



УДК 621.778

Д.П. Канаев, А.Ю. Столяров, М.В. Зайцева
ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный
завод «ММК-МЕТИЗ»

г. Магнитогорск, Россия

E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

А.Г. Корчунов, Д.В. Константинов
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

г. Магнитогорск, Россия

E-mail: international@magtu.ru

Дата поступления 17.05.2022

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ ПРИ МЕХАНОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация

Исследована динамика изменения механических свойств высокопрочных арматурных канатов конструкции 1x7(1+6) по ГОСТ Р 53772-2010 в процессе механотермической обработки. Для канатов диаметром 12,5 мм изучен характер изменения значений временного сопротивления разрыву, условного предела текучести, полного относительного удлинения при максимальной нагрузке и модуля упругости в области температур нагрева от 360 до 400 °С, скорости обработки от 50 до 65 м/мин при усилии натяжения 64 кН. Показано влияние температуры и скорости механотермической обработки на механические свойства арматурных канатов.

Ключевые слова: арматурные канаты, механотермическая обработка, механические свойства, экспериментальные исследования.

Введение

Арматурные канаты являются высокотехнологичной продукцией метизной отрасли, которая используется в системах пред- и постнапряжения железобетонных конструкций ответственного назначения, при строительстве мостов, атомных электростанций, аэропортов, тоннелей, транспортной инфраструктуры, жилых домов, объектов тепло-, энерго- и водоснабжения, водоотведения.

Значительный интерес представляет сегмент стальных стабилизированных арматурных канатов, выпускаемых во многих промышленно развитых странах и применяемых практически по всему миру. Большая часть этих канатов используется для производства предварительно напряженных железобетонных изделий и конструкций, что позволяет многократно уменьшить количество закладываемого в бетон ме-

талла, и снизить тем самым стоимость железобетонных конструкций при одновременном повышении их качества [1].

Наибольшее распространение по объемам производства и применению получили спиральные стабилизированные арматурные канаты конструкции 1x7(1+6), одинарной свивки с линейным касанием проволок в прядях, имеющие одну центральную и шесть повивочных проволок. Канаты данной конструкции зарекомендовали себя как наиболее эффективный вид высокопрочной преднапряженной арматуры по совокупности служебных характеристик, технологических факторов производства и применения.

В Российской Федерации стабилизированные арматурные канаты производятся в соответствии ГОСТ Р 53772-2010, за рубежом требования к стабилизированным арматурным канатам регламентированы европейским стандартом pr EN 10138-3:2006. Одним из ведущих предприятий страны,

освоившим и успешно выпускающим данный вид продукции является ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ».

В отечественной и зарубежной литературе уделяется много внимания особенностям производства арматурных канатов для предварительно напряженных конструкций [2-7]. Продолжаются исследования по разработке технологических приемов для повышения механических свойств арматурных канатов, необходимых в особых условиях эксплуатации. Так, получен арматурный канат с прочностью более 2100 МПа [8], что позволяет использовать его в предварительно напряженных железобетонных конструкциях в сейсмических условиях.

В технологиях производства высокопрочных арматурных канатов широко применяют холодное волочение патентованной стали с высокими степенями деформации с последующей свивкой и механотермической обработкой (МТО). В результате такой обработки сталь имеет феррито-цементитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,1 - 0,2 мкм, а толщина цементитных пластин составляет значение 200 - 400 Å. Такие размеры структурных составляющих стали обеспечивают высокие значения прочностных и пластических свойств канатов [9].

Для устранения неблагоприятных свивочных напряжений, обеспечения высоких значений усталостной и релаксационной стойкости арматурные канаты дополнительно подвергают МТО. Наиболее прогрессивный вариант МТО на современных линиях стабилизации предусматривает кратковременный отпуск канатов с использованием тепла индукционного нагрева при температуре 250-420°C с одновременным приложением растягивающего усилия. При этом напряжения растяжения при обработке достигают значений 30-70% от значения временного сопротивления разрыву каната [9].

Физическая сущность процесса МТО заключается в небольшом пластическом деформировании упрочненного металла при температуре ниже температуры рекристаллизации. Одновременное применение

механического нагружения с отпуском обеспечивает получение высоких упругих и реологических свойств в сочетании с высокими пластическими характеристиками металла. Релаксационная стойкость резко повышается и очень мало изменяется с течением времени [10]. Автор работы [11] считает, что в основе МТО лежат процессы, связанные с образованием заданной дислокационной структуры. Другая точка зрения заключается в том, что повышение релаксационных свойств при МТО зависит в основном от протекания процессов деформационного старения [12]. Авторы работ [13-16] связывают изменение механических свойств высокопрочных арматурных изделий с перераспределением напряженного состояния стали в процессе обработки.

Несмотря на то, что процесс стабилизации в потоке со свивкой стал основным и практически единственным способом механотермической обработки арматурных канатов, многие вопросы, связанные с изменением механических свойств при данном виде технологического воздействия, остаются малоизученными. Также нет единого мнения относительно характера влияния режимов МТО на механические свойства арматурных канатов после операции свивки.

Целью данного исследования является экспериментальное исследование влияния режимов МТО на механические свойства арматурных канатов.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводили в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ с использованием арматурных канатов диаметром 12,5 мм, конструкции 1x7(1+6) из высокоуглеродистой стали марки 80 (таблица 1).

Технологическая схема экспериментального производства включала: патентирование катанки диаметром 11,0 мм, подготовку ее поверхности к волочению, волочение центральной и повивочной проволок со степенью деформации до 86 %, свивку в канатовьюющей машине, МТО на линии стабилизации, охлаждение, намотку и контроль качества каната.

Линия стабилизации была оснащена тремя последовательно расположенными индукционными нагревателями длиной 1,0 м каждый. Для проведения исследований по влиянию режимов МТО на механические свойства канатов варьировали скорость линии стабилизации и температуру нагрева. При этом усилие натяжения на линии стабилизации составляло значение 64 кН и не изменялось в ходе эксперимента. Температуру индукционного нагрева каната изменяли в диапазоне 360-400°С, скорость процесса варьировали в диапазоне 50-65 м/мин. В соответствии с задачами эксперимента на оборудовании была реализована обработка свитого каната на холостом ходу с отключенными индукционными нагревателями при минимальном натяжении.

Значения варьируемых параметров процесса МТО выбирали с учетом технических характеристик линии стабилизации, предназначенной для реализации исследуемого процесса, а также необходимости сохранения экономической эффективности

производства. Экспериментальные режимы МТО представлены в таблице 2.

Исследование механических свойств экспериментальных образцов арматурных канатов проводили по ГОСТ Р 53772-2010 «Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. Технические условия» на электро-механической испытательной машине LFM-400 Walter+Bai AG. Для каждого из исследуемых режимов МТО отбирали 4 образца каната длиной 1 м. Испытание на растяжение проводили на образцах каната в агрегатном состоянии. Исследования динамической микротвердости экспериментальных образцов арматурных канатов выполнялись с использованием ультрамикротестера SHIMADZU DUH-211S в соответствии с ГОСТ Р 8.748 (ИСО 14577-1:2002) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства катанки

Содержание элементов, %						Механические свойства		
C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение после разрыва δ , %
0,80	0,48	0,28	0,05	0,02	0,11	1050	27	11

Таблица 2

Экспериментальные режимы механотермической обработки

Маркировка режимов МТО	Скорость линии, м/мин	Температура, °С	Усилие натяжения, кН
50/360	50	360	64
50/380	50	380	
50/400	50	400	
65/360	65	360	
65/380	65	380	
65/400	65	400	
XX (Холостой ход)	Без индукционного нагрева, с минимальным натяжением.		

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты агрегатных испытаний арматурных канатов при различных режимах МТО представлены в таблице 3. Графическая интерпретация результатов испытаний представлена на рисунке 1.

В табл. 4 приведены средние значения параметров стали, полученных при инструментальном индентировании поперечного сечения образцов повивочных проволок канатов при различных режимах МТО.

Анализ динамики изменения механических свойств арматурных канатов, полученных при различных режимах МТО относительно каната, обработанного на холстом ходу, показал, что для всех исследованных режимов наблюдается повышение в различной степени всех оцениваемых механических характеристик (рис.1). Абсолют-

ный прирост значений временного сопротивления разрыву σ_B составляет от 100 до 120 МПа или 5-7 % (рисунок 1,а). Наибольшую чувствительность к технологическому воздействию в результате МТО продемонстрировали показатели условного предела текучести $\sigma_{0,1}$ и полного относительного удлинения при максимальной нагрузке δ_{max} . Прирост условного предела текучести $\sigma_{0,1}$ составил значение от 28 до 36%. Наибольший абсолютный прирост 427 МПа был зафиксирован при температуре нагрева 380°C и скорости обработки 50 м/мин (рисунок 1,б). Показатель полного относительного удлинения при максимальной нагрузке δ_{max} продемонстрировал более чем двукратное увеличение при всех режимах МТО (рисунок 1,в). Значение модуля упругости E показало прирост на уровне 4-6%. Характерное соотношение $\sigma_{0,1} / \sigma_B$ увеличилось в диапазоне от 21 до 27%.

Таблица 3

Механические свойства арматурного каната диаметром 12,5 мм при различных режимах МТО

Механические свойства каната	Режимы МТО (скорость/температура, м/мин/°C)						
	XX	50/360	50/380	50/400	65/360	65/380	65/400
Максимальная нагрузка при разрыве, кН	158,25	167,67	169,41	166,15	168,55	167,4	166,72
Нагрузка при условном пределе текучести 0,1%, кН	108,9	145,7	148,6	139,9	147,7	145,3	143,4
Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	1702	1803	1822	1787	1813	1800	1793
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, МПа	1170	1566	1597	1504	1587	1562	1542
Отношение $\sigma_{0,1} / \sigma_B$	0,69	0,87	0,88	0,84	0,88	0,87	0,86
Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %	1,94	4,26	4,32	4,62	4,01	4,10	4,18
Модуль упругости E , ГПа	187	198	196	198	196	195	196

Таблица 4

Средние значения параметров стали, полученные при испытании на динамическую микротвердость

Режим МТО (скорость / температура, м/мин / °C)	Твердость по шкале Мартенса, НМТ115	Твердость по шкале Мартенса, НМs	Твердость индентирования, НГТ	Ползучесть при индентировании СИТ, %	Упругая составляющая работы при индентировании η_{IT} , %
XX	1970	1172	4309	2,2	46
50/360	2449	2191	3747	2,8	33
50/380	2797	2287	4456	2,5	34
50/400	2216	1859	3685	2,0	40
65/360	3208	2637	4922	2,9	30
65/380	2242	1697	3797	3,8	38
65/400	1965	1520	3266	4,7	36

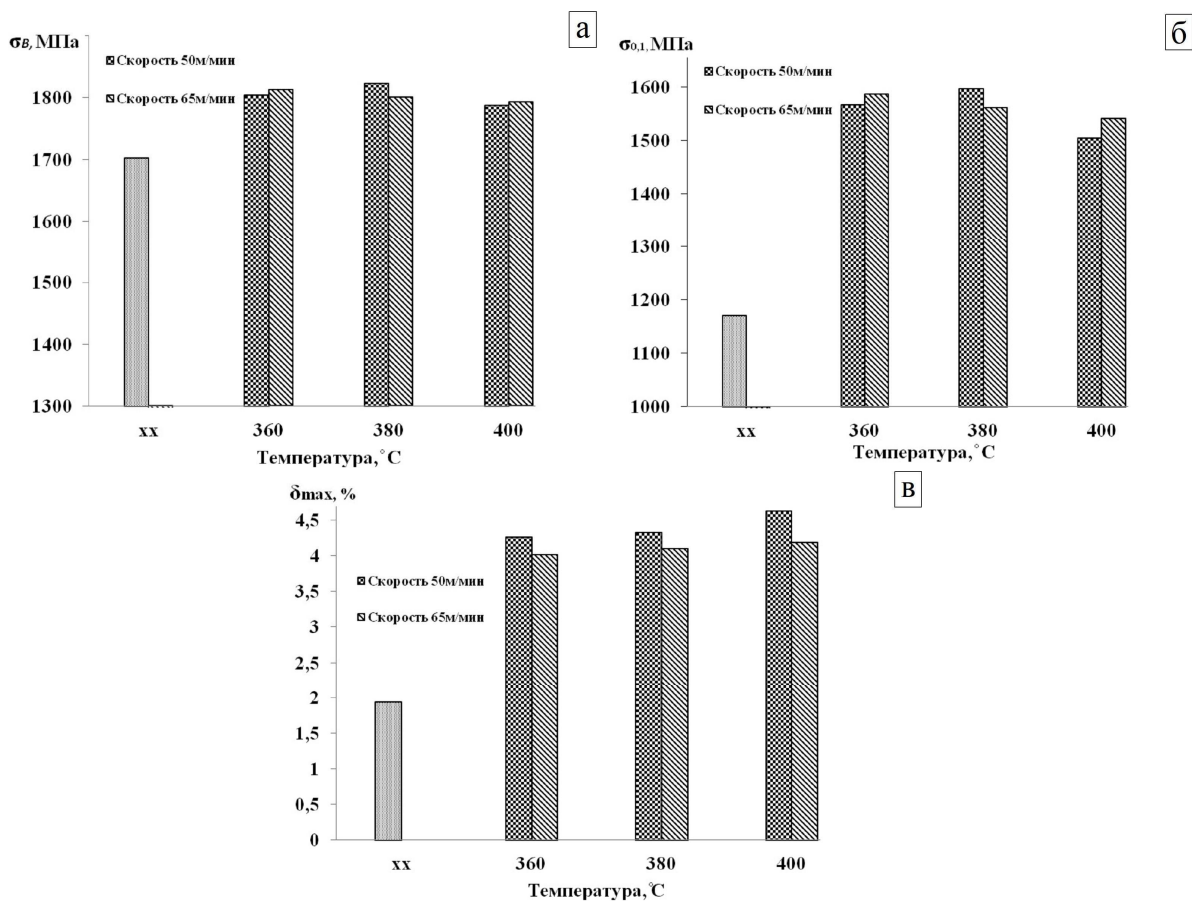


Рисунок 1. Характер изменения механических свойств арматурного каната при различных режимах МТО

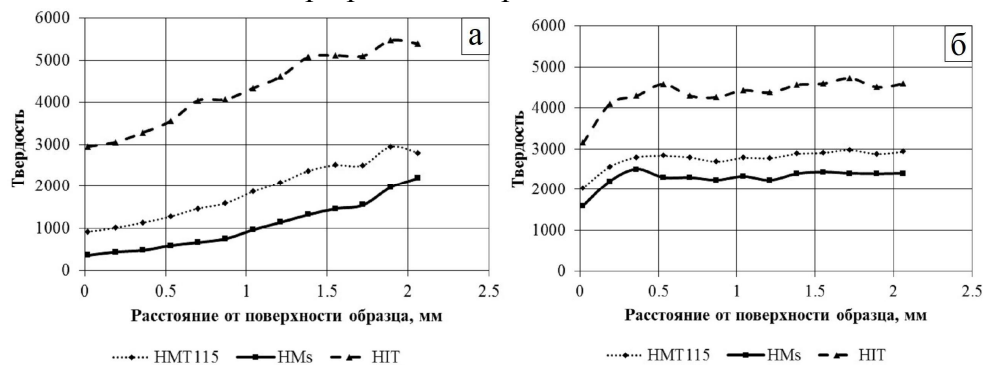


Рисунок 2. Распределение твердости по сечению образцов повивочных проволок каната а – холостой ход, б – режим 50/380

Наблюдаемый благоприятный характер изменения механических свойств каната при МТО, по-видимому, связан с существенным перераспределением остаточных свивочных напряжений при обработке и повышением однородности свойств стали. На рисунке 2 представлены результаты измерений твердости по сечению проволок повива, отобранных от каната, полученного на холостом ходу линии стабилизации и после режима МТО при температуре 380⁰С и скорости обработки 50 м/мин.

Видно, что в результате механотермической обработки распределение твердости по сечению проволоки повива становится значительно более равномерным.

В результате выполненных экспериментов установлено, что наиболее выраженную роль в характере изменения механических свойств каната играла температура обработки. Роль скорости МТО становилась заметной при увеличении температуры. Значимые изменения механических свойств канатов были зафиксированы при

достижении температуры 400⁰С, что может быть объяснено начальными стадиями коагуляции осколков цементитных пластин в микроструктуре стали с увеличением температуры МТО.

Так с увеличением температуры с 360 до 400⁰С показатель полного относительного удлинения при максимальной нагрузке δ_{max} имел тенденцию к незначительному росту (см. рис.1,в). При этом показатели временного сопротивления разрыву и условного предела текучести $\sigma_{0,1}$ также показали незначительное снижение. В диапазоне температур 360-380⁰С изменение скорости обработки с 50 до 65 м/мин слабо отражалось на механических свойствах канатов.

У образцов канатов, обработанных со скоростью 50 м/мин, максимальные значения параметров микротвердости повивочных проволок каната (НМТ115, HMS, НІТ) достигались при нагреве до температуры 360 °С, минимальные значения – при нагреве до температуры 400 °С. При увеличении скорости до 65 м/мин и повышении температуры нагрева от 360 до 400 °С в повивочных проволоках каната максимальные значения параметров микротвердости НМТ115, HMS, НІТ незначительно снижаются. При этом значения показателей НМТ115, HMS, НІТ выше соответствующих значений образца, полученного на холостом ходу (см. табл.4).

Отдельного внимания заслуживают результаты влияния скорости обработки на параметр ползучести СІТ, % (см. табл. 4). Их анализ свидетельствует, что для скорости МТО 50 м/мин при повышении температуры нагрева значения параметра ползучести СІТ, % меняется не значительно, однако при скорости 65 м/мин с ростом температуры нагрева значения показателя ползучести увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с образцом, полученным на холостом ходу.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования влияния режимов МТО на механические свойства высокопрочных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1х7(1+6). В ходе экспериментов

на линии стабилизации температура индукционного нагрева составляла значения от 360 до 400 °С, скорость обработки от 50 до 65 м/мин, усилие натяжения 64 кН. В диапазоне исследованных режимов МТО зафиксировано изменение значений временного сопротивления разрыву σ_B , условного предела текучести $\sigma_{0,1}$, полного относительного удлинения при максимальной нагрузке δ_{max} и модуля упругости E относительно исходного состояния свитого каната. Определен количественный прирост механических свойств арматурных канатов в результате МТО. Наиболее значимый рост продемонстрировали показатели условного предела текучести $\sigma_{0,1}$ от 28 до 36% и полного относительного удлинения при максимальной нагрузке δ_{max} - более чем двукратное увеличение при всех режимах МТО. Более значительное влияние на изменение механических свойств арматурных канатов оказывает температура обработки. Роль скорости обработки становится более выраженной в области температур 400⁰С.

Наилучшее сочетание комплекса механических свойств арматурных канатов было достигнуто при температуре индукционного нагрева 380⁰С и скорости обработки на линии стабилизации 50 м/мин. При этом сочетании технологических факторов зафиксировано наиболее равномерное распределение параметров микротвердости в поперечном сечении повивочных проволок каната.

Библиографический список

1. Мадатян С.А. Современный уровень требований к напрягаемой арматуре. Бетон и железобетон. 2005. № 1. С. 8-10.
2. Егоров В.Д., Воронина В.С. Технология производства арматурных канатов в стабилизированном исполнении. Сталь. 1983. № 3. С. 65—66.
3. Costello G.A. Theory of wire rope. Second edition. New York: Springer, 1997. 123 p.
4. Feyrer K. Wire ropes: tension, endurance, reliability. Berlin-Heidelberg -New York: Springer, 2007. 322 p.

5. Probabilistic models for mechanical properties of prestressing strands / Luciano Jacinto, Manuel Pipa, Luhs Oliveira Santos // *Construction and Building Materials*. 2012, Vol. 36, pp. 84-89.
6. Yusuf Aytac Onur. Experimental and theoretical investigation of prestressing steel strand subjected to tensile load // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016, Vol. 118, pp. 91-100.
7. Prestressing of NSM steel strands to enhance the structural performance of prestressed concrete beams / M. Obaydullah, Mohd Zamin Jumaat, U. Johnson Alengaram, Kh. Mahfuz ud Darain, Md. Nazmul Huda, Md. Akter Hosen // *Construction and Building Materials*. 2016, Vol. 129, pp. 289-301.
8. Mechanical Properties of a New Prestressing Strand with Ultimate Strength of 2160 MPa / Jin Kook Kim, Jeong-Su Kim, and Seung Hee Kwon // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014, Vol. 18(2), pp. 607-615.
9. Особенности изменения механических свойств холоднодеформированной эвтектоидной стали при механотермической обработке / Корчунов А.Г., Терещенко Н.А., Ефимова Ю.Ю., Дабала М., Долгий Д.К. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. №1. С. 58-62.
10. Лебедев В.Н. Опыт освоения производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал нового поколения // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2010. № 2. С. 74-77.
11. Юхвец И.А. Производство высокопрочной проволоочной арматуры. М.: *Металлургия*, 1973. 264 с.
12. Бабич В.К., Гуль И.Е., Долженков И.И. Деформационное старение стали. М.: *Металлургия*, 1972. 320 с.
13. L. Caballero, J. M. Atienza, M. Elices. Thermo-mechanical treatment effects on stress relaxation and hydrogen embrittlement of cold-drawn eutectoid steels // *Met. Mater. Int.*, Vol. 17, No. 6, 2011, pp. 899-910
14. Ruiz-Hervias, V. Luzin, H. Prask, T. Gnaeupel-Herold, M. Elices Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods. *Materials Science and Engineering A*, 435-436, 2006, pp 725-735.
15. Zeren A., Zeren M. Stress relaxation properties of prestressed steel wires. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, no.141, pp.86-92.

Information about the paper in English

D.P. Kanaev, A.Yu. Stolyarov, M.V. Zaitseva
OJSC Magnitogorsk Metalware and Sizing Plant (MMK-METIZ)
Magnitogorsk, Russia

A.G. Korchunov, D.V. Konstantinov
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
E-mail: international@magtu.ru

Received 17.05.2022

CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES OF PRESTRESSING STRANDS UNDER
THERMO-MECHANICAL TREATMENT

Abstract

The paper examines how the mechanical properties of high-strength 7-wire (1x7(1+6)) prestressing strands as per GOST R 53772-2010 tend to change under thermo-mechanical treatment. The change dynamics of the following properties was monitored for 12.5 mm strands: tensile strength, yield strength, full elongation at maximum tension force and modulus of elasticity in the temperature range from 360 to 400 °C, the process speed range from 50 to 65 m/min, and at the tension force of 64 kN. The paper shows how the temperature and rate of thermo-mechanical treatment influence the mechanical properties of prestressing strands.

Keywords: prestressing strands, thermo-mechanical treatment, mechanical properties, experimental studies.
