



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-58-62>  
УДК 669

Поступила 18.11.2022  
Received 18.11.2022

## ИЗУЧЕНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ И МЕТАЛЛОКОРДА

Е. С. ЕЛЬЦОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,  
г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: [Imp.icm@bmz.gomel.by](mailto:Imp.icm@bmz.gomel.by)  
Ю. Л. БОБАРИКИН, Ю. В. МАРТЬЯНОВ, Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: [bobarikin@tut.by](mailto:bobarikin@tut.by)

*Прогнозирование физико-механических свойств тонкой проволоки и металлокорда обеспечит повышение качества латунированной тонкой проволоки, снижение количества и времени технологических пауз, повысит технологичность свивки металлокорда. Учитывая, что при деформации проявляется анизотропия свойств тонкой проволоки, прогнозирование физико-механических свойств и степени неравномерности деформации становится актуальной задачей.*

*В работе показано, что увеличение скорости волочения тонкой проволоки ведет к приобретению более равномерной и мелкозернистой структуры. Разработаны зависимости физико-механических свойств тонкой латунированной проволоки после свивки металлокорда от скорости тонкого волочения. Исследовано влияние скорости деформации на микротвердость тонкой стальной проволоки. Определено, что для повышения производительности свивки металлокорда требуется привести зависимость роста твердости и эквивалентных напряжений в проволоках металлокорда к линейному виду путем изменения скорости свивки на отдельных ее этапах. Для практического использования выведены зависимости механических свойств тонкой проволоки класса прочности НТ от скорости волочения.*

*В ходе проведения анализа были получены результаты, которые применимы при проектировании новых или доработки существующих маршрутов волочения тонкой проволоки, а также при проектировании новых конструкций металлокорда.*

**Ключевые слова.** Металлокord, тонкая латунированная проволока, сдвоенная волока, микротвердость, микроструктура, свивка металлокорда, механические свойства, волочение.

**Для цитирования.** Ельцова, Е. С. Изучение и разработка способов прогнозирования физико-механических свойств тонкой проволоки и металлокорда / Е. С. Ельцова, Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // *Литье и металлургия*. 2022. № 4 С. 58–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-58-62>.

## STUDY AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR PREDICTING THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THIN WIRE AND METAL CORD

E. S. ELTSOVA, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC»,  
Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: [Imp.icm@bmz.gomel.by](mailto:Imp.icm@bmz.gomel.by)  
Yu. L. BOBARIKIN, Yu. V. MARTYANOV, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi,  
Gomel, Belarus, 48, Oktyabrya ave. E-mail: [bobarikin@tut.by](mailto:bobarikin@tut.by)

*Predicting the physical and mechanical properties of thin wire and metal cord will ensure an increase in the quality of lath-tuned thin wire, a reduction in the number and time of technological pauses, and increase the manufacturability of metal cord twisting. Considering that the deformation manifests anisotropy of the properties of thin wire, the prediction of physical and mechanical properties and the degree of unevenness of deformation becomes an urgent task.*

*The paper studies that an increase in the drawing speed of a thin wire leads to the acquisition of a more uniform and fine-grained structure. The dependences of the physico-mechanical properties of thin lath-tuned wire after the metal cord is twisted on the speed of fine drawing are developed. The effect of the deformation rate on the microhardness of a thin steel wire is investigated. It is determined that in order to increase the productivity of metal cord twisting, it is necessary to bring the dependence of the increase in hardness and equivalent stresses in metal cord wires to a linear form by changing the speed of the twisting at its individual stages. For practical use, the dependences of the mechanical properties of a thin wire of strength class HT on the drawing speed are derived.*

*During the analysis, the results were obtained, which are applicable in the design of new or modification of existing routes for drawing thin wire, as well as in the design of new metal cord structures.*

**Keywords.** Metal cord, thin lath-tuned wire, double drawing, microhardness, microstructure, metal cord binding, mechanical properties, drawing.

**For citation.** Eltsova E. S., Bobarikin Yu. L., Martyanov Yu. V. Study and development of methods for predicting the physical and mechanical properties of thin wire and metal cord. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 58–62. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-58-62>.

### Введение

Большинство моделей технологических процессов, создаваемых в компьютерных системах инженерного моделирования, таких, как MSC.Nastran, MSC.Marc, MSC.SuperForm, рассматривают обрабатываемый материал изотропным, без учета его структурных составляющих и анизотропии, в итоге снижается точность определения значений напряженно-деформированного состояния (НДС) обрабатываемой заготовки и инструмента, а также основных технологических параметров процессов.

Моделированию подлежит конкретный материал, для этого в программе должны быть вводные данные об этом материале. Сбор данных проводят на миниобразцах исследуемого материала. Результатом физического моделирования является серия кривых «напряжение-деформация» при различных скоростях и температурах деформации, которые загружаются в программу, работающую по алгоритму метода конечных элементов.

### Постановка эксперимента

#### Исследование изменения микроструктуры тонкой проволоки в зависимости от скорости волочения

Для определения микроструктуры тонкой проволоки, изготовленной на различных скоростях волочения (1, 4, 6, 8 и 10 м/с), были отобраны образцы проволоки из стали 80. Образцы одинакового диаметра (0,35 мм) и класс прочности (НТ). Для анализа микроструктуры изготовленных микрошлифов из выбранных образцов использовали метод выявления и определения величины зерна, установленный ГОСТ 5639-82. Анализ микрошлифов проводили с помощью микроскопа ЛОМО МЕТАМ РВ-21-2 при увеличении 800 крат. Сталь 80 является эвтектоидной и состоит преимущественно из перлита, поэтому для выявления и определения величины зерна сталей выбран метод травления сетки перлита.

Полученные средние численные значения площади зерна, количество зерен на площади 1 мм<sup>2</sup>, а также другие параметры приведены в таблице.

Параметры микроструктуры образцов

Скорость волочения, м/с	Балл зерна $G$	Средняя площадь сечения зерна $a$ , мм <sup>2</sup>	Число зерен на площади 1 мм <sup>2</sup>			Среднее число зерен в 1 мм <sup>3</sup>	Средний диаметр зерна $d_m$ , мм	Средний условный диаметр зерна $d_u$ , мм
			минимальное	среднее	максимальное			
1	11	0,000 061	12 288	16 384	24 576	2 097 152	0,0079	0,0069
4	11	0,000 061	12 288	16 384	24 576	2 097 152	0,0079	0,0069
6	12	0,000 030	24 576	32 768	49 152	5 931 008	0,0056	0,0049
8	12	0,000 030	24 576	32 768	49 152	5 931 008	0,0056	0,0049
10	13	0,000 015	49 152	65 536	98 304	16 777 216	0,0039	0,0032

Из таблицы видно, что при повышении скорости волочения балл зерна увеличивается, структура становится более равномерной и мелкозернистой. Мелкозернистая структура позволяет повысить качество производимой тонкой проволоки, она более пластична и, следовательно, менее подвержена трещинам [1]. С увеличением скорости волочения неметаллические включения распределяются ближе к центру сечения проволоки. Это происходит предположительно из-за увеличения интенсивности деформации. Осевые слои металла, которые при волочении вытягиваются наиболее сильно, из-за дробления зерна стягивают все включения в зону наиболее интенсивной деформации.

#### Исследование изменения свойств проволоки после свивки металлокорда

Образцы проволоки были свиты на лабораторном стенде в металлокорд конструкции 2x0,35НТ, количество витков равно 21, шаг свивки равен 14 мм. Свивка происходила с дополнительным перекручиванием в пять оборотов. Итого финальная схема свивки равна 21±5 оборотов.

Для изучения влияния процесса свивки проведены механические испытания на разрыв тонкой проволоки до свивки, тонкой проволоки после свивки (выплетена из металлокорда) и цельной конструкции металлокорда.

По завершению проверки всех значений, полученных в экспериментальных измерениях проволоки и металлокорда, были исключены грубые ошибки согласно правилу трех сигм. На основе полученных данных были построены диаграммы зависимости средних значений предела прочности проволоки и металлокорда от скорости волочения проволоки (рис. 1).

Согласно рисунку, наблюдается небольшое снижение предела прочности металлокорда, обусловленное наличием касательных напряжений и крутящих деформаций в проволоке. Изменение предела прочности по скоростям волочения проволоки может быть вызвано изменением свойств смазки и условиями трения при увеличении скорости тонкого волочения, а также изменением сопротивления пластической деформации при увеличении скорости волочения. Так как зависимость квадратичная, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние вызывает изменение условий трения в волоке.

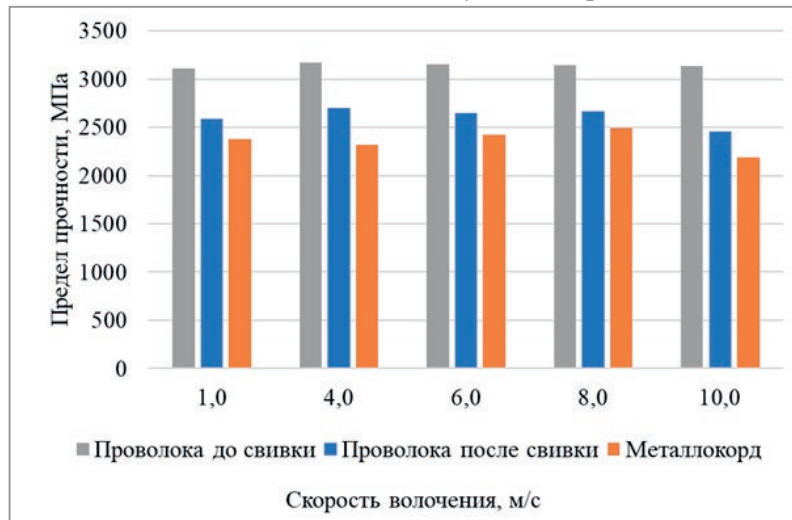


Рис. 1. Средние показатели предела прочности проволоки до свивки, проволоки после свивки и металлокорда от скорости волочения проволоки

Для практического использования выведены зависимости механических свойств тонкой проволоки класса прочности НТ от скорости волочения.

Предел прочности тонкой проволоки:

$$\sigma_B = -8,6429\vartheta^2 + 53,157\vartheta + 3076,2, \quad (1)$$

где  $\vartheta$  – скорость волочения, м/с.

Относительное удлинение тонкой проволоки:

$$\delta = 0,1143\vartheta^2 - 0,8057\vartheta + 3,92. \quad (2)$$

Предел прочности металлокорда:

$$\sigma_B = 38,084\vartheta^2 + 207,63\vartheta + 2158,8. \quad (3)$$

Относительное удлинение металлокорда:

$$\delta = 0,0161\vartheta^2 - 0,0947\vartheta + 1,8138. \quad (4)$$

### Влияние скорости деформации на микротвердость тонкой стальной проволоки

Процесс волочения характеризуется неравномерностью деформаций по сечению проволоки. Избыточные растягивающие напряжения на поверхности проволоки приводят к снижению пластических свойств проволоки в целом. Неравномерность деформации является также источником возникновения остаточных напряжений, ухудшающих прямолинейность проволоки и металлокорда. В идеальном случае неравномерность деформации должна отсутствовать, а в реальном – должна быть минимизирована. Распределение деформации в проволоке в очаге деформации в каждой волоке различно. По мере продвижения проволоки к последней волоке неравномерность деформации повышается. Формирование в проволоке высокого градиента неравномерной деформации негативно сказывается на пластических свойствах проволоки и является причиной появления остаточных напряжений, которые снижают технологичность свивки проволоки в металлокорд.

В качестве исходных образцов для исследования применяется тонкая проволока диаметром 0,35 мм, класс прочности НТ, материал – сталь 80, количество переходов волочения – 21, диаметр проволочной заготовки – 1,97 мм.

С целью экспериментального анализа неравномерности деформации по сечению проволоки и скорости при волочении использовали метод определения микротвердости металла в разных точках

поперечного сечения тонкой проволоки. Микротвердость по поперечному сечению проволоки определяли проведением испытаний на микротвердомере ПМТ-3 по вдавливаю микроиндентора в поперечное сечение проволоки согласно ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. На рис. 2, а показана схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки, а на рис. 2, б – образец тонкой проволоки с отпечатками после внедрения микроиндентора для определения распределения микротвердости в поперечном сечении проволоки.

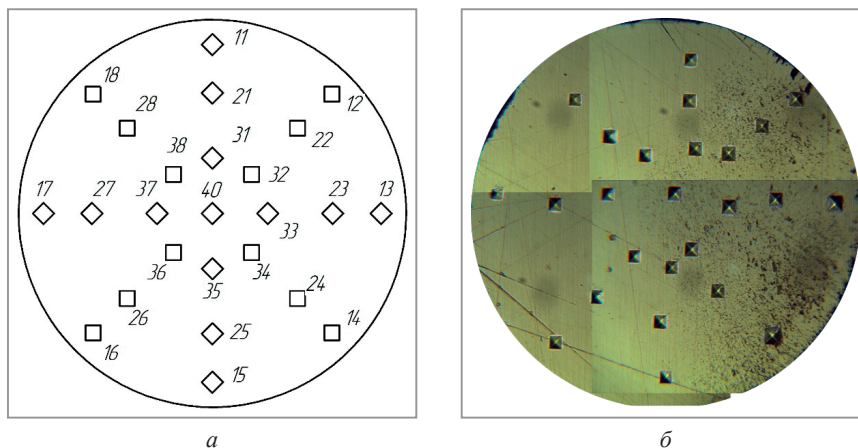


Рис. 2. Определение микротвердости в поперечном сечении проволоки диаметром 0,35 мм: а – схема внедрения микроиндентора в образец проволоки; б – сечение образца проволоки после измерения микротвердости

На основании полученных данных были построены диаграммы зависимости распределения прочности и пластичности по сечению от скорости волочения (рис. 3).

Определено, что при увеличении скорости волочения наблюдается рост среднего значения микротвердости проволоки по следующей зависимости:

$$HV = 359^2 - 151,89 + 484,14, \tag{5}$$

где HV – твердость по Виккерсу, ед.;  $\vartheta$  – скорость волочения, м/с.

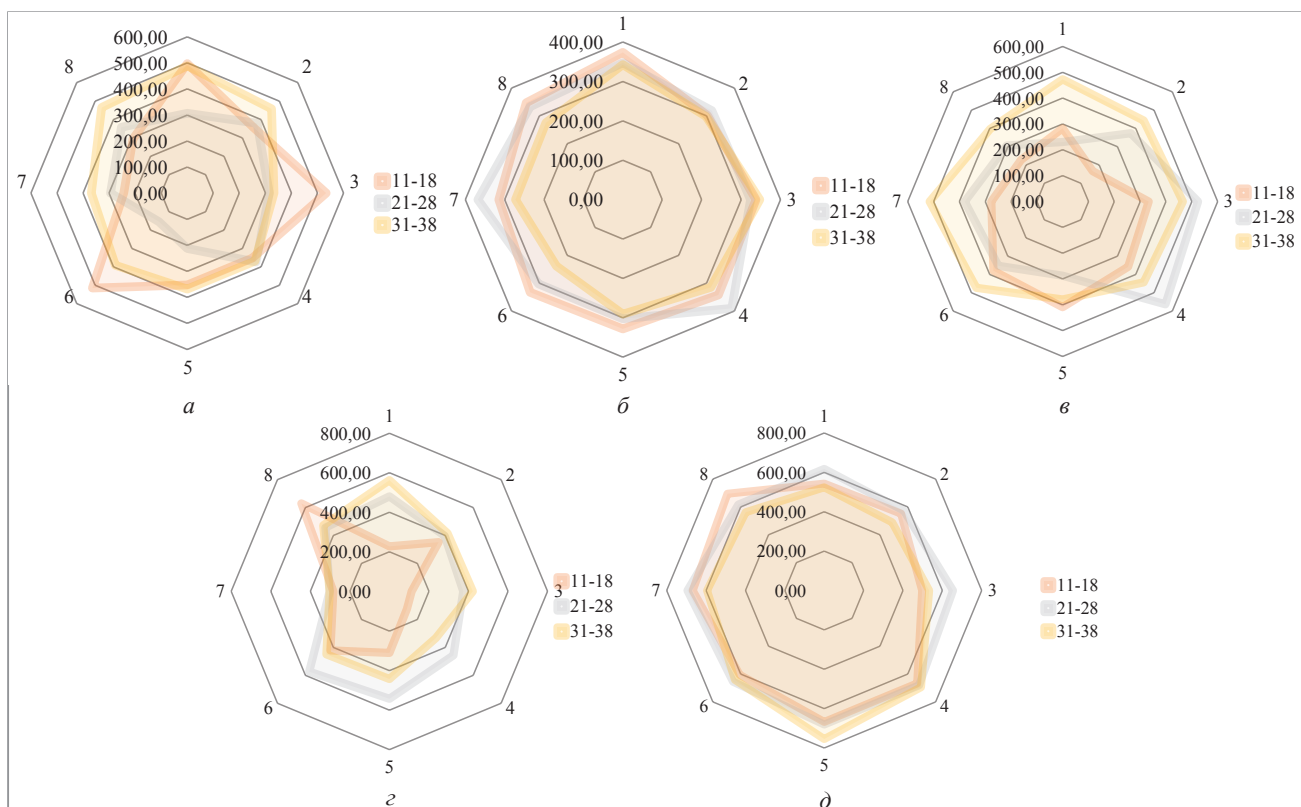


Рис. 3. Диаграмма зависимости твердости проволоки от скорости волочения: а – 1 м/с; б – 4; в – 6; г – 8; д – 10 м/с

Увеличение микротвердости в зависимости от увеличения скорости волочения может быть связано с увеличением скорости деформации при волочении, с изменением температурных и контактных условий деформации, а также с изменением сопротивления пластической деформации тонкой проволоки в процессе волочения.

По результатам определено, что наибольшей равномерностью распределения микротвердости обладают образцы проволоки, изготовленные со скоростью волочения 4 и 10 м/с. Среднеквадратичное отклонение значений для этих скоростей составляет 35 и 74 HV. Наибольшей твердостью обладает проволока, изготовленная со скоростью волочения 10 м/с (средняя твердость по сечению 614 HV), наименьшей твердостью – со скоростью волочения 4 м/с (средняя твердость по сечению 321 HV).

### Выводы

Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения улучшения технологичности свивки металлокорда с учетом влияния скорости тонкого волочения. Свойства тонкой проволоки отразятся на величине обрывности металлокорда при свивке, отбраковке металлокорда по прямолинейности и кручению.

Выведенные зависимости механических свойств тонкой проволоки класса прочности НТ от скорости волочения могут быть использованы на практике и при математическом моделировании процессов волочения и свивки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Константинов, И.Л.** Основы технологических процессов обработки металлов давлением / И.Л. Константинов, С.Б. Сидельников. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 488 с.

### REFERENCES

1. **Konstantinov I.L., Sidel'nikov S.B.** *Osnovy tehnologicheskikh processov obrabotki metallov davleniem* [Fundamentals of technological processes of metal forming]. Krasnojarsk, Sibirskij Federal'nyj universitet Publ., 2015, 488 p.