

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ

Ю.Л. Бобарикин, Ю.В. Мартьянов, И.А. Цырганович

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

Рассмотрено влияние скорости тонкого волочения на распределение микротвердости по поперечному сечению тонкой проволоки. Определена степень равномерности распределения микротвердости по слоям поперечного сечения тонкой проволоки через оценку среднеквадратичного отклонения значений микротвердости и пластичности. Определена зависимость значения микротвердости от скорости тонкого волочения.

Ключевые слова: проволока, скорость волочения, микротвердость

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THIN WIRE DRAWING SPEED ON ITS MICROHARDNESS

Y. L. Bobarikin, Y. V. Martyanov, I.A. Tsyrganovich

Gomel state technical university n. a. P.O. Sukhoi
Gomel, Republic of Belarus

The effect of the of thin wire drawing speed on the distribution of micro-hardness on the cross-section of thin wire is considered. The degree of micro-hardness distribution across the layers of the thin wire cross-section by evaluation the average quadratic deviation of micro-hardness and plasticity values is determined. The dependence and equation of the value of micro-hardness on the thin wire drawing speed is determined.

Keywords: wire, drawing speed, microhardness

E-mail: bobarikin@tut.by, you_rock@tut.by, cyrganovich@gmail.com

Производительность процесса волочения тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки определяется скоростью волочения. Скорость тонкого волочения влияет не только на производительность процесса, но и на механические свойства тонкой проволоки. Поэтому актуально определять влияние роста скорости волочения на механические свойства тонкой проволоки. Влияние скорости тонкого волочения на механические свойства тонкой проволоки связано с влиянием скорости деформации на напряженно-деформированное состояние обрабатываемой тонкой проволоки.

Скорость деформации влияет на сопротивление пластической деформации, степень упрочнения материала и, как следствие, на комплекс механических свойств проволоки.

Оценивать механические свойства на микроуровне возможно путём измерения микротвердости поперечного сечения тонкой проволоки. Распределение микротвердости по поперечному сечению тонкой проволоки даст возможность в перспективе оценивать остаточные напряжения тонкой проволоки.

Цель: определение влияния скорости тонкого волочения на микротвердость поперечного сечения тонкой проволоки.

Метод исследования: лабораторный метод с изготовлением микрошлифов проволоки и измерением микротвердости поверхности торца проволоки, статистический метод оценки полученных значений.

Микротвердость измеряют путем вдавливания в образец алмазной пирамидки под действием статической нагрузки в течение определенного времени выдержки. Значение твердости определяют по Виккерсу (используется пирамидка с квадратным основанием). Основным вариантом испытания является метод восстановленного отпечатка: размеры отпечатков определяются после снятия нагрузки. Когда требуется определение дополнительных характеристик материала (например, упругое восстановление, релаксация) допускается проводить испытание по методу невозстановленного отпечатка. При этом размеры отпечатка определяют на глубине вдавливания индентора в процессе приложения нагрузки [1]. В данном исследовании используется метод восстановленного отпечатка. Практически значение твердости определяется по двум диагоналям отпечатка.

Реальный процесс волочения проволоки характеризуется неравномерностью деформаций по сечению проволоки в радиальном направлении. Избыточные растягивающие напряжения на поверхности проволоки приводят к повышению прочностных свойств проволоки на поверхности. Неравномерность деформации приводит к неравномерности распределения остаточных напряжений. Остаточные напряжения ухудшают эксплуатационные характеристики проволоки. В идеальном случае неравномерность деформации по сечению отсутствует, а в реальном случае должна быть сведена к минимуму. С каждым последующим переходом волочения неравномерность деформации накапливается. В случае отклонения направления градиента деформации от радиального в сечении проволоки проявляется эффект неравномерного упрочнения проволоки.

В качестве образцов используется тонкая проволока диаметром 0,35 мм класса прочности *HT*, сталь 80, изготовленная с различными скоростями волочения.

С целью экспериментального анализа неравномерности упрочнения по сечению проволоки в зависимости от скорости волочения используется метод определения микротвердости металла в разных точках поперечного сечения тонкой проволоки. Микротвердость в поперечном сечении проволоки определяется с использованием микротвердомера ПМТ-3. На рис. 1 показана схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки.

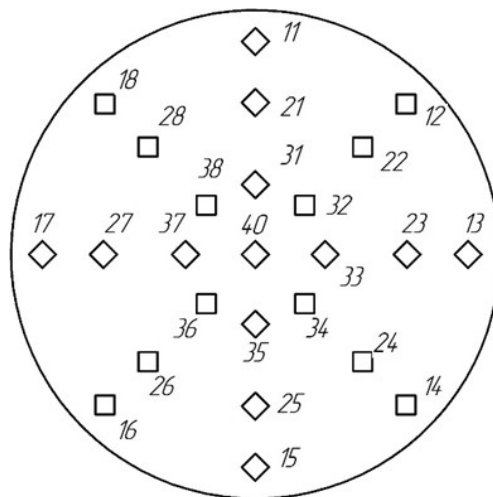


Рис. 1. Схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки

Значение твердости по Виккерсу вычисляют по формуле [1]:

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (1)$$

где F – нагрузка, Н;

P – нагрузка, кгс;

α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ;

d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

В соответствии с [1, 2] значения микротвердости могут использоваться для определения механических характеристик исследуемых образцов. Это дает возможность с помощью измерения микротвердости сечения проволоки оценить характер распределения механических свойств металла в сечении проволоки. В зависимости от микротвердости уравнение для расчета пластичности имеет вид [3]:

$$\delta = 1 + \frac{1}{\sin \gamma \cdot \ln(\sin \gamma)} (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}, \quad (2)$$

где δ – пластичность, ед;

γ – угол между осью пирамиды (индентора) и ее гранью, для пирамидального индентора Виккерса $\gamma = 68^\circ$;

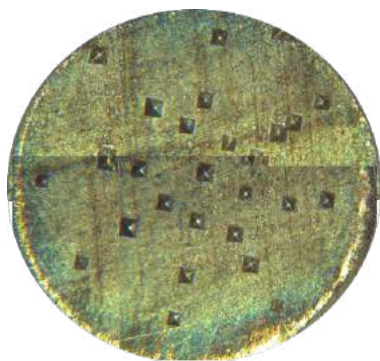
ν – коэффициент Пуассона для данного материала (сталь 80), $\nu = 0,29$;

E – модуль Юнга, $E = 205\,000$ МПа;

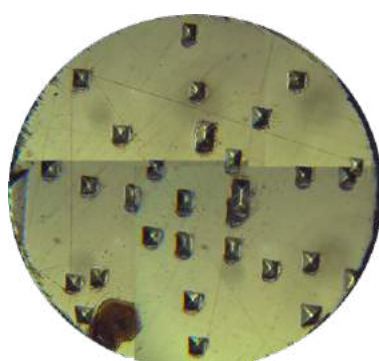
HV – твердость по Виккерсу, ед.

Под пластичностью стоит понимать значение функции, обратной функции твердости, в исследуемой точке.

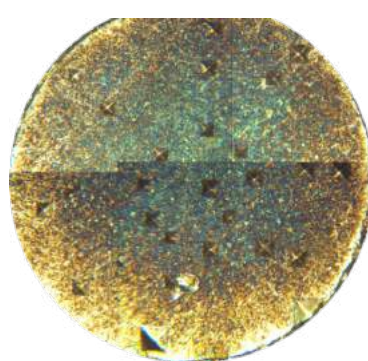
Согласно представленной схеме проведения испытания на микротвердость проведено испытание пяти образцов тонкой проволоки диаметром 0,35 мм, изготовленными в производственных условиях со скоростями волочения 1 м/с, 4 м/с, 6 м/с, 8 м/с и 10 м/с. На каждом образце было совершено по 25 уколов согласно схеме, представленной на рис. 1. После проведения испытания полученные отпечатки были измерены согласно [1] и сфотографированы на камеру микроскопа ЛОМО МЕТАМ РВ-2. Для каждого образца производилась съёмка четырех фотографий: по одному фото на каждую четверть сечения проволоки. Далее производилось составление фотографий в цельное сечение проволоки. Полученные составные фотографии сечения проволоки представлены на рис. 2.



1 м/с



4 м/с



6 м/с

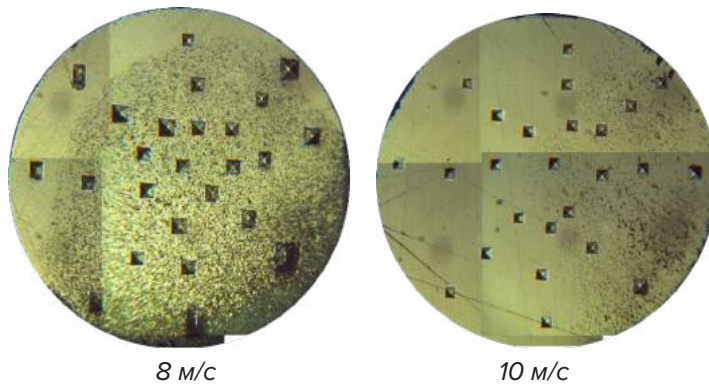


Рис. 2. Фотографии отпечатков, полученных при испытании на микротвердость

По рис. 2 видно, что наиболее ровными отпечатками от пирамидки при измерении микротвердости по Виккерсу обладают образцы 1 м/с и 10 м/с. Результаты отпечатков остальных образцов носят удовлетворительный характер. Из рис. 2 следует, что картина отпечатков микротвердости соответствует карте испытаний (рис. 1) для всех исследуемых образцов проволоки.

После получения данных о размерах отпечатков согласно [1], на их основании были проведены расчеты твердости и пластичности различных участков образцов согласно представленной схеме на рис. 1.

Диаграммы зависимости распределения значений твердости по сечению от скорости волочения представлены на рис. 3–7.

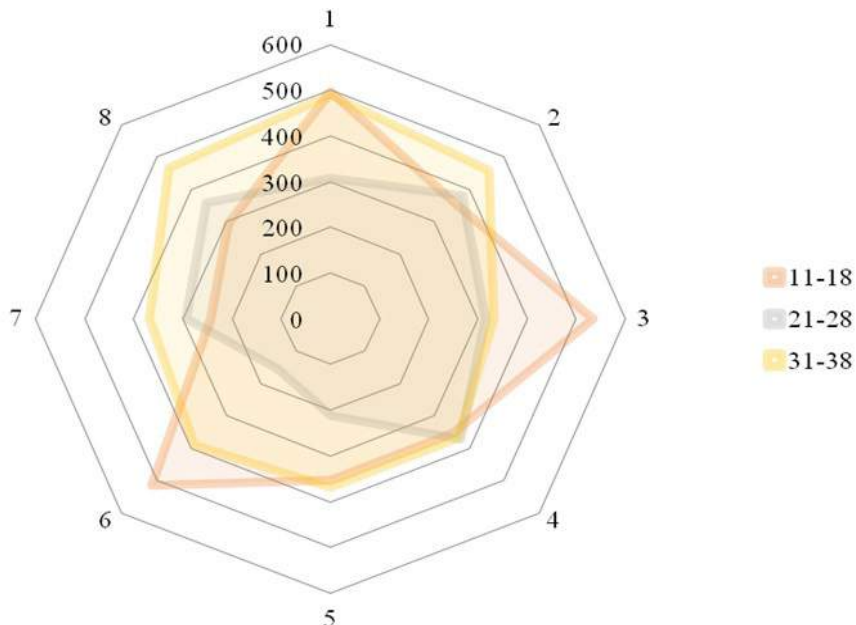


Рис. 3. Диаграмма твердости проволоки, изготовленной со скоростью волочения 1 м/с

Согласно рис. 3 распределение твердости по точкам 11–18 имеет неравномерный характер. Наибольшие значения твердости имеют точки 11, 13, 16, 31, 32, 38. В точках 21–28 и 31–38 наблюдается равномерное распределение твердости с небольшим уменьшением твердости в точке 26. Область в центре сечения (диапазон 31–38) имеет наибольшую равномерность распределение твердости. Область сечения, близкая к поверхности проволоки, (диапазон 11–18) имеет наименьшую равномерность распределение твердости.

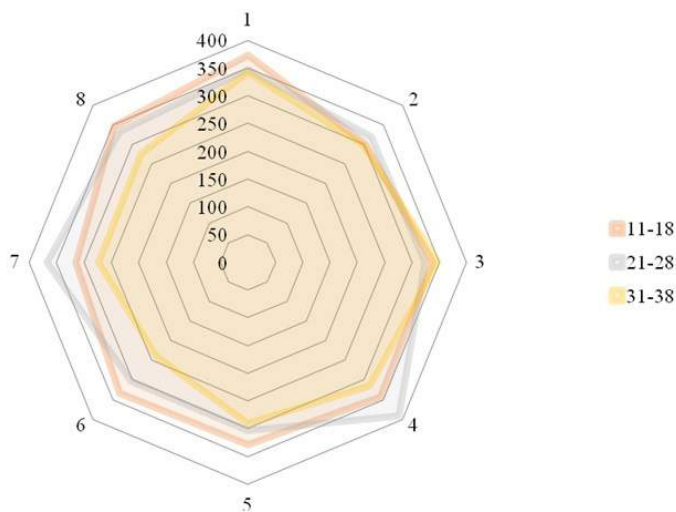


Рис. 4. Диаграмма твердости проволоки, изготовленной со скоростью волочения 4 м/с

Согласно рис. 4 распределение твердости по диапазону точек 11–18, 21–28 и 31–38 имеет равномерный, без значительных перепадов твердости, характер, что свидетельствует о равномерном распределении твердости по всему сечению тонкой проволоки. Величины твердости на всем сечении во всех точках имеют небольшие среднеквадратичные отклонения. Следовательно, распределению твердости от поверхности к центру проволоки равномерное.

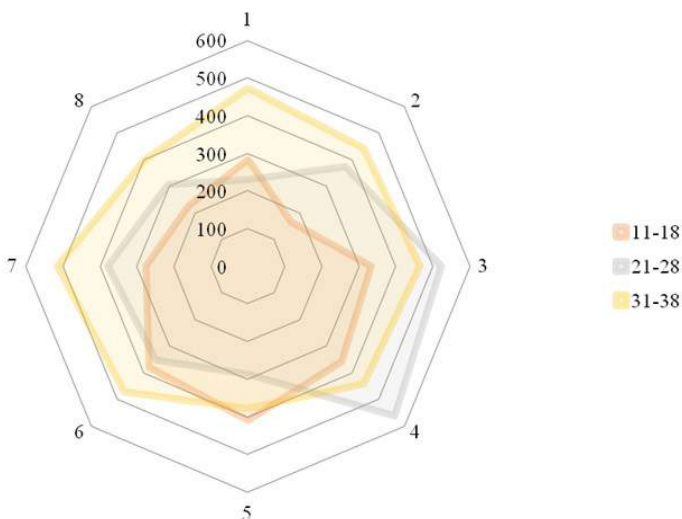


Рис. 5. Диаграмма твердости проволоки, изготовленной со скоростью волочения 6 м/с

Согласно рис. 5 распределение твердости по точкам 11–18 имеет неравномерный характер одновременно с небольшим увеличением твердости в направлении точек 15, 16 и уменьшением твердости в точке 12. Распределение твердости по точкам 21–28 имеет неравномерный характер. Ярко выражен рост твердости в направлении точек 22, 23, 24 в то время, как остальные точки указанного диапазона имеют отставание в росте твердости. Так же видно, что область в центре сечения (диапазон 31–38) имеет наибольшую равномерность распределения твердости, превосходящую равномерность распределения твердости в среднем диаметре сечения (диапазон 21–28) и внешним диаметром (диапазон 11–18). Таким образом, центр поперечного сечения проволоки имеет большую твердость по сравнению с поверхностными слоями поперечного сечения проволоки.

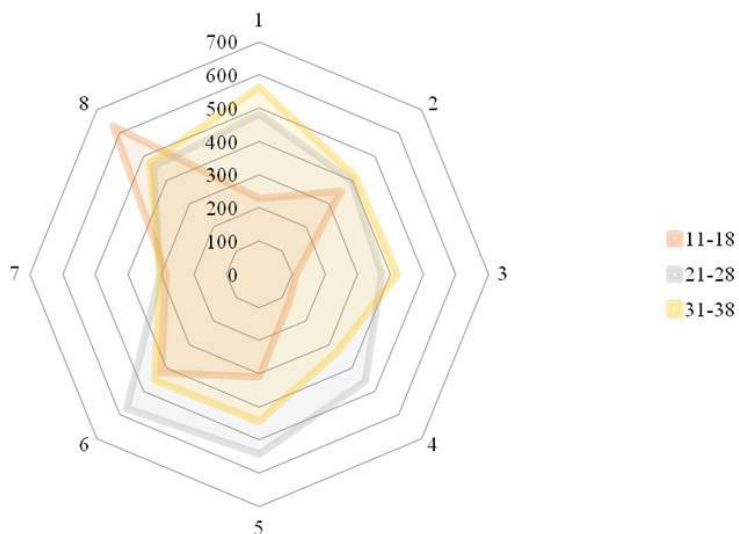


Рис. 6. Диаграмма твердости проволоки, изготовленной со скоростью волочения 8 м/с

Согласно рис. 6 имеется ярко выраженное повышение твердости в точке 18, а также сильную неравномерность распределения твердости по поверхностным слоям сечения проволоки. Распределение твердости по точкам 21–28 имеет более равномерный характер по сравнению с предыдущим распределением, однако наблюдаются снижения твердости в точках 23 и 27. Ярко выражено увеличение твердости в направлении точек 21, 25 и 26. Твердость в области центра сечения (диапазон 31–38) близка по значениям области среднего диаметра (диапазон 21–28) и имеет более равномерное распределение твердости по сравнению с внешним диаметром (диапазон 11–18).

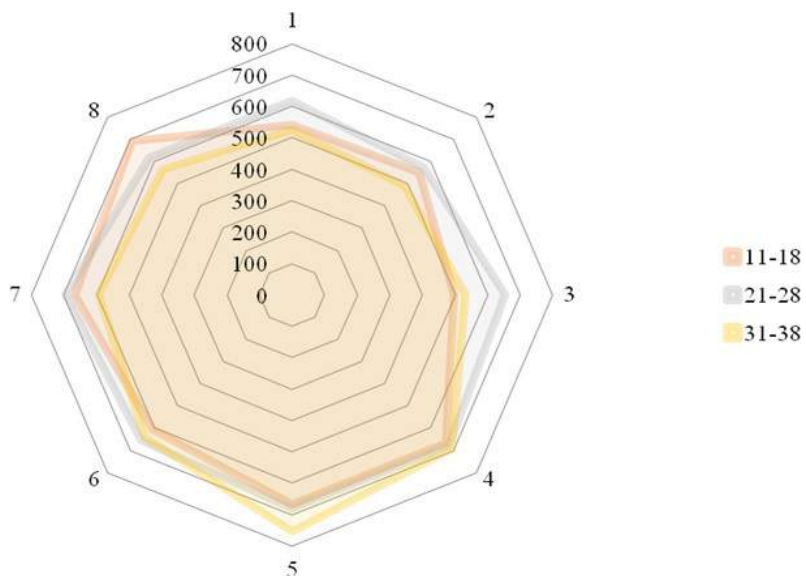


Рис. 7. Диаграмма твердости проволоки, изготовленной со скоростью волочения 10 м/с

Согласно рис. 7 распределение твердости по точкам 11–18, 21–28 и 31–38 имеет равномерный, без значительных перепадов твердости, характер, что свидетельствует о равномерном распределении твердости на всем сечении во всех точках. Величины твердости на всем сечении в тонкой проволоке имеют небольшие отклонения. Следовательно, распределение твердости от поверхности к центру проволоки равномерное.

Диаграмма зависимости среднего значения микротвердости по всему сечению тонкой проволоки от скорости волочения представлена на рис. 8. Диаграмма зависимости среднего значения пластичности, рассчитанной по формуле (2), по всему сечению тонкой проволоки от скорости волочения представлена на рис. 9.

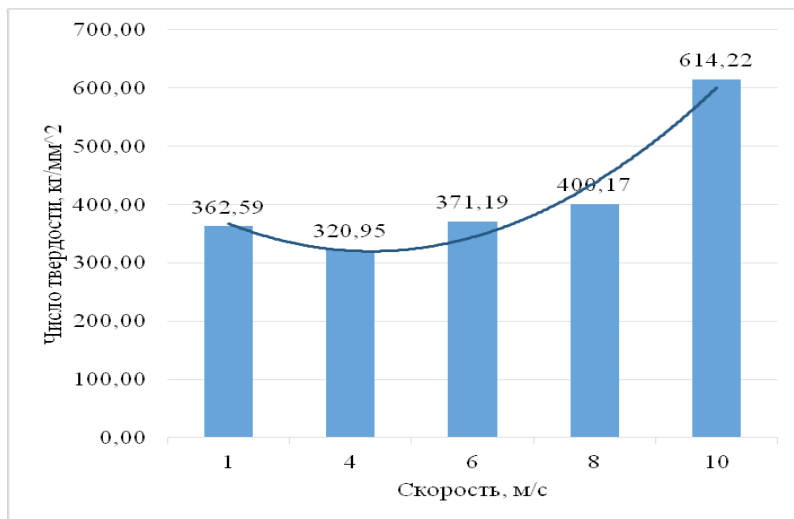


Рис. 8. Диаграмма зависимости среднего значения микротвердости по всему сечению тонкой проволоки от скорости волочения

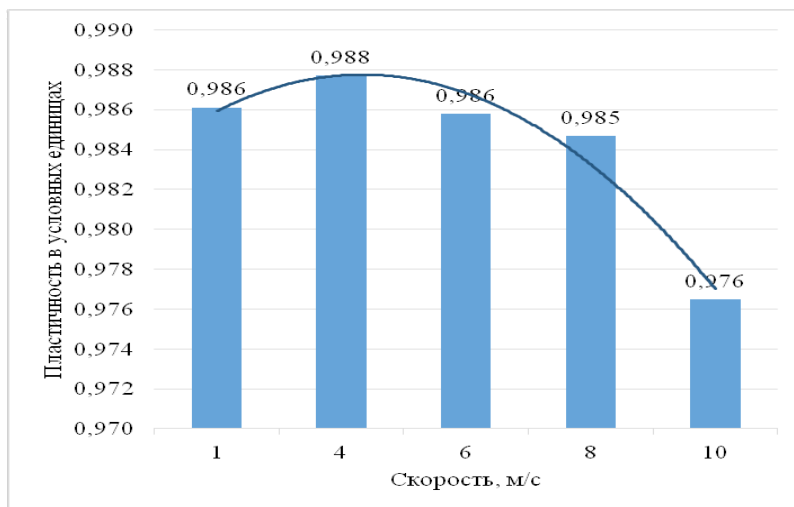


Рис. 9. Диаграмма зависимости среднего значения пластичности по всему сечению тонкой проволоки от скорости волочения

Согласно рис. 8 и 9 наблюдается классическая картина увеличения твердости (прочности) и снижения пластичности тонкой проволоки с увеличением скорости волочения. Это связано с увеличением сопротивления пластической деформации при увеличении скорости деформации. Наблюдается значительное увеличение (+ 34,85 %) значения микротвердости проволоки при увеличении скорости волочения с 8 м/с до 10 м/с.

Оценка равномерности распределения твердости по поперечному сечению тонкой проволоки производилась с помощью вычислений среднеквадратичного отклонения. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Табл. 1

**Среднеквадратичное отклонение микротвердости и пластичности
тонкой проволоки по точкам поперечного сечения**

Скорость волочения, м/с	Диапазон точек	Среднеквадратичное отклонение микротвердости		Среднеквадратичное отклонение пластичности	
		По диапазону точек	Среднее по сечению	По диапазону точек	Среднее по сечению
1	11–18	108,107	93,364	0,0041	0,0036
	21–28	79,431		0,0030	
	31–38	57,187		0,0022	
	40	–		–	
4	11–18	21,384	35,049	0,0008	0,0013
	21–28	31,225		0,0012	
	31–38	36,699		0,0014	
	40	-		-	
6	11–18	81,712	102,431	0,0031	0,0039
	21–28	114,214		0,0044	
	31–38	43,767		0,0017	
	40	–		–	
8	11–18	167,793	131,134	0,0064	0,0050
	21–28	88,805		0,0034	
	31–38	80,851		0,0031	
	40	–		–	
10	11–18	73,259	74,712	0,0028	0,0029
	21–28	41,197		0,0016	
	31–38	91,472		0,0035	
	40	–		–	

Согласно табл. 1 наибольшей равномерностью распределения микротвердости по поперечному сечению тонкой проволоки обладают образцы проволоки, произведенные со скоростями 4 м/с и 10 м/с.

Заключение

По результатам исследований определено, что наибольшей равномерностью распределения микротвердости обладают образцы тонкой проволоки, изготовленные со скоростью волочения 4 м/с и 10 м/с. Среднеквадратичное отклонение значений для этих скоростей составляет 35HV и 75HV. Наибольшей твёрдостью обладает проволока, изготовленная со скоростью волочения 10 м/с (средняя твёрдость по сечению 614 HV), наименьшей твёрдостью обладает проволока, изготовленная со скоростью волочения 4 м/с (средняя твёрдость по сечению 321 HV).

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

$$HV = 3592 - 151,89 \vartheta + 484,14 \quad (3)$$

где HV – твёрдость по Виккерсу, ед.;

ϑ – скорость волочения, 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 изменения сопротивления пластической деформации тонкой проволоки в процессе волочения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Порядок проведения измерений: ГОСТ 9450–76; введ. РБ 17.12.1992. – Минск: Постановление Комитета по стандартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь, 1992. – 35с.
2. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., исправл. и доп. / А.С. Зубченко [и др.]; под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

REFERENCES

1. Izmerenie mikrotverdosti vдавливaniem алмазных наконечников. Poryadok provedeniya izmerenij [Microhardness measurement by indentation of diamond tips. The order of measurements]: GOST 9450–76; enter RB 12/17/1992. – Minsk: Resolution of the Committee for Standardization, Metrology and Certification under the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 1992. 35 p. (in Russian)
2. Zubchenko [et al.] A.S. Marochnik stalej i splavov [Marochnik steels and alloys]. 2nd ed., Corrig. and add. / under the editorship of A.S. Zubchenko. – M.: Mechanical Engineering, 2003 . 784 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 13.07.2020