



УДК 621.78:669.15-194.56

DOI 10.17073/0368-0797-2023-5-544-553



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ СЕРЕБРА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 03X17N10M2

А. Д. Горбенко^{1,2}, М. А. Каплан¹, С. В. Конушкин¹, Е. О. Насакина¹,
А. С. Баикин¹, К. В. Сергиенко¹, А. Ю. Иванников¹, Я. А. Морозова^{1,2},
С. А. Ошкуков³, А. Г. Колмаков¹, М. А. Севостьянов^{1,2}

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

² Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии (Россия, 143050, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5)

³ Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского (Россия, 129110, Москва, ул. Щепкина, 61/2)

✉ artemgorbenk@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние различных термических обработок, их температуры, а также легирования серебром на механические свойства, фазовый состав и структуру проволоки из нержавеющей хромоникельмолибденовой аустенитной стали 03X17N10M2. Выбор величины легирования серебром основывался на ранее проведенных исследованиях антибактериального эффекта от модифицирования медицинских сталей серебром. Поскольку антибактериальное воздействие подтверждено на нескольких штаммах бактерий, для наиболее эффективной эксплуатации сплавов требуется определить наилучший температурный режим работы с ними. Сталь для исследования выплавлена и затем через операции прокатки,ковки и волочения преобразована в проволоку. На полученных образцах проволоки разного диаметра с содержанием серебра 0; 0,2 и 0,5 % (по массе) проведены механические испытания для определения относительного удлинения, предела текучести и предела прочности. На проволоке разного диаметра опробованы различные режимы и температуры термических обработок для исследования их влияния на механические свойства и структуру. Исследована микроструктура подвергнутых термической обработке и полученных после волочения образцов проволоки. Также проведен фазовый анализ с целью установления эффекта от присутствия серебра в различных количествах на аустенитную сталь. По результатам исследования фазового состава сделан вывод, что серебро уменьшает количество гамма-фазы в стали, и этот эффект растет пропорционально увеличению доли серебра. Данное изменение коррелирует с небольшим падением пластичности металла. При этом значимых изменений в прочностных характеристиках и микроструктуре от присутствия серебра не наблюдается.

Ключевые слова: термическая обработка, проволока, серебро, нержавеющая сталь, механические свойства, фазовый состав

Для цитирования: Горбенко А.Д., Каплан М.А., Конушкин С.В., Насакина Е.О., Баикин А.С., Сергиенко К.В., Иванников А.Ю., Морозова Я.А., Ошкуков С.А., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. Влияние серебра и термической обработки на свойства проволоки из аустенитной стали 03X17N10M2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(5):544–553. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

EFFECT OF SILVER AND HEAT TREATMENT ON PROPERTIES OF 03Kh17N10M2 AUSTENITIC STEEL WIRE

A. D. Gorbenko^{1,2}, M. A. Kaplan¹, S. V. Konushkin¹, E. O. Nasakina¹,
A. S. Baikin¹, K. V. Sergienko¹, A. Yu. Ivannikov¹, Ya. A. Morozova^{1,2},
S. A. Oshkukov³, A. G. Kolmakov¹, M. A. Sevost'yanov^{1,2}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

² All-Russian Research Institute of Phytopathology (5 Institut Str., Bol'shie Vyazemy Vil., Odintsovo District, Moscow Region 143050, Russian Federation)

³ M.F. Vladimirovskii Moscow Regional Research Clinical Institute (61/2 Shchepkina Str., Moscow 129110, Russian Federation)

 artemgorbenk@yandex.ru

Abstract. The article examines the influence of various heat treatments, their temperature, as well as silver alloying on mechanical properties, phase composition and structure of steel wire from chromium-nickel-molybdenum austenitic stainless steel 03Kh17N10M2. Choice of the amount of silver alloying was based on previous studies of the antibacterial effect of modifying medical steels with silver. Since the antibacterial effect was confirmed on several bacterial strains, for the most efficient operation of alloys, it is necessary to determine the best temperature mode for working with them. Steel for the study was smelted and then transformed into wire through rolling, forging and drawing operations. On the obtained wire samples of different diameters with a silver content (0; 0.2 and 0.5 wt. %) mechanical tests were carried out to determine the elongation, yield strength and tensile strength. Various modes and temperatures of heat treatment were tested on wire of different diameters to study their effect on mechanical properties and structure. Microstructure of the wire samples subjected to heat treatment and obtained after drawing was investigated. A phase analysis was also carried out to determine the effect of silver in various quantities on austenitic steel. According to the results of the phase composition analysis, it was concluded that silver reduces the amount of gamma phase in steel, and this effect increases in proportion to the increase in silver amount. This change correlates with a slight drop in the metal ductility. At the same time, there are no significant changes in the strength characteristics and microstructure from the presence of silver.

Keywords: heat treatment, wire, silver, stainless steel, mechanical properties, phase composition

For citation: Gorbenko A.D., Kaplan M.A., Konushkin S.V., Nasakina E.O., Baikina A.S., Sergienko K.V., Ivannikov A.Yu., Morozova Ya.A., Oshkukov S.A., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A. Effect of silver and heat treatment on properties of 03Kh17N10M2 austenitic steel wire. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):544–553. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-544-553>

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные стали широко применяются в тех областях хозяйственной деятельности, где от материалов требуются высокая стойкость к коррозионному воздействию и долговечность. Например, медицина, пищевая промышленность, химическое производство и др. Это связано с комплексом требований, включающих коррозионную стойкость и относительно низкую стоимость. Эти стали получили распространение в медицине при непосредственной работе с человеческим телом (прямой и продолжительный контакт, например, имплантация) также благодаря биотолерантности и достаточно высокой пластичности [1 – 3].

При имплантации на короткие сроки используются биотолерантные материалы, которыми являются, в том числе согласно ГОСТам, высоколегированные нержавеющие стали [4; 5]. Они могут использоваться и для создания протезов с длительным сроком действия [6; 7], но в настоящее время в этом случае их дополняют покрытиями и другими способами повышения биосовместимости [8]. Нержавеющие медицинские стали устойчивы к агрессивной среде внутри человеческого тела и, что особенно важно, не вызывают иммунной реакции (исключая индивидуальную, редкую аллергическую реакцию на отдельные компоненты). При этом, несмотря на преимущества таких материалов, при проведении операций невозможно исключить вероятность возникновения бактериальной инфекции в области вокруг имплантата [9 – 12].

Серебро известно своей способностью нарушать обмен веществ у бактерий [13 – 16]. Это важное свойство оно сохраняет и при использовании в составе наносимого на изделия покрытия [17; 18], и даже в виде компонента сплава [19 – 21]. В ряде публикаций [2; 19] авторы провели работу по получению стали 03X17N10M2 с добавлением 0,2 и 0,5 % Ag и исследованию этих составов на предмет антибактериальных свойств. В ходе работы выяснено, что наличие

уже 0,2 % Ag в составе стали достаточно для подавления вредоносных штаммов бактерий *Pseudomonas marginalis* и *Clavibacter*. При этом повышение содержания серебра приводило к более выраженному эффекту. Эти составы также изучались для определения механических свойств и микроструктурных изменений. Однако исследования проводились на материалах в форме слитков и катаных изделий. В то же время использование таких сталей возможно в виде проволоки, либо в качестве заготовки, например, для дальнейшего применения в аддитивном производстве или сварке, либо для формирования изделий простой механической обработкой.

Настоящая работа проводилась с целью определения механических свойств проволоки из стали 03X17N10M2 (схожей по химическому составу со сталями, применяющимися в медицине и бижутерии, вроде 316L) с добавлением серебра, влияния серебра на структуру стали, ее фазовый состав и механические свойства, а также влияния различных типов термической обработки на исследуемую сталь с добавлением серебра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выплавка стали проведена в институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Путем трехкратной переплавки получена хромоникельмолибденовая нержавеющая аустенитная сталь 03X17N10M2 с дополнительным микролегированием серебром. Химический состав полученных сплавов представлен в табл. 1. Под 1 обозначен оригинальный состав без добавления серебра. В сплав 2 добавляли 0,2 % Ag, в сплав 3 – 0,5 % Ag. Подробная технология получения слитков представлена в работе [2].

Прокатка литых заготовок до состояния пластин толщиной в 1 мм проведена на двухвалковом стане. Далее деформированные заготовки поворачивались на 90° и повторением прокатки доводились до состоя-

Составы выплавленных сплавов

Table 1. Compositions of the smelted alloys

Номер сплава	Содержание элемента, % (по массе)									
	C	Cr	Ni	Ag	Si	Mn	Mo	P	S	N
1	0,023	16,75	10,09	0	0,43	1,82	2,05	0,041	0,009	0,073
2	0,023	16,75	10,09	0,2	0,43	1,82	2,05	0,041	0,009	0,073
3	0,023	16,75	10,09	0,5	0,43	1,82	2,05	0,041	0,009	0,073

ния прутка 10×10 мм. Для получения диаметра 2,4 мм проведена ротационная ковка на радиальных ковочных машинах с последовательной сменой бойков и шагом в 1 мм до получения диаметра 5 мм, после чего шаг уменьшался до 0,5 мм. Во времяковки материалы подвергались промежуточному нагреву до 700 °С.

Для возможности дальнейших операций и выявления влияния различных видов термообработки (ТО) на свойства прутков из полученных сталей в муфельной печи проведены различные ТО прутка диаметром 2,4 мм: отжиг, нормализация и закалка.

Перед обработкой до меньшего диаметра осуществлялась операция по удалению окалины, для чего использовался раствор азотной и соляной кислот. Смазывание прутков проводилось с использованием натриевого мыла, а в качестве подсмазочного слоя наносилась бура. Этот слой нужен для повышения адгезии смазочного материала к стальной поверхности.

Дальнейшее изменение диаметра до размера в 1 мм проведено на волочильном стане. Операция проходила на воздухе. С диаметра 2,4 до 1,6 мм проволока

обрабатывалась со скоростью 5 м/мин, с уменьшением диаметра на 0,2 мм за проход. После этого для разупрочнения нагартованной стали в печи проведена двухминутная термическая обработка при 900 °С. Дальнейшее волочение проволоки до диаметра 1 мм проходило в 2 раза меньшими шагом и скоростью: 0,1 мм за проход и 2,5 м/мин соответственно.

После получения финального диаметра проволока из стали без добавления серебра подвергалась термической обработке при температурах 900, 950, 1000 и 1050 °С с выдержкой 2,5 мин (рис. 1).

Структурные исследования проводились на шлифах. Запрессовка образцов полученных сталей осуществлялась в непроводящую смолу. После этого образцы были отшлифованы и отполированы.

Травление поверхности выполняли с помощью состава для высоколегированных сталей, состоящего из плавиковой, серной и азотной кислот (2, 15 и 5 % соответственно, остальное вода).

Микроструктурные исследования проведены на микроскопе Альтами МЕТ 5С. В результате получены изображения структуры проволоки двух диаметров: 2,4 и 1 мм. Фотофиксация выполнена в поляризованном свете при максимальной яркости.

Изучен фазовый состав полученных сталей. Рентгеновские дифрактограммы получены в геометрии параллельного пучка в излучении CuK_α . Погрешность положения рефлексов в ходе анализа не превышала $0,01^\circ 2\theta$. Параметр кристаллической решетки уточняли экстраполяцией на $\theta = 90^\circ$ по методу Нельсона-Райли в программе «Origin-2017». Величину микродеформации кристаллической решетки основной фазы определяли по методу Вильямсона-Холла. Количественное содержание кристаллических фаз оценивалось методом корундовых чисел.

Механические свойства полученных проволок рассчитывались по результатам испытаний на растяжение, которые проводились на универсальной испытательной машине INSTRON 3382. Среднее значение высчитывалось на основе пяти опытов. Определение предела прочности, предела текучести и относительного удлинения проведено с помощью программного обеспечения испытательной машины в соответствии с ГОСТ 1497 – 84.



Рис. 1. Полученная проволока диаметром 1 мм

Fig. 1. Obtained wire with a diameter of 1 mm

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены поверхности шлифов, сделанных из прутков диаметром 2,4 мм.

Исходя из анализа микроструктуры, можно заключить, что видимого эффекта на размер зерен присутствия серебра в обоих случаях не оказало.

Материалы после волочения упрочнены, сильно деформированы по всему объему металла, вследствие чего показывают минимальную пластичность. Для возможности дальнейших операций и выявления влияния серебра и типа термической обработки на свойства прутков из стали 03X17N10M2 проведены отжиг, нормализация и закалка полученных прутков. На рис. 3 пред-

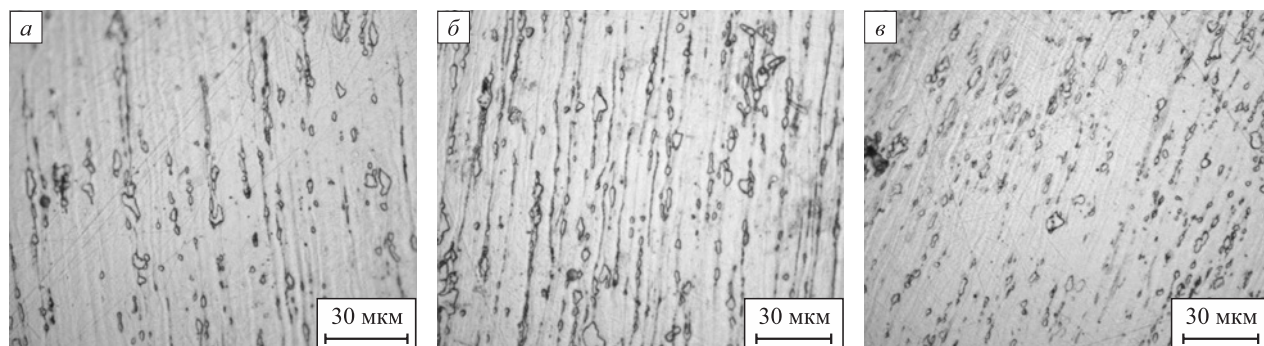


Рис. 2. Микроструктура прутков:
а – 03X17N10M2; б – 03X17N10M2 + 0,2 Ag; в – 03X17N10M2 + 0,5 Ag

Fig. 2. Microstructure of the bars:
а – 03Kh17N10M2; б – 03Kh17N10M2 + 0.2 Ag; в – 03Kh17N10M2 + 0.5 Ag

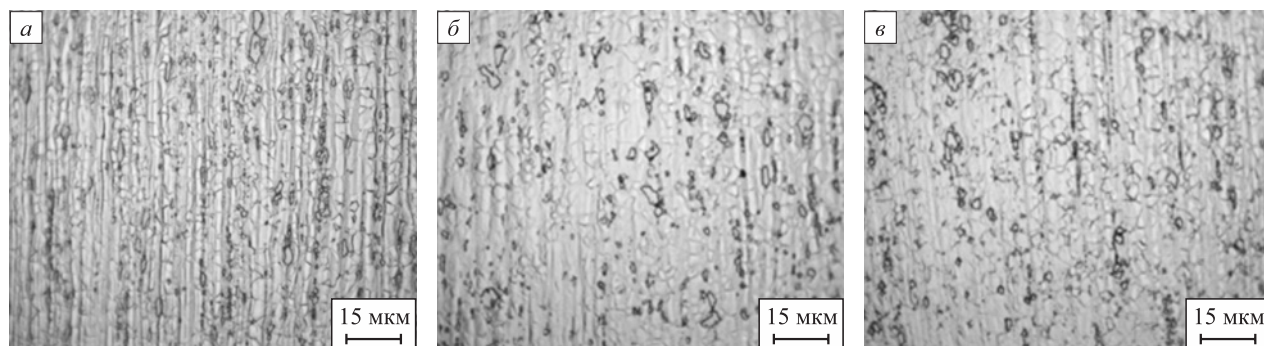


Рис. 3. Микроструктура прутков после нормализации при 900 °С (выдержка 2 мин):
а – 03X17N10M2; б – 03X17N10M2 + 0,2 Ag; в – 03X17N10M2 + 0,5 Ag

Fig. 3. Microstructure of the bars after normalization at 900 °C (holding time – 2 min):
а – 03Kh17N10M2; б – 03Kh17N10M2 + 0.2 Ag; в – 03Kh17N10M2 + 0.5 Ag

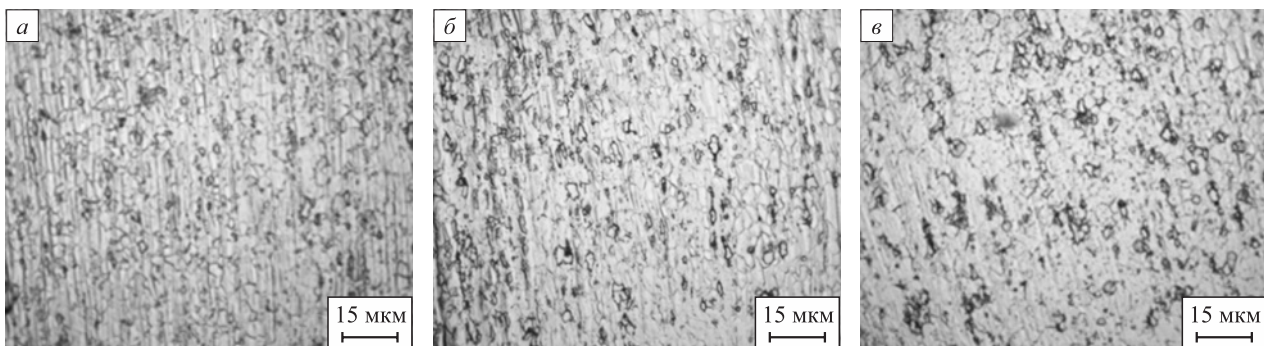


Рис. 4. Микроструктура прутков после отжига при 950 °С (выдержка 2,5 мин):
а – 03X17N10M2; б – 03X17N10M2 + 0,2 Ag; в – 03X17N10M2 + 0,5 Ag

Fig. 4. Microstructure of the bars after annealing at 950 °C (holding time – 2.5 min):
а – 03Kh17N10M2; б – 03Kh17N10M2 + 0.2 Ag; в – 03Kh17N10M2 + 0.5 Ag

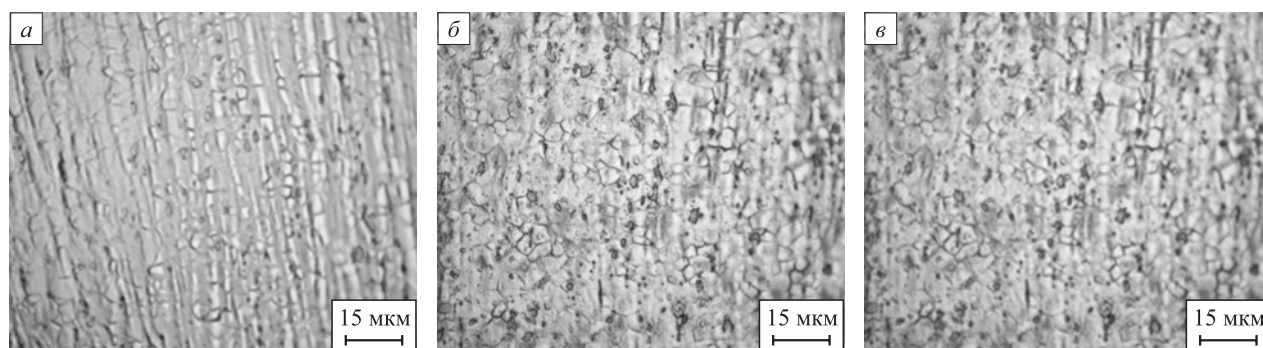


Рис. 5. Микроструктура прутков после закалки 950 °С (выдержка 2,5 мин):
а – 03X17H10M2; б – 03X17H10M2 + 0,2 Ag; в – 03X17H10M2 + 0,5 Ag

Fig. 5. Microstructure of the bars after quenching at 950 °C (holding time – 2.5 min):
а – 03Kh17N10M2; б – 03Kh17N10M2 + 0.2 Ag; в – 03Kh17N10M2 + 0.5 Ag

ставлены изображения трех сплавов после проведения нормализации (900 °С), на рис. 4 – микроструктура после отжига при 950 °С, на рис. 5 – после закалки (950 °С).

После термических обработок в материалах проволок происходит рекристаллизация, благодаря которой осуществляется формирование мелкозернистой структуры (размеры зерен 3 – 6 мкм).

После закалки наблюдается равноосная и мелкодисперсная структура аустенита. Ее полосчатость говорит о том, что рекристаллизация до начала ускоренного охлаждения образцов не завершилась. Охлаждение образцов с печью придало зернам более правильную форму, чем при охлаждении в воде. При этом отожженные образцы показывают лучшую травимость по сравнению с закаленными. У образцов, нормализиро-

ванных от температуры 900 °С, наблюдаются такие же микроструктуры, что и у закаленных.

Микроструктуры всех составов, вне зависимости от наличия серебра, не имеют значительных отличий друг от друга, т. е. микролегирование не вызывает микроструктурных изменений.

Определены механические свойства сталей плавков 1 – 3 после различных термических обработок. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Термическая обработка прутков диаметром 2,4 мм во всех случаях приводит к значительному увеличению пластичности, что необходимо для снятия наклепа и получения проволоки меньшего диаметра. При этом наибольший эффект показало проведение закалки в случае 03X17H10M2 без добавления серебра, позво-

Таблица 2

Механические свойства прутка диаметром 2,4 мм в зависимости от химического состава образца и термической обработки

Table 2. Mechanical properties of a bar with diameter of 2.4 mm, depending on the sample composition and heat treatment

Материал и термическая обработка	Относительное удлинение, %	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
1 (03X17H10M2) после волочения	12 ± 1	243 ± 3	1026 ± 10
1 + нормализация 900 °С, 2 мин	31 ± 1	454 ± 5	760 ± 8
1 + отжиг 950 °С, 2,5 мин	33 ± 2	423 ± 4	738 ± 7
1 + закалка 950 °С, 2,5 мин	53 ± 2	311 ± 3	691 ± 7
2 (03X17H10M2 + 0,2 % Ag) после волочения	10 ± 1	177 ± 3	974 ± 8
2 + нормализация 900 °С, 2 мин	42 ± 2	365 ± 4	721 ± 7
2 + отжиг 950 °С, 2,5 мин	28 ± 1	346 ± 3	667 ± 7
2 + закалка 950 °С, 2,5 мин	35 ± 2	295 ± 3	645 ± 5
3 (03X17H10M2 + 0,5 % Ag) после волочения	3 ± 1	276 ± 3	900 ± 9
3 + нормализация 900 °С, 2 мин	30 ± 1	336 ± 4	672 ± 6
3 + отжиг 950 °С, 2,5 мин	31 ± 1	394 ± 5	714 ± 7
3 + закалка 950 °С, 2,5 мин	45 ± 2	293 ± 4	680 ± 6

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки проволоки диаметром 1 мм образцов 1 – 3

Table 3. Phase composition and parameters of the crystal lattice of 1 mm wire samples 1 – 3

Состав	Параметры кристаллической решетки, Å	Фазовый состав	Объемная доля, %	Весовая доля, %
1 (03X17N10M2)	$3,59442 \pm 0,00008$	γ -Fe	$85,3 \pm 0,1$	$85,6 \pm 0,1$
	$2,87512 \pm 0,00011$	α -Fe	$13,8 \pm 0,1$	$13,5 \pm 0,1$
	8,81800	σ -NiCr	$0,9 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$
	4,57800			
2 (03X17N10M2 + 0,2 % Ag)	$3,59488 \pm 0,00009$	γ -Fe	$82,9 \pm 0,2$	$83,3 \pm 0,2$
	$2,87552 \pm 0,00012$	α -Fe	$15,8 \pm 0,1$	$15,5 \pm 0,1$
	8,81800	σ -NiCr	$1,3 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$
	4,57800			
3 (03X17N10M2 + 0,5 % Ag)	$3,59497 \pm 0,00008$	γ -Fe	$74,2 \pm 0,1$	$74,7 \pm 0,1$
	$2,87599 \pm 0,00008$	α -Fe	$24,1 \pm 0,1$	$23,7 \pm 0,1$
	$8,80994 \pm 0,00165$	σ -NiCr	$1,7 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$
	$4,59121 \pm 0,00165$			

лив добиться показателя относительного удлинения более 50 %. Серебро на механические характеристики повлияло мало, немного понизив пластичность. Таким образом, именно закалка выбрана в качестве наиболее подходящего метода подготовки к дальнейшему волочению проволоки до диаметра в 1 мм.

С целью лучшего изучения влияния серебра проведен рентгеновский фазовый анализ. Исследование фазового состава выполнялось уже на проволоках диаметром 1 мм. Данные по фазовому составу проволок представлены в табл. 3 и на рис. 6, 7.

По результатам исследований фазового состава отмечается уменьшение количества γ -Fe и увеличение α -Fe, σ -NiCr от проволоки состава 1 к составу 3. Таким образом, наблюдается ферритообразовательное влияние серебра в составе нержавеющей стали, так как с ростом содержания серебра увеличивается доля α -Fe и σ -NiCr фаз. Присутствие феррита является следствием интенсивной пластической деформации в процессе волочения проволоки, и не подавляется, так как содержание элементов-аустенитизаторов (углерода, марганца и никеля) в стали достаточно низкое. В условиях использования полученной проволоки в таком виде при производстве может быть целесообразной термообработка с целью получения однофазной структуры.

Микроструктура проволок, использованных в фазовом анализе, представлена на рис. 8. После волочения проволока нагартована.

Механические свойства полученных проволок составов 1 – 3 после волочения до диаметра в 1 мм представлены в табл. 4.

Исследование механических свойств проволоки исходного состава и сравнение с легированными

составами показало, что проволока с добавлением серебра имеет аналогичные механические характеристики.

Для выяснения влияния термической обработки на деформационно упрочненную проволоку диаметром 1 мм образцы подвергались термической обработке при температурах 900, 950, 1000 и 1050 °C с выдержкой 2,5 мин. Результаты механических испытаний материала после термической обработки представлены в табл. 5.

Установлено, что с ростом температуры нагрева под закалку увеличивается пластичность и снижается прочность, что происходит из-за снижения плотности

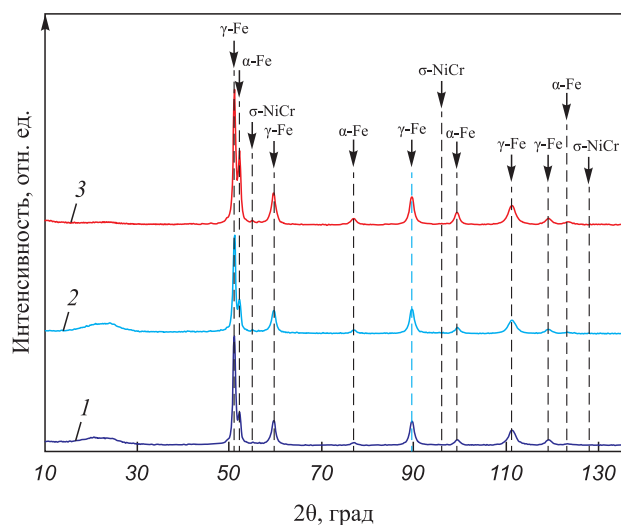


Рис. 6. Дифрактограмма с результатами фазового анализа

Fig. 6. Diffractogram with the results of phase analysis

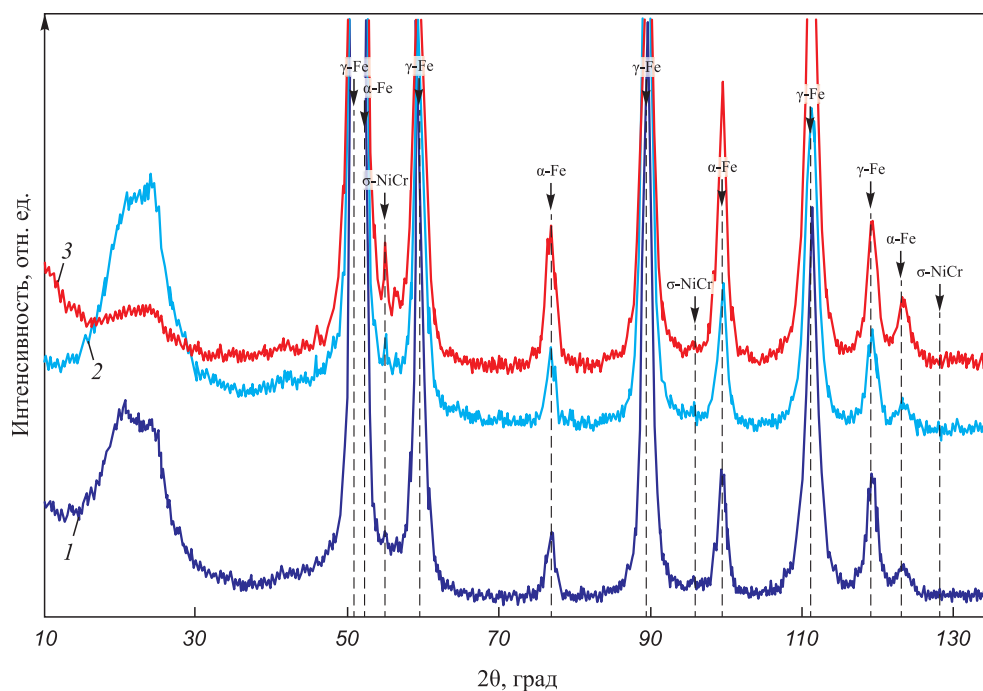


Рис. 7. Увеличенная дифрактограмма с результатами фазового анализа

Fig. 7. Enlarged diffractogram with the results of phase analysis

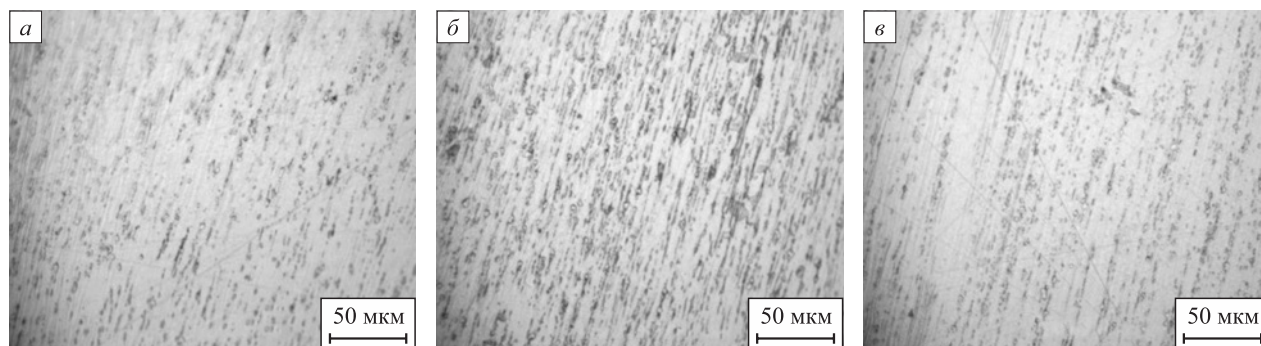


Рис. 8. Микроструктура проволок диаметром 1 мм, полученная при волочении из сталей марок 1 (а), 2 (б), 3 (в)

Fig. 8. Microstructure of the wires with a diameter of 1 mm obtained on optical microscope 1 (a), 2 (b), 3 (c)

дислокаций и увеличения размеров зерна. Среда процесса охлаждения (воздух или вода) одинаково влияет на механические свойства из-за достаточно маленького диаметра проволоки.

Полученные данные совпадают с существующими рекомендациями по термической обработке хромоникельмолибденовых сталей. Также и результаты механических испытаний прутков, несмотря на наличие

Таблица 4

Механические свойства проволок диаметром 1 мм

Table 4. Mechanical properties of wires with diameter of 1 mm

Состав	Относительное удлинение, %	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
1 (03X17H10M2)	$2,1 \pm 0,3$	1018 ± 8	1356 ± 8
2 (03X17H10M2 + 0,2 % Ag)	$1,5 \pm 0,3$	1207 ± 9	1648 ± 10
3 (03X17H10M2 + 0,5 % Ag)	$1,2 \pm 0,2$	1280 ± 9	1636 ± 10

**Механические свойства проволоки состава 1 диаметром 1 мм
в зависимости от термической обработки (охлаждение на воздухе или в воде)**

Table 5. Mechanical properties of the wire with composition 1 and diameter, depending on heat treatment (cooling in air or water)

Термическая обработка	Относительное удлинение, %	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
900 °C, 2 мин, воздух	51,5 ± 1,3	399 ± 5	802 ± 7
950 °C, 2 мин, воздух	52,1 ± 1,4	371 ± 4	765 ± 7
1000 °C, 2 мин, воздух	55,7 ± 1,5	325 ± 3	738 ± 6
1050 °C, 2 мин, воздух	61,4 ± 1,8	311 ± 3	707 ± 6
900 °C, 2 мин, вода	52,3 ± 1,4	386 ± 5	792 ± 7
950 °C, 2 мин, вода	54,6 ± 1,5	344 ± 4	766 ± 7
1000 °C, 2 мин, вода	58,0 ± 1,8	320 ± 3	739 ± 6
1050 °C, 2 мин, вода	66,7 ± 1,9	319 ± 3	713 ± 6

серебра в составе сталей, не показывают аномальных результатов. При этом стоит отметить, что феррито-образующее влияние серебра, обнаруженное в ходе рентгеновского фазового анализа, совпадает с результатами работы [20], где добавление 0,2 % Ag в сталь 2205 DSS приводило к росту содержания ферритной фазы на 1,1 %. Однако для стали 03X17N10M2 эффект оказался в два с лишним раза больше (2,3 %). Это, скорее всего, связано с тем, что количество ферритной фазы в стали 2205 DSS изначально было в несколько раз больше, чем у стали 03X17N10M2.

Выводы

Исследование механических свойств проволоки различных диаметров из аустенитной нержавеющей стали 03X17N10M2 без и с добавлением серебра в количестве 0,2 и 0,5 % показало, что легирование серебром приводит к небольшому уменьшению пластичности и росту прочности. Повышение содержания серебра вызывает изменение фазового состава: уменьшение количества γ -фазы и увеличение α -фазы и σ -фазы. Добавление лишь 0,5 % Ag ведет к уменьшению доли аустенита на 11,1 %.

После термических обработок, вне зависимости от химического состава и диаметра проволоки, происходит рекристаллизация, вызывающая образование мелкозернистой структуры (размеры зерен 3 – 6 мкм).

При этом закалка на воздухе и закалка в воде полученной проволоки диаметра 1 мм привели к одинаковому результату, что говорит о том, что закалку изделий из сталей подобного состава можно проводить на воздухе при диаметре до 1 мм. Однако уже при диаметре более 2 мм тип термической обработки дает существенную разницу механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Chen Q., Thouas G.A. Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015;87:1–57. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001>
- Колмаков А.Г., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Коррозионностойкие стали в аддитивном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(9):619–650. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>
Kolmakov A.G., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Kirsan-kin A.A., Sevost'yanov M.A. Corrosion-resistant steels in additive manufacturing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(9):619–650. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>
- Каплан М.А., Иванников А.Ю., Конушкин С.В., и др. Исследование структуры, механических и антибактериальных свойств коррозионностойкой стали, легированной серебром и титаном. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2022;502(2):41–49. <https://doi.org/10.31857/S268695352201006X>
Kaplan M.A., Ivannikov A.Yu., Konushkin S.V., etc. Investigation of the structure, mechanical and antibacterial properties of corrosion-resistant steel alloyed with silver and titanium. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Sciences*. 2022;502(2):41–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S268695352201006X>
- ГОСТ Р 51148-98. Изделия медицинские. Требования к образцам и документации, представляемым на токсикологические, санитарно-химические испытания, испытания на стерильность и пирогенность. Москва: Издательство стандартов; 05.05.1998:17.
- ГОСТ 30208-94. Инструменты хирургические. Металлические материалы. Часть 1: Нержавеющая сталь. Москва: Издательство стандартов; 01.10.2002:7.
- Zardiackas L.D. Stainless steels for implants. *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*. 2006:1–9. <https://doi.org/10.1002/9780471740360.ebs1136>

7. Dick J.C., Bourgeault C.A. Notch sensitivity of titanium alloy, commercially pure titanium, and stainless steel spinal implants. *Spine*. 2001;26(15):1668–1672. <https://doi.org/10.1097/00007632-200108010-00008>
8. Khosravi F., Nouri Khorasani S., Khalili S., etc. Development of a highly proliferated bilayer coating on 316L stainless steel implants. *Polymers*. 2020;12(5):1022. <https://doi.org/10.3390/polym12051022>
9. Rogers B.A., Little N.J. Surgical site infection with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* after primary total hip replacement. *The Bone & Joint Journal*. 2008;90-B(11):1537–1538. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.90B11.21242>
10. Arciola C.R., Campoccia D., Montanaro L. Implant infections: adhesion, biofilm formation and immune evasion. *Nature Reviews Microbiology*. 2018;16(7):397–409. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0019-y>
11. Filipović U., Dahmane R.G., Ghannouchi S., Zore A., Bohinc K. Bacterial adhesion on orthopedic implants. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020;283:102228. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102228>
12. Arciola C.R., An Y.H., Campoccia D., Donati M.E., Montanaro L. Etiology of implant orthopedic infections: A survey on 1027 clinical isolates. *The International Journal of Artificial Organs*. 2005;28(11):1091–1100. <https://doi.org/10.1177/039139880502801106>
13. Rai M.K., Deshmukh S.D., Ingle A.P., Gade A.K. Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multi-drug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*. 2012;112(5):841–852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x>
14. Morones J.R., Elechiguerra J.L., Camacho A., Holt K., Kouri J.B., Ramírez J.T., Yacaman M.J. The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*. 2005;16(10):2346. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/059>
15. Baker C., Pradhan A., Pakstis L., Pochan D.J., Shah S.I. Synthesis and antibacterial properties of silver nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2005;5(2):244–249. <https://doi.org/10.1166/JNN.2005.034>
16. Yamanaka M., Hara K., Kudo J. Bactericidal actions of a silver ion solution on *Escherichia coli*, studied by energy-filtering transmission electron microscopy and proteomic analysis. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005;71(11):7589–7593. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7589-7593.2005>
17. Mirzaee M., Vaezi M., Palizdar Y. Synthesis and characterization of silver doped hydroxyapatite nanocomposite coatings and evaluation of their antibacterial and corrosion resistance properties in simulated body fluid. *Materials Science and Engineering: C*. 2016;69:675–684. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.057>
18. Gobi S.K., Sudhakar T., Karthik A.I., etc. Silver-calcia stabilized zirconia nanocomposite coated medical grade stainless steel as potential bioimplants. *Surfaces and Interfaces*. 2021;24:101086. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.101086>
19. Kaplan M.A., Gorbenko A.D., Ivannikov A.Y., etc. Investigation of antibacterial properties of corrosion-resistant 316L steel alloyed with 0.2 wt.% and 0.5 wt.% Ag. *Materials*. 2023;16(1):319. <https://doi.org/10.3390/ma16010319>
20. Yang S.M., Chen Y.C., Pan Y.T., Lin D.Y. Effect of silver on microstructure and antibacterial property of 2205 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: C*. 2016;63:376–383. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.03.014>
21. Gong P., Li H., He X., Wang K., Hu J., Tan W., Zhang S., Yang X. Preparation and antibacterial activity of Fe₃O₄@Ag nanoparticles. *Nanotechnology*. 2007;18(28):285604. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/28/285604>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Артём Дмитриевич Горбенко, инженер-исследователь, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; инженер-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
E-mail: artemgorbenk@yandex.ru

Михаил Александрович Каплан, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-8635-0719
E-mail: mkaplan@imet.ac.ru

Сергей Викторович Конушкин, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-9574-1957
E-mail: venev55@mail.ru

Елена Олеговна Насакина, старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-0783-1558
E-mail: nacakina@mail.ru

Александр Сергеевич Баикин, научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
E-mail: baikinas@mail.ru

Константин Владимирович Сергиенко, младший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
E-mail: shulf@yandex.ru

Artem D. Gorbenko, Research Engineer, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Research Engineer, All-Russian Research Institute of Phytopathology
E-mail: artemgorbenk@yandex.ru

Mikhail A. Kaplan, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-8635-0719
E-mail: mkaplan@imet.ac.ru

Sergei V. Konushkin, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-9574-1957
E-mail: venev55@mail.ru

Elena O. Nasakina, Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-0783-1558
E-mail: nacakina@mail.ru

Aleksandr S. Baikin, Research Associate, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
E-mail: baikinas@mail.ru

Konstantin V. Sergienko, Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
E-mail: shulf@yandex.ru

Александр Юрьевич Иванников, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0003-1113-391X
E-mail: aivannikov@imet.ac.ru

Ярослава Анатольевна Морозова, инженер-исследователь, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; инженер-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
E-mail: yasya12987@gmail.com

Сергей Александрович Ошкуков, к.мед.н., старший научный сотрудник, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М. Ф. Владимирского
E-mail: sergey0687@mail.ru

Алексей Георгиевич Колмаков, член-корреспондент РАН, д.т.н., заведующий лабораторией, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0002-4907-951X
E-mail: akolmakov@imet.ac.ru

Михаил Анатольевич Севостьянов, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; руководитель центра, Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ORCID: 0000-0003-2652-8711
E-mail: msevostyanov@imet.ac.ru

Aleksandr Yu. Ivannikov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-1113-391X
E-mail: aivannikov@imet.ac.ru

Yaroslava A. Morozova, Research Engineer, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Research Engineer, All-Russian Research Institute of Phytopathology
E-mail: yasya12987@gmail.com

Sergei A. Oshukov, Cand. Sci. (Medical), Senior Researcher, M. F. Vladimirskii Moscow Regional Research Clinical Institute
E-mail: sergey0687@mail.ru

Aleksei G. Kolmakov, Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4907-951X
E-mail: akolmakov@imet.ac.ru

Mikhail A. Sevost'yanov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Head of the Center, All-Russian Research Institute of Phytopathology
ORCID: 0000-0003-2652-8711
E-mail: msevostyanov@imet.ac.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. Д. Горбенко – подготовка текста статьи, обработка результатов.
М. А. Каплан – проведение исследований.
С. В. Конушкин – отработка режимов, получение проволоки.
Е. О. Насакина – консультация в исследованиях и написании работы.
А. С. Баикин – проведение фазового анализа.
К. В. Сергиенко – обработка результатов испытаний.
А. Ю. Иванников – проведение термической обработки.
Я. А. Морозова – исследование структуры проволоки.
С. А. Ошкуков – исследование механических свойств проволоки.
А. Г. Колмаков – доработка текста, корректировка выводов.
М. А. Севостьянов – научное руководство, редакция статьи.

A. D. Gorbenko – writing of the text, processing of the results.
M. A. Kaplan – conducting the research.
S. V. Konushkin – modes testing, obtaining the wire.
E. O. Nasakina – consultation in research and writing the article.
A. S. Baikin – conducting phase analysis.
K. V. Sergienko – processing of test results.
A. Yu. Ivannikov – conducting heat treatment.
Ya. A. Morozova – study of the wire structure.
S. A. Oshukov – study of the wire mechanical properties.
A. G. Kolmakov – finalization of the text, correction of conclusions.
M. A. Sevostyanov – scientific guidance, article editing.

Поступила в редакцию 07.04.2023
 После доработки 05.05.2023
 Принята к публикации 28.08.2023

Received 07.04.2023
 Revised 05.05.2023
 Accepted 28.08.2023