

УДК 669.15:621.77.25:629.11

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В АГРЕГАТЕ ПАТЕНТИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ\*

**Чукин М.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологий обработки материалов (m.chukin@mail.ru)

**Копцева Н.В.**, д.т.н., профессор кафедры технологий металлургии и литейных процессов (kopseva1948@mail.ru)

**Ефимова Ю.Ю.**, к.т.н., доцент кафедры технологий обработки материалов (jefimova78@mail.ru)

**Чукин Д.М.**, младший научный сотрудник НИС (chukindmitry@gmail.com)

**Никитенко О.А.**, к.т.н., научный сотрудник кафедры технологий обработки материалов (olganikitenko@list.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** В настоящее время значительное распространение получают напряженные железобетонные конструкции различного назначения, в которых, как правило, создаются напряжения сжатия в бетоне и напряжения растяжения – в арматуре. При этом напрягаемая арматура лучше воспринимает нагрузки, которые оказывают на нее внешние силы в течение всего срока службы сооружения, что позволяет увеличить нагрузку на конструкцию по сравнению с конструкцией с ненапрягаемой арматурой или при прежней величине нагрузки уменьшить размеры конструкции и достичь экономии бетона и стали. Одной из актуальных задач современного метизного производства принято считать разработку технологии изготовления наноструктурированных арматурных канатов, которые являются основным элементом напряженных железобетонных конструкций ответственного назначения. Важнейшей операцией этой технологии является патентирование, в результате которого сталь приобретает структуру высокодисперсной феррито-карбидной смеси (ФКС), обладающую высокой прочностью и в то же время способностью к деформационному воздействию с большими степенями обжатия. В работе исследовано влияние увеличения скорости движения заготовки в агрегате патентирования на формирование структуры и механических свойств сталей марок 80, 70 и 50 с целью определения возможности повышения производительности патентировочного агрегата без снижения прочностных и пластических характеристик стали при производстве заготовки для наноструктурированных арматурных канатов для железобетонных напряженных строительных конструкций ответственного назначения. Для определения температурно-временных параметров термической обработки с использованием исследовательского комплекса Gleeble 3500 построены диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита сталей указанных марок. Проведен качественный и количественный анализ микроструктуры с определением межпластинного расстояния ФКС при разных скоростях движения заготовки в агрегате патентирования. Выполнены испытания механических свойств при растяжении. Установлено, что при всех скоростях обработки обеспечиваются практически одинаковые и оптимальные для последующего волочения значения межпластинного расстояния ФКС в пределах 0,1 – 0,2 мкм. Благодаря формированию при патентировании дисперсной структуры ФКС достигается повышение прочности заготовки, которая при последующем волочении может выдерживать большие обжатия без обрывов. Показано, что при производстве патентированной заготовки для наноструктурированных арматурных канатов можно увеличить скорость движения в патентировочном агрегате до 5 м/мин, а, следовательно, и производительность без снижения прочностных и пластических характеристик заготовки.

**Ключевые слова:** высокоуглеродистая сталь, патентирование, скорость движения заготовки, диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита, межпластинное расстояние, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-306-312

Широко востребованным элементом напряженных железобетонных конструкций ответственного назначения являются арматурные канаты, используемые в системах пред- и постнапряжения при строительстве мостов, атомных электростанций, аэропортов,

\* Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (договоры № 02.G25.31.0178 от 01.12.2015 г.; № МК204895 от 27.07.2015 г.).

Исследования проводили в Центре коллективного пользования НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

тоннелей, жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения, мест массового пребывания людей, создании транспортной инфраструктуры и т.д. [1 – 4]. Мировая тенденция повышения требований к качеству, надежности и долговечности сооружений предопределяет необходимость промышленного производства конструкционных материалов нового поколения, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками. На сегодняшний день актуальной задачей является разработка технологии производства наноструктурированных арматурных ка-

натов для строительных конструкций ответственного назначения [5, 6].

Одним из важных этапов этой технологии является патентирование, которое заключается в нагреве металла до аустенитного состояния (до температур выше верхней критической точки) с последующим охлаждением в специальных средах с температурами 450–550 °С [7, 8]. В результате такой обработки в микроструктуре заготовок формируется тонкопластинчатая феррито-карбидная смесь (ФКС) с очень малым (0,1–0,2 мкм) межпластиночным расстоянием и толщиной цементитных пластинок 200–400 Å, которую принято называть сорбитом патентирования [9, 10]. Такие размеры структурных составляющих стали относятся к наноструктурным [11–13], что обеспечивает сочетание пластичности при одновременной высокой прочности, а также хорошую способность к деформации с большими степенями обжатия [9, 11, 14] и, в конечном итоге, – высокие прочностные свойства стали с сохранением повышенной вязкости при последующем волочении.

Наибольшее распространение на сегодняшний день получили технологии изготовления высокопрочной арматуры с использованием специализированных линий [15–17]. Для повышения производительности агрегата патентирования в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод» («ММК-МЕТИЗ») была поставлена задача увеличения скорости движения заготовки. При этом при изотермическом охлаждении стали от температуры аустенитизации в интервале температурных областей превращения переохлажденного аустенита необходимо предотвратить образование бейнитных структур, подавить или минимизировать выделение структурно свободного феррита, а также минимизировать градиент параметров микроструктуры стали, обеспечивая равномерность свойств по сечению и длине заготовок [18–21].

В соответствии с вышесказанным целью настоящей работы является определение возможности повышения производительности патентировочного агрегата без снижения прочностных и пластических характеристик стали при производстве заготовки для наноструктурированных арматурных канатов для строительных конструкций ответственного назначения.

В качестве материала исследования были выбраны углеродистые стали марок 80, 70 и 50, их химический состав приведен ниже:

Сталь	Содержание, %, элементов				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
80	0,81	0,31	0,55	0,02	0,02
70	0,73	0,27	0,46	0,03	0,02
50	0,51	0,20	0,47	0,02	0,02

Для построения диаграмм изотермического распада переохлажденного аустенита сталей указанного со-

става с использованием исследовательского комплекса Gleeble 3500 были проведены эксперименты по нагреву и изотермической выдержке сталей. Нагрев образцов диам. 10 мм осуществляли в вакууме со скоростью 50 °С/с прямым пропусканием тока и проводили до температуры 970 °С.

Выбранные температура и скорость нагрева согласованы с температурно-временным режимом реального производственного процесса патентирования в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» и для стали исследуемой марки обеспечивали получение гомогенного аустенита. Охлаждение образцов из аустенитного состояния до температуры изотермической выдержки проводили со скоростью 300 °С/с, что позволяло подавить диффузионный распад аустенита и переохладить аустенит до температуры изотермической выдержки.

Эксперименты проводили на модуле Pocket Jaw комплекса Gleeble 3500 [22], который характеризуется возможностью регулирования температуры, скорости, времени нагрева и изотермической выдержки образцов, а также управления скоростью охлаждения. К модулю подключена система дилатометрических испытаний, что позволяло в автоматическом режиме получить дилатометрические кривые, построенные в координатах изменение линейного размера образца – время, по которым определяли время начала и конца превращений аустенита при изотермической выдержке.

В производственных условиях горячекатаную заготовку диам. 12 мм из сталей марок 80, 70 и 50 указанных составов подвергали патентированию при скоростях ее движения в агрегате патентирования 3,3, 4,2 и 5,0 м/мин. Режим патентирования: температура аустенитизации – 970 °С, температура патентировочной свинцовой ванны – 550 °С.

Для микроанализа по стандартной методике были приготовлены микрошлифы с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptec» на автоматическом прессе Simplimet 1000 линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергали травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом. Определение качественных и количественных характеристик структуры проводили с помощью светового микроскопа Meiji Techno и сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [23].

Микротвердость определяли на твердомере Buchler Mikromet методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° в соответствии с ГОСТ 9450–60 при нагрузке 2 Н и длительности нагружения 10 с. Замеры микротвердости проводили по сечению микрошлифа в двух перпендикулярных направлениях от поверхности к центру образца с шагом от 0,2 до 1,0 мм. Механические свойства заготовки в горячекатаном состоянии и после па-

тентирования с различными скоростями обработки определяли методом испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 10446 – 80. Испытания проводили на универсальной электромеханической испытательной двухколонной машине SHIMADZU AG-50kNCD.

На рис. 1 приведены построенные диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита сталей марок 80, 70 и 50 указанных составов.

Анализ результатов металлографического исследования показал, что изотермическая выдержка сталей всех трех марок при температуре 550 °С обеспечивает распад переохлажденного аустенита в области его минимальной устойчивости (вблизи изгиба С-образной кривой). Таким образом, режим, реализуемый в агрегате патентирования в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ»,

обеспечивает протекание диффузионного распада аустенита вблизи нижней границы температурного интервала перлитного превращения и позволяет предотвратить образование бейнитных структур.

Время распада переохлажденного аустенита при температуре 550 °С в сталях марок 50, 70 и 80 составляет около 6, 8 и 22 с соответственно, что позволило, исходя из длины патентировочной ванны, выбрать для исследования скорости движения заготовки в агрегате 3,3, 4,2 и 5,0 м/мин.

Микроструктура в центральной области горячекатаной заготовки из стали марки 80 состоит из ФКС с межпластиночным расстоянием  $l_0$  от 0,14 до 0,70 мкм (среднее 0,262 мкм) (рис. 2, а). По среднему значению межпластиночного расстояния такую структуру в соот-

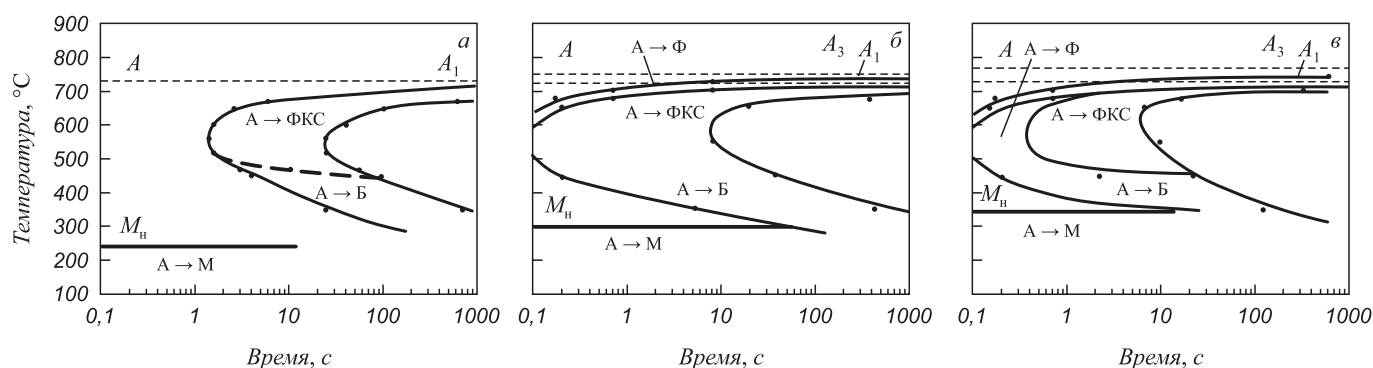


Рис. 1. Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита сталей марок 80 (а), 70 (б) и 50 (в)

Fig. 1. Diagrams of undercooled austenite isothermal decomposition of 80 (a), 70 (b) and 50 (v) steels

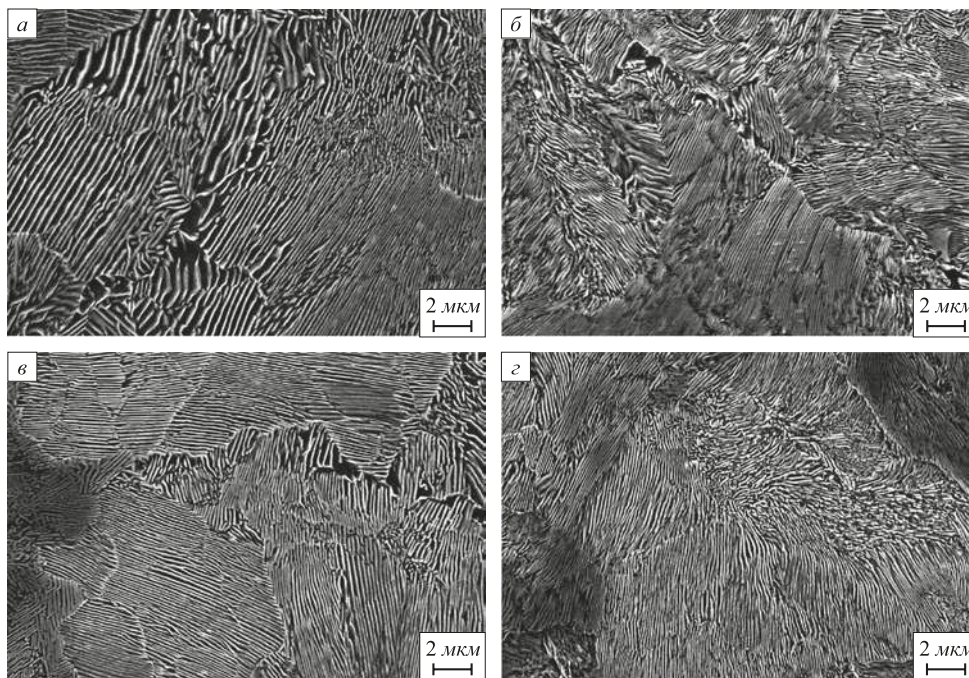


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения заготовки из стали 80 в горячекатаном состоянии (а) и после патентирования со скоростью обработки 3,3 м/мин (б), 4,2 м/мин (в), 5,0 м/мин (з)

Fig. 2. Microstructure of cross-section of the billet made of 80 steel in hot rolled state (a) and after patenting at different processing speeds of 3.3 m/min (b), 4.2 m/min (v), 5.0 m/min (z)



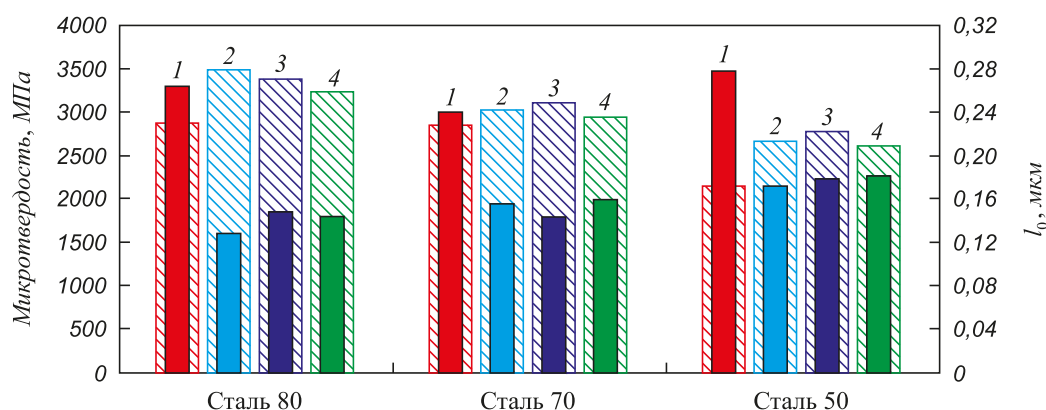


Рис. 3. Межпластиночное расстояние (без штриховки) и микротвердость (со штриховкой) сталей марок 80, 70 и 50 в горячекатаном состоянии (1) и после патентирования со скоростями обработки 3,3 м/мин (2), 4,2 м/мин (3), 5,0 м/мин (4)

Fig. 3. Interlamellar spacing (without hatchwork) and microhardness (with hatchwork) in hot rolled state (1) and after patenting of 80, 70 and 50 steels at processing speeds of 3.3 m/min (2), 4.2 m/min (3), 5.0 m/min (4)

ветствии с ГОСТ 8233 – 56 можно охарактеризовать как перлит скрытопластинчатый (балл № 2). В горячекатаных заготовках из стали марок 70 и 50 также наблюдается ФКС с межпластиночным расстоянием от 0,14 до 0,70 мкм, которую можно охарактеризовать как перлит от сорбитообразного (балл № 1) до мелкопластинчатого (балл № 5). Помимо ФКС в структуре присутствует избыточный феррит в количестве около 20 % в стали марки 50 и не более 2 % – в стали марки 70.

Патентирование во всех случаях приводит к уменьшению межпластиночного расстояния в ФКС (рис. 2, б – г), а также практически полностью устраняет избыточный феррит в стали марок 70 и 50. Результаты исследования показали, что по сравнению с горячекатаным состоянием межпластиночное расстояние при патентировании уменьшается примерно в 1,5 – 2,0 раза (рис. 3). При этом значения микротвердости в патентированной заготовке, обработанной при разных скоростях движения в агрегате, различаются весьма незначительно, и во всех случаях ФКС в соответствии с ГОСТ 8233 – 56 по среднему межпластиночному расстоянию может быть охарактеризована как перлит сорбитообразный (балл № 1).

Сопоставление микротвердости свидетельствует, что при разных скоростях патентирования микротвердость различается не более чем на 130 – 250 МПа, то есть не более, чем на 5 – 7 %. Это согласуется с данными по межплоскостному расстоянию, которое также различается примерно на 8 – 10 %.

Результаты определения механических свойств при испытании горячекатаных и патентированных заготовок на растяжение приведены на рис. 4. Прочностные характеристики при патентировании увеличиваются по сравнению с горячекатаным состоянием и практически одинаковы при разных скоростях обработки. Аналогичное заключение можно сделать и по пластическим характеристикам. Однако наблюдается определенная тенденция к некоторому возрастанию относительного

сужения ( $\psi$ ) при увеличении скорости патентирования: в стали марок 70 и 80 примерно на 22 – 25 %, в стали 50 – примерно на 7 %.

**Выводы.** Патентирование приводит к существенно уменьшению межпластиночного расстояния ФКС примерно в 1,5 – 2,0 раза и при всех скоростях обработки обеспечивает практически одинаковые и оптимальные для последующего волочения значения межпластинчатого расстояния ФКС в пределах 0,1 – 0,2 мкм. При всех исследуемых скоростях движения заготовки градиент параметров микроструктуры ФКС, формирующейся при распаде переохлажденного аустенита в процессе изотермической выдержки, минимален, что обеспечивает равномерность свойств по сечению и длине заготовок. Благодаря формированию при патентировании дисперсной структуры ФКС достигается повышение прочности заготовки, которая при последующем волочении может выдерживать большие обжатия без обрывов. При производстве патентированной заготовки для наноструктурированных арматурных канатов для железобетонных строительных конструкций ответственного назначения для повышения производительности патентировочного агрегата можно увеличить скорость движения заготовки до 5,0 м/мин без снижения ее прочностных и пластических характеристик.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов К.В., Волков Ю.С. Канатная арматура для сложных сооружений из предварительно напряженного бетона // Бетон и железобетон. 2009. № 2. С. 25 – 28.
2. Kim K.W., Won J.H., Jung S.D., Park J.W., Kim M.K. Full-Scaled Experiment for Behavior Investigation of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Wire Ropes as Lateral Spiral Reinforcement. – In book: IT Convergence and Security / Ed. Kuinam J. Kim, Kyung-Yong Chung. – New York, London: Springer, 2012. P. 1139 – 1146.
3. Vaghei R., Hejazi F., Taheri H., Jaafar M.S., Aziz F.N.A.A. Development of a new connection for precast concrete walls subjected to cyclic loading // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2017. Vol. 16. No. 1. P. 97 – 117.

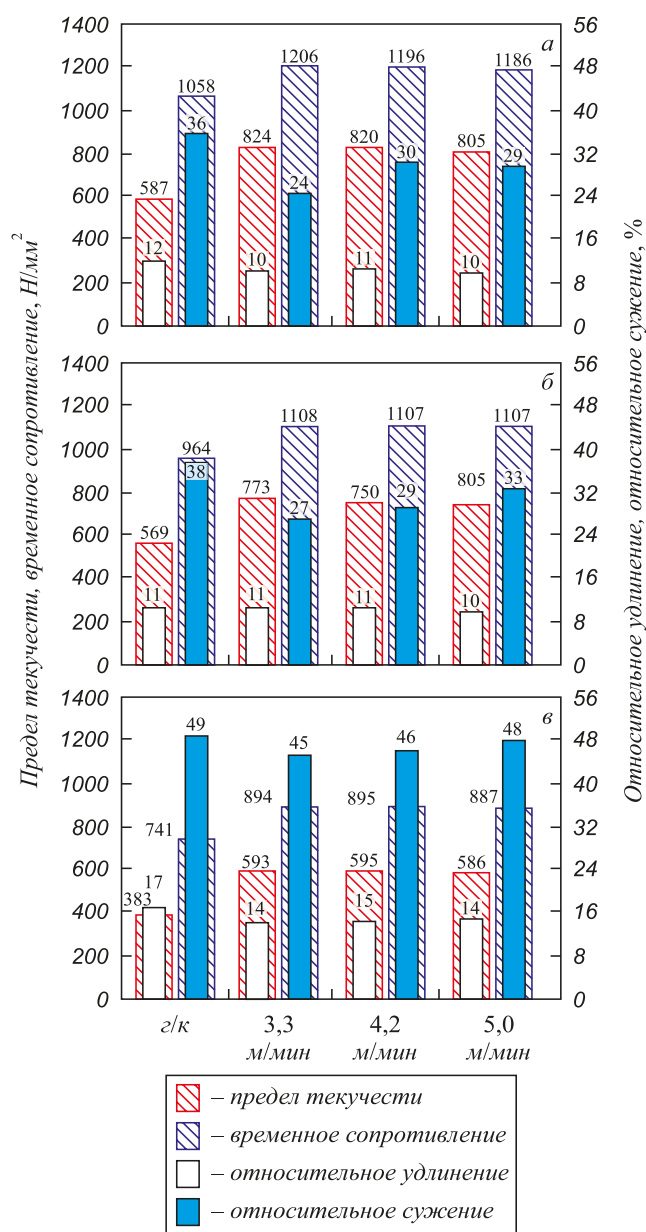


Рис. 4. Механические свойства (предел текучести, относительное удлинение, временное сопротивление и относительное сужение) при испытании на растяжение сталей марок 80 (а), 70 (б) и 50 (в) в горячекатаном состоянии (г/к) и после патентирования с разными скоростями обработки

Fig. 4. Mechanical properties (yield strength, percent elongation, tensile strength and relative narrowing) in the tensile test of the 80 (a) 70 (b) and 50 (c) steels in hot rolled state (g/k) and after patenting at different processing speeds

4. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Под общ. ред. М.В. Чукина. – М.: Металлургиздат, 2014. – 276 с.
5. Bargujer S.S., Suri N.M., Belokar R.M. Pearlitic steel wire: High carbon steel based natural nanomaterial by lead patenting process // Materials Today: Proceedings. 2016. Vol. 3. No. 6. P. 1553 – 1562.
6. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon

- steel by thermal and deformation process // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. No. 5 (45). P. 33 – 36.
7. Потемкин К.Д. Термическая обработка и волочение высокопрочной проволоки. – М.: Металлургиздат, 1963. – 120 с.
8. Wiewiórowska S., Muskalski Z. The assessment of the structure and properties of high-carbon steel wires after the process of patenting with induction heating // Archives of metallurgy and materials. 2015. Vol. 60. No. 2. P. 2015 – 2018.
9. Юхвев И.А. Производство высокопрочной арматуры. – М.: Металлургия, 1973. – 264 с.
10. Копцева Н.В., Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Трубицын Г.В., Литвинова Н.В. Особенности структурообразования высокоуглеродистых сталей при патентировании // Сталь. 2013. № 2. С. 42 – 45.
11. Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливцев, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, К.Ю. Окишев, Т.И. Табачникова, Ю.В. Хлебникова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 311 с.
12. Счастливцев В.М., Яковлева И.Л. Тонкопластинчатый перлит – первый объемный наноматериал в углеродистой стали // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 9. С. 1077 – 1080.
13. Zhang X., Godfrey A., Huang X., Hansen N., Liu Q. Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire // Acta Materialia. 2011. No. 59 (9). P. 3422 – 3430.
14. Taleff E.M., Lewandowski J.J., Pouladian B. Microstructure-Property Relationships in Pearlitic Eutectoid and Hypereutectoid Carbon Steels // Journal of Materials. 2002. Vol. 54 (7). P. 25 – 30.
15. Лебедев В.Н., Носков С.Е., Пудов Е.А., Литвинова Н.В., Гун Г.С., Чукин В.В. Агрегат для патентирования прутков, применяемых для армирования железобетонных шпал нового поколения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 5. С. 21 – 24.
16. Лебедев В.Н., Корчунов А.Г., Чукин М.В. Производство высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал нового поколения // Металлург. 2011. № 1. С. 75 – 78.
17. Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали // Черные металлы. 2012. № 12. С. 8 – 16.
18. Lambert-Perlade A., Gourgues A.F., Pineau A. Austenite to bainite phase transformation in the heat-affected zone of high strength low alloy steel // Acta Mater. 2004. No. 8 (52). P. 2337 – 2348.
19. Счастливцев В.М., Яковлева И.Л., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А. Закономерности структурообразования при термодинамических воздействиях в процессах производства высокопрочной арматуры // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 32 – 37.
20. Elwazri A.M., Wanjara P., Yue S. The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid // Materials Science and Engineering. 2005. A 404. P. 91 – 98.
21. Борисенко А.Ю., Луценко В.А., Луценко О.В., Куренкова Т.П., Серегина Е.С., Демидов А.В. Структура и свойства патентированной высокоуглеродистой проволоки // Черные металлы. 2012. № 10 (74). С. 31 – 36.
22. Чукин Д.М., Ишимов А.С., Жеребцов М.С., Мешкова А.И. Использование системы Gleeble 3500 для проведения комплекса дилатометрических исследований микролегированной стали 80Р // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2012. № 38. С. 148 – 155.
23. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54. No. 7-8. С. 387 – 392.

Поступила 15 апреля 2017 г.

## INFLUENCE OF HIGH-CARBON STEEL BILLET MOVEMENT SPEED IN PATENTENING UNIT ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES FORMATION

**M.V. Chukin, N.V. Koptseva, Yu.Yu. Efimova, D.M. Chukin,  
O.A. Nikitenko**

**Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Russia,  
Magnitogorsk**

**Abstract.** At present, intensive reinforced concrete constructions of various purposes have got considerable distribution, in which, as a rule, compressive stresses in concrete and stretching in the reinforcement are created. At the same time, the prestressed reinforcement better perceives the loads exerted on it by external forces during the whole lifetime of the construction, which allows increasing the load on the structure in comparison with the construction with non-tensioning reinforcement or at the same load value to reduce the dimensions of the construction and achieve savings in concrete and steel. One of the urgent problems of modern hardware production is considered to be development of the technology of nanostructured reinforcing ropes manufacturing, which are the main element of stressed reinforced concrete constructions for responsible use. The most important technological operation is patenting in which steel acquires the structure of a fine ferrite-carbide mixture (FCM), which has high strength and, at the same time, the deformation ability with large degrees of compression. The authors have investigated the effect of increasing speed of rod movement in the patenting unit on the structure and mechanical properties formation in steel of grades 80, 70 and 50 with the aim of determining the possibility to increase the productivity of the patenting unit without reducing the strength and plastic characteristics of steel in the production of nanostructured reinforcing ropes billets for reinforced concrete stressed constructions for responsible use. To determine temperature-time parameters of heat treatment, the isothermal diagram decomposition of the undercooled austenite was constructed using Gleeble 3500 research complex. A qualitative and quantitative analysis of the microstructure with the determination of the FCM interlamellar spacing was carried out at different speeds of the rod movement in the patenting unit. The mechanical properties under tension were tested. It was established that at all processing speeds, the values of the FCM interlamellar spacing in the range 0.1 – 0.2  $\mu\text{m}$  are practically identical and optimal for the subsequent drawing. Due to the formation in the patenting of the disperse structure of FCM, an increase in the strength of the billet is achieved, which, with subsequent drawing, can withstand large crimps without breakage. It is shown that in the production of patented nanostructured billets for reinforcing ropes, one can increase the speed in patenting unit to 5 m/min without reduction of strength and plastic characteristics of the billet.

**Keywords:** high carbon steel, patenting, rod movement speed, isothermal diagram decomposition of undercooled austenite, interlamellar spacing, mechanical properties.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-4-306-312

### REFERENCES

1. Mikhailov K.V., Volkov Yu.S. Rope reinforcement for complex structures made of prestressed concrete. *Beton i zhelezobeton*. 2009, no. 2, pp. 25–28. (In Russ.).
2. Kim K.W., Won J.H., Jung S.D., Park J.W., Kim M.K. Full-scaled experiment for behavior investigation of reinforced concrete columns with high-strength wire ropes as lateral spiral reinforcement. In: *IT Convergence and Security*. Kuinam J. Kim, Kyung-Yong Chung eds. New York, London: Springer, 2012, pp. 1139–1146.
3. Vaghei R., Hejazi F., Taheri H., Jaafar M.S., Aziz F.N.A.A. Development of a new connection for precast concrete walls subjected to cyclic loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2017, vol. 16, no. 1, pp. 97–117.
4. *Proizvodstvo vysokoprochnoi stal'noi armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya* [Manufacturing of high-strength steel reinforcement for reinforced concrete sleepers of a new generation]. Chukin M.V. ed. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 276 p. (In Russ.).
5. Bargujer S.S., Suri N.M., Belokar R.M. Pearlitic steel wire: High carbon steel based natural nanomaterial by lead patenting process. *Materials Today: Proceedings*. 2016, vol. 3, no. 6, pp. 1553–1562.
6. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation process. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013, no. 5 (45), pp. 33–36.
7. Potemkin K.D. *Termicheskaya obrabotka i volochenie vysokoprochnoi provoloki* [Heat treatment and drawing of high-strength wire]. Moscow: Metallurgizdat, 1963, 120 p. (In Russ.).
8. Wiewiórska S., Muskalski Z. The assessment of the structure and properties of high-carbon steel wires after the process of patenting with induction heating. *Archives of metallurgy and materials*. 2015, vol. 60, no. 2, pp. 2015–2018.
9. Yukhvets I.A. *Proizvodstvo vysokoprochnoi armatury* [Manufacture of high-strength reinforcement]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 264 p. (In Russ.).
10. Koptseva N.V., Chukin M.V., Efimova Yu.Yu., Trubitsyn G.V., Litvinova N.V. Features of high-carbon steels structure formation during patenting. *Stal'*. 2013, no. 2, pp. 42–45. (In Russ.).
11. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Perlit v uglerodistykh stalyakh* [Perlite in carbon steels]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006, 311 p. (In Russ.).
12. Schastlivtsev V.M., Yakovleva I.L. Fine-lamellar pearlite: The first bulk nanomaterial in carbon steel. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015, vol. 79, no. 9, pp. 1077–1080.
13. Zhang X., Godfrey A., Huang X., Hansen N., Liu Q. Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire. *Acta Materialia*. 2011, no. 59 (9), pp. 3422–3430.
14. Taleff E.M., Lewandowski J.J., Pouradian B. Microstructure-property relationships in pearlitic eutectoid and hypereutectoid carbon steels. *Journal of Materials*. 2002, vol. 54 (7), pp. 25–30.
15. Lebedev V.N., Noskov S.E., Pudov E.A., Litvinova N.V., Gun G.S., Chukin V.V. Unit for patenting of bars used for reinforcement of reinforced concrete sleepers of new-generation. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2011, no. 5, pp. 21–24. (In Russ.).
16. Lebedev V.N., Korchunov A.G., Chukin M.V. Production of stabilized high-strength reinforcement steel for the new generation of ferroconcrete railroad ties. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1-2, pp. 54–58.
17. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Prospects for production of high-strength steel reinforcement made of high-carbon steel grades. *Chernye metally*. 2012, no. 12, pp. 8–16. (In Russ.).
18. Lambert-Perlade A., Gourgues A.F., Pineau A. Austenite to bainite phase transformation in the heat-affected zone of high strength low alloy steel. *Acta Mater*. 2004, no. 8 (52), pp. 2337–2348.
19. Schastlivtsev V.M., Yakovleva I.L., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Nikitenko O.A. Patterns of structure formation under ther-

- mal deformations in the processes of production of high-strength reinforcement. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2014, no. 1 (45), pp. 32–37. (In Russ.).
20. Elwazri A.M., Wanjara P., Yue S. The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid. *Materials Science and Engineering*. 2005, A 404, pp. 91–98.
  21. Borisenko A.Yu., Lutsenko V.A., Lutsenko O.V., Kurenkova T.P., Seregina E.S., Demidov A.V. Structure and properties of patented high-carbon wire. *Chernye metally*. 2012, no. 10 (74), pp. 31–36. (In Russ.).
  22. Chukin D.M., Ishimov A.S., Zherebtsov M.S., Meshkova A.I. Using the Gleeble 3500 system to conduct dilatometric study of 80R microalloyed steel. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov*. 2012, no. 38, pp. 148–155. (In Russ.).
  23. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 54, no. 7-8, pp. 387–392.

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of complex project on creation of hi-tech production with participation of higher education institutions (contracts No. 02.G25.31.0178 from 01.12.2015; No. MK204895 from 27.07.2015.).

The investigations were conducted in the Center for collective use of NMSTU “Nanosteels” Scientific Research Institute.

**Information about the authors:**

**M.V. Chukin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor (m.chukin@mail.ru)

**N.V. Koptseva**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technology of Metallurgy and Foundry Processes” (kopseva1948@mail.ru)

**Yu.Yu. Efimova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Materials Processing Technologies (jefimova78@mail.ru)

**D.M. Chukin**, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher of Scientific Research Sector (chukindmitry@gmail.com)

**O.A. Nikitenko**, Cand. Sci. (Eng.), Research Engineer, Research Associate of Scientific Research Sector (olganikitenko@list.ru)

Received April 15, 2017