

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ МАРКИ 50 ПРИ ВОЛОЧЕНИИ*

Чукин М.В., д.т.н., профессор, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе, зав. кафедрой технологий обработки материалов

Полякова М.А., к.т.н., доцент кафедры технологий обработки материалов

Пивоварова К.Г., к.т.н., доцент кафедры технологий обработки материалов (kgpivovarova@gmail.com)

Ефимова Ю.Ю., к.т.н., доцент кафедры технологий обработки материалов

Гулин А.Е., к.т.н., научный сотрудник кафедры технологий обработки материалов

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

Аннотация. В работе описан метод непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки. Сущность метода состоит в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения волочением, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения. Совмещение деформационных воздействий на проволоку позволяет в широких пределах изменять ее механические свойства, сочетая при этом высокую прочность и пластичность. Преимуществами такой схемы деформирования являются использование имеющегося в метизном производстве инструмента, совместимость со скоростями грубого и среднего волочения проволоки, а также простота установки. Приведена схема лабораторной установки для осуществления данного метода. В качестве объекта исследований была выбрана углеродистая проволока из стали марки 50, поскольку она является востребованным видом метизной продукции. Представлены химический состав и механические свойства проволоки в исходном состоянии. Проведены эксперименты по исследованию эффективности получения ультрамелкозернистой структуры в проволоке с применением метода деформационного наноструктурирования на лабораторной установке. Приведены режимы деформационной обработки проволоки и маршрут ее волочения. Исследована микроструктура проволоки из углеродистой стали марки 50 в продольном и поперечном сечениях на поверхности и в центральной области после различных видов деформационной обработки. В ходе экспериментальных исследований установлено влияние вида деформационной обработки на микроструктуру стали и ее анизотропию по сечению проволоки. Представлены результаты исследования механических свойств проволоки из углеродистой стали марки 50 при различных видах деформационной обработки. Проведена проверка уровня механических свойств на соответствие требованиям действующих в настоящее время стандартов на проволоку. Показано, что механические свойства проволоки при всех видах обработки удовлетворяют требованиям ГОСТ 17305-91. Результаты металлографических исследований и механических испытаний после комбинированного деформационного воздействия позволяют судить о перспективности выбранного направления по совмещению различных методов деформирования для формирования ультрамелкозернистой структуры в углеродистой проволоке.

Ключевые слова: волочение, знакопеременный изгиб, кручение, микроструктура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-572-578

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры металлов и сплавов в процессе деформационного наноструктурирования. В связи с высокой эффективностью процессы деформационного наноструктурирования являются предметом исследований российских и зарубежных авторов [1 – 22].

Многочисленными исследованиями, выполненными научными школами под руководством Р.А. Андриевско-

* Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России 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.).

го, Э.В. Козлова, Н.А. Коневой, А.М. Глезера, Р.З. Валиева и других установлено, что для формирования УМЗ структуры необходимо обеспечить наличие значительных сдвиговых деформаций, приводящих к измельчению структурных составляющих металлов и сплавов. С этой точки зрения актуальной задачей, стоящей перед исследователями, является создание такого метода, который, с одной стороны, обеспечивал бы формирование ультрамелкозернистой структуры, с другой – по своим техническим и технологическим характеристикам был бы совместим с существующими процессами металлургического и метизного производств.

В настоящее время такой метод разработан коллективом специалистов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» [23]. Метод непрерывного деформационного

Химический состав исследуемой стали, %

Table 1. Chemical composition of the investigated steel, %

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
50	0,47 – 0,55	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	до 0,250	до 0,040	до 0,035	до 0,250	до 0,250	до 0,080

наноструктурирования проволоки из высокоуглеродистых марок стали основан на совмещении волочения с другими методами деформационного воздействия. Данный метод включает деформацию длинномерного металла волочением через две последовательно соосно расположенные и неподвижно закрепленные конусные волоки с дополнительным деформационным воздействием сдвигом за счет одновременного знакопеременного изгиба металла и его кручения вокруг своей продольной оси в зоне между волоками. При этом скорости перемещения металла в осевом направлении и его вращения вокруг своей продольной оси поддерживают постоянными.

Осуществление деформационного процесса длинномерных заготовок за счет одновременного знакопеременного изгиба металла и его вращения вокруг своей продольной оси в зоне между волоками позволяет обеспечить за цикл обработки значительные суммарные деформации. При этом, благодаря большим сдвиговым деформациям, в обрабатываемом металле формируется УМЗ структура с повышенными физико-механическими свойствами, что позволяет получать изделия широкого размерно-марочного сортамента.

Преимуществами такой схемы деформирования являются использование имеющегося в метизном производстве инструмента, совместимость со скоростями грубого и среднего волочения проволоки, а также простота установки.

Отметим, что данный метод непрерывного деформационного наноструктурирования широко используется при лабораторных исследованиях по установлению влияния различных технологических факторов на формирование ультрамелкозернистой структуры в низко- и высокоуглеродистой проволоке различных марок и диаметров [24 – 25]. Что касается проволоки из среднеуглеродистых сталей, например, стали марки 50,

Таблица 2

Механические свойства проволоки в исходном состоянии

Table 2. Mechanical properties of the wire in initial state

Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
988	706	8,92	60,26

то сведения о ее структуре и свойствах с применением таких схем волочения малочисленны [26].

Исследование структуры и некоторых свойств проволоки из углеродистой стали 50 при волочении представлено в настоящей работе.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана проволока из углеродистой стали марки 50, широко применяемая не только как товарный продукт, но также в качестве исходной заготовки для производства других видов металлопродукции. Химический состав и механические свойства проволоки в исходном состоянии представлены в табл. 1, 2.

Проведена серия экспериментов с использованием установки (рис. 1), позволяющей реализовать на проволоке различные виды пластической деформации: растяжение волочением, знакопеременный изгиб и кручение [27].

Проволока с начальным диаметром 3,45 мм заправляется в первую по ходу ее движения неподвижно закрепленную коническую волоку и далее направлялась в систему роликов, обеспечивающую знакопеременный изгиб проволоки. Далее проволока, имеющая после первой волоки диаметр 2,9 мм, поступала во вторую неподвижно закрепленную расположенную соосно с первой коническую волоку меньшего диаметра, после которой она имела диаметр 2,75 мм с последующим закреплением ее переднего конца в намоточном устройстве. После

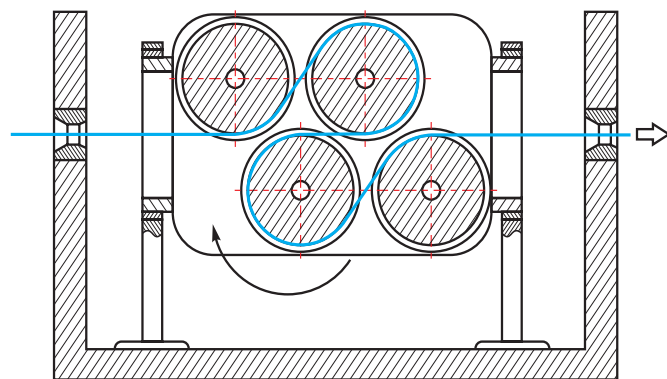


Рис. 1. Принципиальная схема непрерывного метода деформационного наноструктурирования проволоки

Fig. 1. Principal scheme of continuous method of wire deformational nanostructuring

этого осуществлялся процесс последовательной комбинированной деформации металла волочением за счет тянущего усилия, создаваемого вращением намоточного устройства. При этом одновременно с деформацией волочением в зоне между волокнами производилась дополнительная деформация сдвигом за счет вращения системы роликов вокруг продольной оси металла, обеспечивающей совместный знакопеременный изгиб металла и его вращение вокруг своей продольной оси. При этом в процессе последовательной деформации металла скорости его перемещения в осевом направлении и вращения вокруг своей продольной оси поддерживались постоянными. Процесс обработки производился при комнатной температуре со скоростью 0,06 м/с. При волочении использовалась волочильная смазка СВС-У. Диаметры роликов скручивающего блока были равны 90 мм. Расстояния между выходом из первой волоки до входа на ролик скручивающего блока и между выходом с ролика скручивающего блока до входа во вторую волоку были равны 330 и 250 мм соответственно. Скорость вращения принималась 50, 100, 150 об/мин.

В табл. 3 приведены принятые для исследования режимы деформационной обработки.

Для анализа микроструктуры на линии пробоподготовки фирмы Buechler по стандартной методике были приготовлены микрошлифы в продольном и поперечном сечениях. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергали травлению в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM 6490 LV во вторичных электронах при увеличении более 1000.

Механические свойства проволоки исследовали по стандартным методикам ГОСТ 10446-80, ГОСТ 9450-60 и ГОСТ Р 8.748-2011(ИСО 14577-1:2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроструктура проволоки из углеродистой стали марки 50 в продольном и поперечном сечениях на по-

верхности и в центральной области после различных видов деформационной обработки представлена на рис. 2.

Микроструктура состоит из ферритокарбидной смеси и небольшого количества структурно свободного феррита, который располагается в виде отдельных островков по границам перлитных колоний. В продольном сечении на всех образцах наблюдается вытягивание перлитных колоний и структурно свободного феррита вдоль оси деформации, имеется деформация и разрушение цементитных пластин.

При волочении в центральной области образца анизотропия перлитных колоний проявилась в большей степени, чем на поверхности. При сочетании волочения и изгиба анизотропия перлитных колоний наблюдается как в центре, так и на поверхности проволоки. Однако в центральной области она развивается интенсивнее, что приводит к получению ультрамелкозернистой структуры. Микроструктура при сочетании волочения с изгибом и кручением изменяется аналогично, как и после волочения с изгибом. Однако анизотропия носит более выраженный характер и проявляется в большей степени. Кроме того, структура более однородная и дисперсная по сравнению с предыдущими видами обработки. При всех видах деформационной обработки в микроструктуре наблюдается деформация и разрушение цементитных пластин. Однако при сочетании волочения с изгибом и волочения с изгибом и кручением деформация и разрушение цементитных пластин происходит в большей степени.

Результаты механических испытаний проволоки после непрерывного деформационного наноструктурирования представлены на рис. 3. Как видно из полученных результатов, совмещение деформационных воздействий на проволоку позволяет в широких пределах изменять ее механические свойства, сочетая при этом высокую прочность и пластичность.

Показатели микротвердости проволоки после различных видов деформационной обработки представлены на рис. 4. Анализ данных свидетельствует о том,

Таблица 3

Режимы деформационной обработки

Table 3. Modes of deformation processing

Номер режима	Волочение				Изгиб	Кручение
	маршрут волочения	обжатие в первой волоке, %	обжатие во второй волоке, %	суммарная степень деформации, %	диаметр роликов, мм	скорость вращения, об/мин
1	3,45 → 2,90 → 2,75	29,34	10,08	36,46	Отсутствует	Отсутствует
2					90	Отсутствует
3						50
4						100
5						150

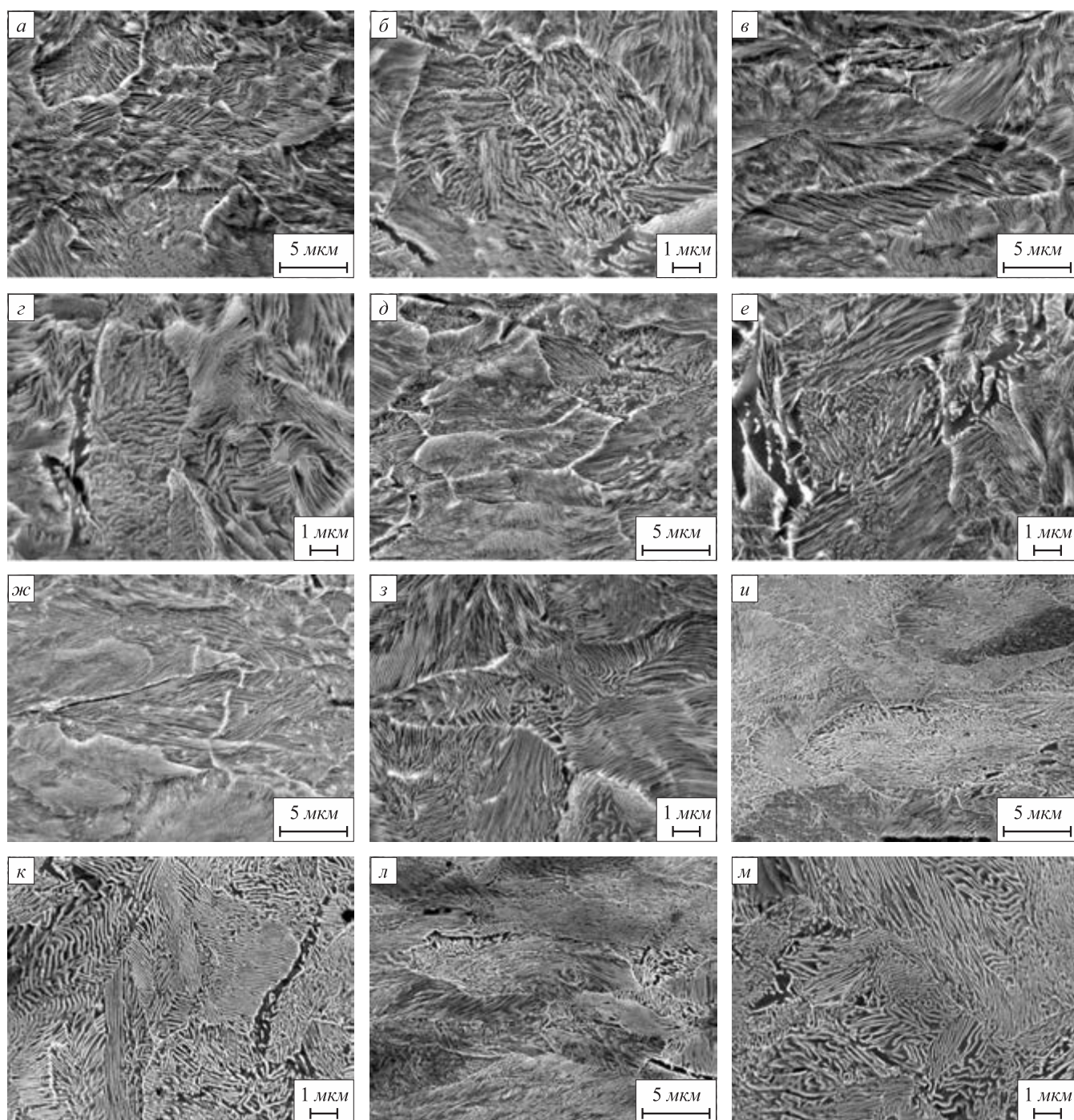


Рис. 2. Микроструктура проволоки из стали марки 50 после различных видов деформационной обработки:
а – г – деформация волочением (*а, б* – поверхность в продольном и поперечном направлениях соответственно;
в, г – центральная область в продольном и поперечном направлениях соответственно); *д – з* – деформация волочением
с деформацией изгибом (*д, е* – поверхность в продольном и поперечном направлениях соответственно;
ж, з – центральная область в продольном и поперечном направлениях соответственно); *и – м* – деформация волочением
с изгибом и кручением при 150 об/мин (*и, к* – поверхность в продольном и поперечном направлениях соответственно;
л, м – центральная область в продольном и поперечном направлениях соответственно)

Fig. 2. Microstructure of wire of carbon steel of grade 50 after different kinds of deformational processing:
а – г – deformation by drawing (*а, б* – surface in longitudinal and transversal directions, respectively; *в, г* – central area
in longitudinal and transversal directions, respectively); *д – з* – deformation by drawing with bending (*д, е* – surface in longitudinal
and transversal directions, respectively; *ж, з* – central area in longitudinal and transversal directions, respectively);
и – м – deformation by drawing with bending and torsion at 150 RPM (*и, к* – surface in longitudinal and transversal directions, respectively;
л, м – central area in longitudinal and transversal directions, respectively)

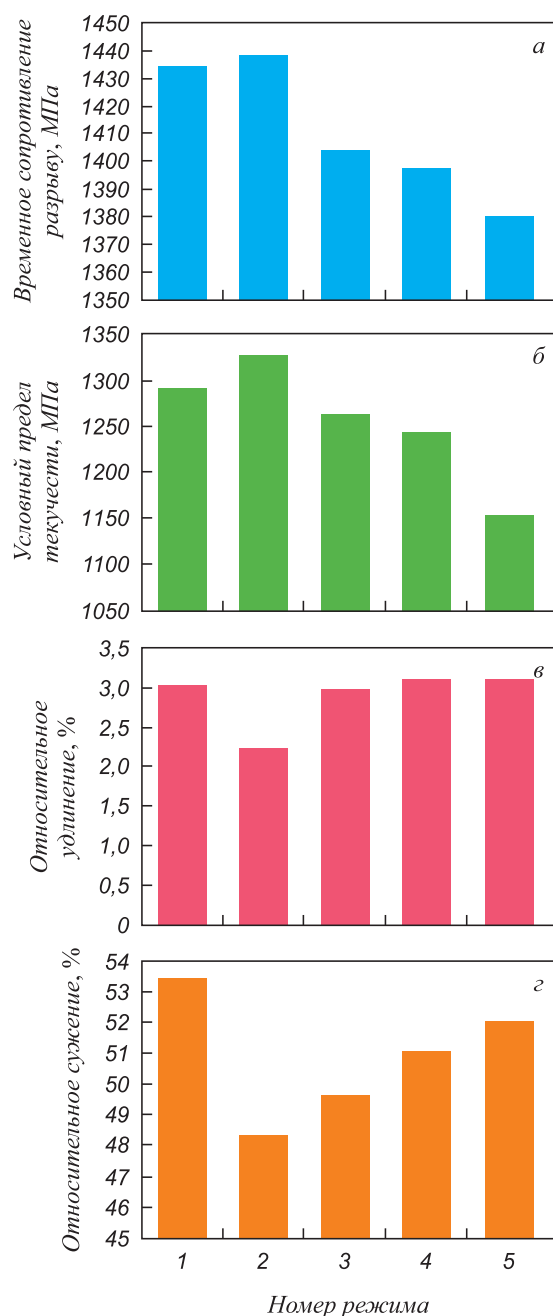


Рис. 3. Механические свойства проволоки из стали марки 50 после различных видов деформационной обработки:

1 – волочение; 2 – волочение с изгибом; 3 – волочение с изгибом и кручением 50 об/мин; 4 – волочение с изгибом и кручением 100 об/мин; 5 – волочение с изгибом и кручением 150 об/мин

Fig. 3. Mechanical properties of wire of carbon steel of grade 50 after different kinds of deformational processing:

1 – drawing; 2 – drawing with bending; 3 – drawing with bending and torsion at 50 RPM; 4 – drawing with bending and torsion at 100 RPM; 5 – drawing with bending and torsion at 150 RPM

что минимальную твердость имеют образцы проволоки после деформации волочением с изгибом.

Проведенные исследования показали, что в результате различных видов деформационной обработки механические свойства углеродистой проволоки из стали 50 удовлетворяют требованиям ГОСТ 17305-91.

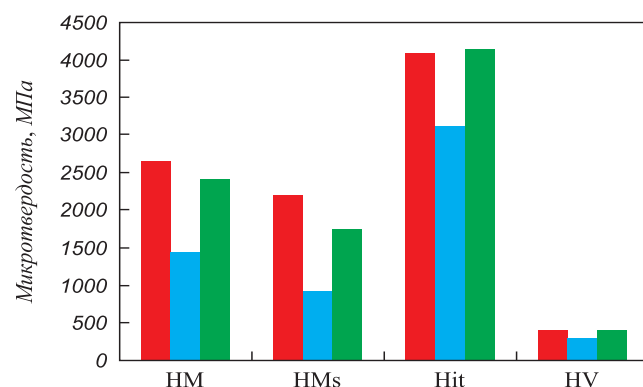


Рис. 4. Микротвердость проволоки из стали марки 50 после различных видов деформационной обработки:

– волочение; – волочение с изгибом; – волочение с изгибом и кручением

Fig. 4. Microhardness of wire of carbon steel of grade 50 after different kinds of deformational processing:

– drawing; – drawing with bending; – drawing with bending and torsion

Выводы

Результаты металлографических исследований показали, что совмещение различных деформационных воздействий на проволоку из углеродистой стали марки 50 ведет к измельчению отдельных структурных составляющих, размер которых становится меньше 1000 нм, что позволяет классифицировать полученную структуру как ультрамелкозернистую. Изменение значений механических свойств чувствительно к изменению технологических параметров процесса деформационного наноструктурирования, прежде всего к скорости вращения при кручении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буторин Д.Е. Связь дислокационных механизмов упрочнения с показателями прочности, трещиностойкости и износостойкости углеродистых сталей: Дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2002. – 206 с.
2. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ефимов О.Ю. и др. Закономерности и механизмы термомеханического упрочнения проката из малоуглеродистой стали // Успехи физики металлов. 2010. Т. 11. С. 241 – 268.
3. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Костерев В.Б. и др. Механизмы формирования предела текучести малоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2011. № 3. С. 50 – 55.
4. Бубнов В.А., Костенко С.Г. Механизмы упрочнения аустенитных сталей при пластическом деформировании // Изв. вуз. Машиностроение. 2008. № 6. С. 63 – 70.
5. Ведяков И.И., Одесский П.Д. Сталь в строительных металлических конструкциях. Часть 4. Механизмы упрочнения и разрушения сталей. – М.: ОАО НИЦ «Строительство», 2013. – 52 с.
6. Петрова Л.Г., Чудина О.В. Прогнозирование уровня упрочнения металлов и сплавов на основе управления структурообразованием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7. С. 3 – 11.
7. Харитонов В.А., Зайцева М.В. Способы повышения механических свойств проволоки из низкоуглеродистых сталей. Деп. в ВИНТИ 19.04.05, № 547-B2005. – 28 с.

8. Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Харитонов В.А. Обработка бунтовой арматурной стали по схеме «растяжение – знакопеременный изгиб» (теория, технология, оборудование) // *Металлург*. 2010. № 4. С. 78 – 83.
9. Брюханов А.А., Шкатуляк Н.М., Родман М. и др. Влияние знакопеременного изгиба на текстуру, структуру и механические свойства листов низкоуглеродистой стали // *Технология металлов*. 2012. № 11. С. 19 – 24.
10. Зильберг Ю.В., Бах Ф.-В., Борман Д. и др. Влияние знакопеременного изгиба на структуру и свойства полос магниевого сплава AZ31 // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 4. С. 20 – 25.
11. Гуль Ю.П., Перчун Г.И. Влияние циклической деформации на свойства холоднодеформированной низкоуглеродистой стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1990. № 3. С. 105 – 108.
12. Вакуленко И.А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2003. – 94 с.
13. Зильберг Ю.В., Кузнецов Д.С., Машура С.В. Влияние кручения на твердость проволоки из низкоуглеродистой стали // *Сталь*. 2010. № 11. С. 66 – 69.
14. Хван А.Д. Напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки при осадке (растяжении) с кручением // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2010. № 11. С. 11 – 19.
15. Буркин С.П., Исхаков Р.Ф., Андрюкова Е.А. Особенности прокатки с кручением в многовалковых калибрах // *Производство проката*. 2008. № 9. С. 34 – 36.
16. Kulisch W., Freudenstein R., Ruiz A. etc. Nanostructured materials for advanced technological applications: A brief introduction // *Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. 2009. P. 3 – 34.
17. Clement K., Iseli A., Karote D. etc. Nanostructured materials: industrial applications // *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. 2012. P. 265 – 306.
18. Suwas S., Bhowmik A., Biswas S. Ultra-fine grain materials by severe plastic deformation: application to steels // *Microstructure and Texture in Steels*. 2009. P. 325 – 344.
19. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
20. Chukin M.V., Emaleeva D.G., Polyakova M.A., Gulina A.E. State and application prospects of deformation methods for bulk materials microstructure refinement // *Metallurgist*. 2016. № 3. P. 73 – 79.
21. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 3 (43). С. 69 – 73.
22. Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П. и др. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009. № 2. С. 64 – 68.
23. Пат. 2467816 РФ: МПКВ21С 1/04. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.А. Полякова, С.Е. Носков, М.В. Чукин и др. Оpubл. 02.28.2011.
24. Gulina A.E., Polyakova M.A., Golubchik E.M. Effect of stress-strain state during combined deformation on microstructure evolution of high carbon steel wire // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 870. P. 460 – 465.
25. Чукин М.В., Полякова М.А., Гулин А.Е. Особенности влияния комбинирования различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства углеродистой проволоки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 552 – 557.
26. Polyakova M., Calliari I., Gulina A. Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 716. P. 201 – 207.
27. Пат. 130525 РФ: МПКВ21С 1/00. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.А. Полякова, М.В. Чукин, Э.М. Голубчик Э.М. и др. Оpubл. 02.04.2013.

Поступила 10 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 7, pp. 572–578.

INVESTIGATION OF STRUCTURE AND SEVERAL PROPERTIES OF CARBON STEEL OF GRADE 50 DEFORMED BY DRAWING

M.V. Chukin, M.A. Polyakova, K.G. Pivovarova, Yu.Yu. Efimova, A.E. Gulina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The continuous method of deformational nanostructuring is presented. It consists of simultaneous applying of the tensile deformation by drawing, bending deformation while going via the rolls system and twisting deformation to the continuously moving wire. Combination of different kinds of deformation makes it possible to change in a wide range its mechanical properties matching high strength and ductility. The advantage of this scheme of deformational processing consists in arranging together tools which are used in metal ware manufacturing industrial processes as well as its simplicity and compatibility with rates at coarse and middle drawing processes. The scheme of the laboratory unit for the method implementation is considered. Wire from medium carbon steel of grade 50 was chosen as the object for investigation because it is considered to be the needed kind of metal ware product. Chemical composition and mechanical properties of this wire are described. Experiments on investigation of the possibility for ultrafine-grained structure formation effectiveness in carbon steel wire were conducted using the developed laboratory unit. Deformation modes

and drawing route are given. Microstructure of the wire from medium carbon steel of grade 50 was studied after different kinds of deformational processing in longitudinal and transversal cross-sections. During experimental researches the effect of deformational processing on carbon steel wire microstructure was specified as well as its anisotropy in the cross section. The mechanical properties of the wire of grade 50 steel were studied after different kinds of deformational processing. The verification of these properties was carried out in accordance with the demands in current national wire standards. It was proved that carbon steel wire mechanical properties matches well with norms set in GOST17305-91. Investigation results of microstructure and mechanical properties of the wire from medium carbon steel of grade 50 after different kinds of deformational processing show the perceptiveness of the chosen direction for combination of different kinds of deformation for ultrafine-grained structure formation in carbon steel wire.

Keywords: wire, drawing, reverse bend, torsion, microstructure, mechanical properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-572-578

REFERENCES

1. Butorin D.E. *Svyaz' dislokatsionnykh mekhanizmov uprochneniya s pokazatelyami prochnosti, treshchinnosty i iznosostoykosti*

- uglerodistykh stalei: dis. ... kand. tekhn. nauk [Correlation of dislocation hardening mechanisms with strength, fracture resistance and wear resistance of carbon steels: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Novosibirsk, 2002, 206 p. (In Russ.).
2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Efimov O.Yu., Yur'ev A.B., Kononov S.V. Regularities and mechanisms of thermomechanical hardening of rolled products from low-carbon steel. *Uspekhi fiziki metallov*. 2010, vol. 11, pp. 241–268. (In Russ.).
3. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kosterev V.B., Efimov O.Yu., Kononov S.V., Tang G. Mechanisms of yield stress formation of low-carbon steel at thermomechanical hardening. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2011, no. 3, pp. 50–55. (In Russ.).
4. Bubnov V.A., Kostenko S.G. Mechanisms of austenitic steels hardening during plastic deformation. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 2008, no. 6, pp. 63–70. (In Russ.).
5. Vedyakov I.I., Odesskii P.D. *Stal' v stroitel'nykh metallicheskiykh konstruktsiyakh. Chast' 4. Mekhanizmy uprochneniya i razrushe-niya stali* [Steel in building metal structures. Part 4: Mechanisms of hardening and destruction of steels]. Moscow: Stroitel'stvo, 2013, 52 p. (In Russ.).
6. Petrova L.G., Chudina O.V. Forecasting the hardening level of metals and alloys based on the management of structure formation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007, no. 7, pp. 3–11. (In Russ.).
7. Kharitonov V.A., Zaitseva M.V. *Sposoby povysheniya mekhanicheskikh svoystv provoloki iz nizkouglerodistykh stalei* [Methods for improving the mechanical properties of wire from low-carbon steels]. VINITI Dep. No. 547-V2005, 28 p. (In Russ.).
8. Kharitonov V.A., Ivantsov A.B., Kharitonov V.A. Production of bundled reinforcement steel by the tension – Alternating bending scheme (theory, technology, equipment). *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 3–4, pp. 252–259.
9. Bryukhanov A.A., Shkatulyak N.M., Rodman M., Shaper M., Usov V.V., Kloze Kh. Influence of reverse bend on texture, structure and mechanical properties of sheets of low-carbon steel. *Tekhnologiya metallov*. 2012, no. 11, pp. 19–24. (In Russ.).
10. Zil'berg Yu.V., Bakh F.-V., Borman D., Rodman M., Shaper M., Khepke M. Effect of alternating bending on the structure and properties of strips from AZ31 magnesium alloy. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, vol. 51, no. 3–4, pp. 170–175.
11. Gul' Yu.P., Perchun G.I. Effect of cyclic deformation on the properties of cold-deformed low-carbon steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, no. 3, pp. 105–108. (In Russ.).
12. Vakulenko I.A. *Struktura i svoystva uglerodistoi stali pri znako-peremennom deformirovani* [Structure and properties of carbon steel under alternating deformation]. Dnepropetrovsk: Gaudeamus, 2003, 94 p. (In Russ.).
13. Zil'berg Yu.V., Kuznetsov D.S., Mashura S.V. Effect of torsion on the hardness of wire from low-carbon steel. *Stal'*. 2010, no. 11, pp. 66–69. (In Russ.).
14. Khvan A.D. Stress-strain state of a cylindrical billet under draft (tension) with torsion. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo*. 2010, no. 11, pp. 11–19. (In Russ.).
15. Burkin S.P., Iskhakov R.F., Andryukova E.A. Features of rolling with torsion in multi-roll calibers. *Proizvodstvo prokata*. 2008, no. 9, pp. 34–36. (In Russ.).
16. Kulisch W., Freudenstein R., Ruiz A., Valsesia A., Sirghi L., Ponti J., Colpo P., Rossi F. Nanostructured materials for advanced technological applications: A brief introduction. *Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications. NATO Science for Peace and Security. Series B: Physics and Biophysics*. 2009, pp. 3–34.
17. Clement K., Iseli A., Karote D., Cremer J., Rajagopalan S. Nanostructured materials: industrial applications. *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. 2012, pp. 265–306.
18. Suwas S., Bhowmik A., Biswas S. Ultra-fine grain materials by severe plastic deformation: application to steels. *Microstructure and Texture in Steels*. 2009, pp. 325–344.
19. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy* [Bulk nanostructured metallic materials]. Moscow: Akademkniga, 2007, 398 p. (In Russ.).
20. Chukin M.V., Emaleeva D.G., Polyakova M.A., Gulin A.E. State and application prospects of deformation methods for bulk materials microstructure refinement. *Metallurgist*. 2016, no. 3, pp. 73–79.
21. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. State and directions of the development of continuous methods for round wire nanostructuring. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2013, no. 3 (43), pp. 69–73. (In Russ.).
22. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. Innovative potential of new technologies for production of metal ware products from nanostructured steels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2009, no. 2, pp. 64–68. (In Russ.).
23. Polyakova M.A., Noskov S.E., Chukin M.V. etc. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem s krucheniem* [Method of production of workpieces with ultrafinegrained structure by drawing with torsion]. Patent RF no. 2467816: MPK V21S 1/04. Publ. 02.28.2011. (In Russ.).
24. Gulin A.E., Polyakova M.A., Golubchik E.M. Effect of stress-strain state during combined deformation on microstructure evolution of high carbon steel wire. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 870, pp. 460–465.
25. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulin A.E. Features of the effect of combining different kinds of plastic deformation on the microstructure grinding and mechanical properties of the carbon wire. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 8, pp. 552–557. (In Russ.).
26. Polyakova M., Calliari I., Gulin A. Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 716, pp. 201–207.
27. Polyakova M.A., Chukin M.V., Golubchik E.M. etc. *Ustroistvo dlya izgotovleniya provoloki s ul'tramelkozernistoi strukturoi* [Device for manufacturing ultrafine-grain wire]. Patent RF no. 130525: MPK V21S 1/00. Publ. 02.04.2013. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the implementation of a comprehensive project to create high-tech production with the participation of a higher educational institution (Contract No. 02.G25.31.0178 of 01.12.2015, No. MK204895 of 27.07.2015).

Information about the authors:

M.V. Chukin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Vice-Rector – Vice Rector for Research and Innovation, Head of the Chair “Materials Processing Technologies”
M.A. Polyakova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Processing Technologies”
K.G. Pivovarova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Processing Technologies” (kgpivovarova@gmail.com)
Yu.Yu. Efimova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Processing Technologies”
A.E. Gulin, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Chair “Materials Processing Technologies”

Received May 10, 2017