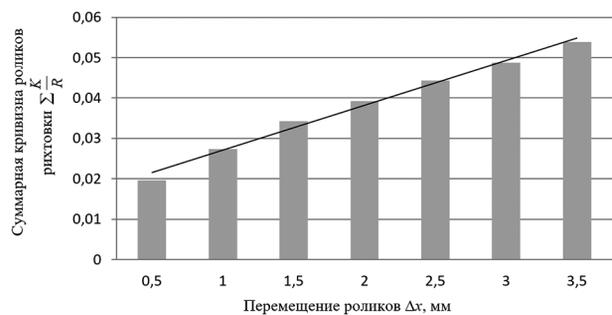


Рисунок 6 — Распределение значений коэффициентов проработки проволоки в зависимости от перемещения роликов

Линейная зависимость величины суммарной кривизны роликов рихтовки от перемещения верхнего ряда подвижных роликов рихтовки имеет вид:

$$\sum \frac{K}{R} = 0,0111\Delta x + 0,0161. \quad (4)$$

Из таблицы и рисунков 5 и 6 следует, что при уменьшении расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки увеличивается разница между экстремальными значениями остаточных напряжений. Одновременно увеличивается значение суммарной кривизны роликов рихтовки. Следовательно, при уменьшении расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки увеличивается неравномерность распределения остаточных напряжений и отклонение от нуля величины

$\sum \frac{K}{R}$. Полученные зависимости позволят учитывать

вклад изгиба тонкой проволоки в стане тонкого волочения на величину эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве волочильного стана.

Выводы. В результате выполненного исследования выявлены зависимости процесса волочения тонкой латунированной проволоки. Методом численного моделирования исследованы величины эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве стана тонкого волочения. В результате проведенного исследования установлено, что при уменьшении расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки возрастает неравномерность распределения остаточных напряжений. Зависимости позволяют учесть вклад изгиба тонкой проволоки в стане тонкого волочения на величину эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве волочильного стана. Контроль знакопеременных напряжений и деформаций тонкой проволоки в рихтовке позволит улучшить технологические свойства металлокорда, например, снизить отклонение от прямолинейности и величину остаточного кручения.

Список литературы

1. Бобарикин, Ю.Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю.Л. Бобарикин,

М.Н. Верещагин, Ю.В. Мартьянов. — Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2018. — 304 с.

2. Буркин, С.П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С.П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андриюкова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.

3. Салехова, Г.А. Правка тонкой проволоки растяжением и роликовая правка / Г.А. Салехова // Новости черной металлургии за рубежом. — 2010. — № 4. — С. 64–66.

4. Фетисов, В.П. Структурные и технологические аспекты снижения разупрочнения проволоки при свивке высокопрочного металлокорда / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. — 2016. — № 4(85). — С. 62–65.

5. Гриднев, В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Я. Мешков. — Киев: Наукова думка, 1974. — 231 с.

6. Мартьянов, Ю.В. Влияние настройки рихтовального устройства в узле намотки волочильного стана на прямолинейность тонкой проволоки / Ю.В. Мартьянов, В.М. Рудницкий // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г.: в 2 ч. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2022. — Ч. 1. — С. 129–132.

7. Бобарикин, Ю.Л. Исследование влияния скорости грубого волочения стальной высокоуглеродистой проволоки на распределение напряжений и деформаций по сечению проволоки / Ю.Л. Бобарикин, Ю.В. Мартьянов // Литье и металлургия. — 2019. — № 1. — С. 73–77.

8. Бобарикин, Ю.Л. Новый подход в определении оптимального диаметра деформирующего ролика канатной машины для улучшения технологических свойств металлокорда / Ю.Л. Бобарикин, Ю.В. Мартьянов, О.Ю. Ходосовская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. / редкол.: В.Г. Залесский [и др.]. — Минск, 2022. — Кн. 2. — С. 235–243.

9. Ходосовская, О.Ю. Влияние диаметров роликов и их углов охвата в канатной машине на свойства металлокорда // О.Ю. Ходосовская, Ю.Л. Бобарикин, Ю.В. Мартьянов // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр.: в 2 ч. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2022. — Ч. 1. — С. 45–48.

10. Ходосовская, О.Ю. Оценка влияния роликов обратной деформации в системе «обратный намот» на дугу прогиба металлокорда в процессе релаксации / О.Ю. Ходосовская // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г.: в 2 ч. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2022. — Ч. 1. — С. 120–123.

Bobarikin Yu.L., Martyanov Yu.V., Khodosovskaya O.Yu.

Study of the value of equivalent residual stresses of a fine wire under alternating bending in straightening device

In the process of alternating bending, equivalent active stresses are formed that affect subsequent distribution of equivalent residual stresses. An adequate numerical model of alternating wire bending in straightening device is constructed. The numerical model is verified with the help of analytical methods. Using calculation method, values are established for equivalent residual stresses formed during alternating bending of a fine wire in roller straightening device. As a result of the study, it is found that with increase in movement of the rollers, uneven distribution of residual stresses increases. Dependences of the value of equivalent residual stresses on distance between the upper and lower sections of straightening rollers and total curvature of the straightening rollers of distance between the upper and lower sections of the straightening rollers are obtained. Obtained dependences will make it possible to take into account contribution of fine wire bending in fine drawing mill to the value of equivalent residual stresses of the fine wire with alternating bending in the straightening device of drawing mill.

Поступила в редакцию 02.06.2023.