ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СТАЛЬНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ*

М. А. ПОЛЯКОВА¹, д-р техн. наук, кафедра технологий обработки материалов, *m.polyakova@magtu.ru*;

К. NARASIMHAN², PhD, кафедра металлургии и материаловедения, *nara@iitb.ac.in*;

М. J. N. V. PRASAD², PhD, кафедра металлургии и материаловедения;

К. Г. ПИВОВАРОВА¹, канд. техн. наук, кафедра технологий обработки материалов;

А. Е. ГУЛИН¹, канд. техн. наук, кафедра технологий обработки материалов;

Ю. Ю. ЕФИМОВА¹, канд. техн. наук, кафедра технологий обработки материалов

(¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, г. Магнитогорск;

² Индийский технологический институт Бомбея (IIT Bombay), Индия, Понай, Мумбаи)

Аннотация. Создание методов деформационного наноструктурирования металлов и сплавов, которые по своим технологическим параметрам и производительности можно было бы адаптировать в действующее промышленное производство, является одной из актуальных проблем, решаемых в настоящее время исследователями.

Приведено описание комбинированной деформационной обработки проволоки волочением с изгибом и кручением. Результаты металлографических исследований высокоуглеродистой проволоки из стали 70 свидетельствуют о специфических особенностях влияния комбинирования различных видов пластической деформации на микроструктуру стали. Механические испытания проволоки после различных видов комбинированной обработки показали, что такая обработка обеспечивает сочетание прочности и пластичности, характерное для стали с ультрамелкозернистой структурой. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определена величина запасенной энергии и температуры калориметрического пика деформированной проволоки из высокоуглеродистой стали 70. Показано, что величина запасенной энергии и температуры калориметрического пика чувствительны к изменению технологических параметров комбинированной деформационной обработки.

Ключевые слова: деформационная обработка проволоки; волочение с изгибом и кручением; знакопеременный изгиб; ультрамелкозернистая структура; величина запасенной энергии.

Ссылка для цитирования. Полякова М.А., Narasimhan K., Prasad M.J.N.V., Пивоварова К.Г., Гулин А.Е., Ефимова Ю.Ю. Особенности структурообразования стальной углеродистой проволоки перлитного класса после комбинированной деформационной обработки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 10. С. 74–81.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-10-74-81

Одним из важнейших видов метизов является стальная проволока, широко используемая как конструктивный элемент при производстве канатов, сетки, биметаллической сталемедной продукции и других видов металлопродукции, обеспечивающей безопасность и надежность функционирования железных дорог, агрегатов для подъема (перемещения) людей или грузов, несущих строительных конструкций самых различных объектов и т. д. В настоящее время к уровню свойств проволоки предъявляют все более жесткие требования, прежде всего к показателям прочности и пластичности.

В последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования ульт-

рамелкозернистой (УМЗ) структуры металлов и сплавов в процессе различных видов деформационного воздействия [1–9]. Изменяя размер зерна посредством деформации, можно значительно повысить механические и физические характеристики металлов и сплавов [10]. Существующие методы интенсивной пластической деформации для формирования УМЗ структуры металлов, такие как равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением, мультиосевая деформация, винтовая экструзия и др., имеют существенные ограничения по промышленному внедрению, обусловленные ограниченными размерами обрабатываемых заготовок, дискретностью процессов, сложностью применяемого оборудования и оснастки, несовмес-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 18-58-45008 ИНД.а.

тимостью со скоростными и деформационными режимами технологических процессов металлургического и метизного производств [11–13]. С этой точки зрения одной из актуальных проблем, решаемых в настоящее время исследователями, является создание методов деформационного наноструктурирования металлов и сплавов, которые по своим технологическим параметрам и производительности можно было бы адаптировать в действующее промышленное производство.

В последнее время одним из перспективных направлений развития технологических процессов производства металлоизделий является комбинирование различных методов обработки (прокатка, волочение, экструзия, прессование и т. д.) [14–16]. В ряде работ [17–20] показано, что использование комбинированного воздействия при производстве проволоки из углеродистой стали обеспечивает формирование УМЗ струк-

туры с соответствующим данному структурному состоянию уровнем механических свойств.

Как известно, каждый вид пластической деформации оказывает специфическое воздействие на микроструктуру обрабатываемой заготовки. При этом для конструирования комбинированных методов деформационной обработки с целью их дальнейшего использования в промышленных технологиях метизного производства необходимо знать, каким образом изменяется микроструктура, а значит и механические свойства стали, при комбинировании различных схем пластической деформации. С этой точки зрения актуальной является задача изучения особенностей структурообразования стали при комбинированном деформационном воздействии, которое осуществляется в условиях, аналогичных условиям действующего метизного производства.

Методика проведения эксперимента

Для проведения эксперимента было выбрано устройство для осуществления непрерывного метода деформационного наноструктурирования проволоки волочением с изгибом и кручением (рис. 1) [21–23].

Рис. 1. Метод комбинированной деформационной обработки проволоки волочением с изгибом и кручением

Fig. 1. The method of wire combined deformation processing by bending and twisting

Сущность метода заключается в наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения и сжатия при прохождении через последовательно установленные волокна с одновременным приложением деформации изгиба и кручения в четырехроlikовом блоке, который имеет индивидуальный привод, что позволяет изменять в широких пределах степень деформации кручения.

При этом благодаря большим сдвиговым деформациям, возникающим в обрабатываемой

проволоке при комбинированном деформационном воздействии, формируется УМЗ структура с соответствующим для нее уровнем физико-механических свойств в проволоке широкого размерно-марочного сортамента [24–26]. Преимуществом данного метода является возможность его использования в промышленных технологиях производства проволоки, поскольку скорость такой обработки совместима со скоростями грубого и среднего волочения. Кроме того, использование инструмента метизных производств не требует существенного переоборудования существующих волочильных станов.

Основными технологическими параметрами процесса, влияющими на формирование УМЗ структуры и механические свойства проволоки, являются обжатия в волокнах и количество оборотов скручивания. Влияние различных технологических факторов разработанной комбинированной обработки на формирование УМЗ структуры среднеуглеродистой проволоки различных диаметров достаточно хорошо изучено [27–29]. Было показано, что комбинирование различных видов пластической деформации позволяет получать различное сочетание прочности и пластичности на проволоке одной марки стали и одного диаметра. Это является отличительной особенностью комбинированного деформационного воздействия волочением с изгибом и кручением. Целью данной работы явилось исследование влияния комбинирования различных видов пластической деформации на формирование микроструктуры высокоуглеродистой проволоки из стали 70.

Химический состав проволоки в исходном состоянии представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ 70, %

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH-CARBON WIRE OF STAL 70 GRADE, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,67–0,75	0,17–0,37	0,5–0,8	До 0,25	До 0,035	До 0,035	До 0,25	До 0,2

В табл. 2 приведены принятые для исследования режимы комбинированной деформационной обработки.

ТАБЛИЦА 2. РЕЖИМЫ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

TABLE 2. REGIMES 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, 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

Микроструктуру исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490 LV во вторичных электронах при увеличениях более 1000 крат.

Полученные образцы проволоки после деформирования исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе STA 449 F3 Jupiter, имеющем возможность записи кривых ДСК в широком интервале температур (от 20 до 1500 °С). Методика ДСК заключается в регистрации различия тепловых потоков от исследуемого образца и образца-эталоны при нагревании с постоянной скоростью [30]. Измеренные в ходе исследования различия в тепловых потоках между двумя тиглями регистрируются и анализируются с помощью программного обеспечения. Полученные данные сравниваются с контрольным тиглем, материал

которого во время исследования не испытывает воздействия каких-либо реакций или фазовых превращений. При этом определяют вид реакции (экзотермические или эндотермические) и фазовые превращения, которые приводят к изменениям теплового потока в тигле с образцом. Исследование проводили в корундовых тиглях на небольших (до 0,1 г) образцах высокоуглеродистой проволоки из стали 70 после различных видов деформационного воздействия в потоке аргона (30 см³/мин). Скорость нагрева в диапазоне температур 25–600 °С составляла 10 °С/мин. В качестве эталона использовали пустой корундовый тигель. В процессе нагрева на кривой ДСК фиксируется экзотермический пик. Определение температуры пика и запасенной энергии деформации проводили с использованием программы Netzsch Proteus Analysis.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлена микроструктура высокоуглеродистой проволоки из стали 70 после различных видов деформационного воздействия.

Микроструктурное исследование показало, что при наложении на проволоку деформации растяжения и изгиба после ее прохождения через первую волоку и изгибающее устройство происходит сначала изгиб отдельных цементитных пластин, и начинается процесс дробления перлитных колоний. Наложение деформации кручения приводит к полному разрушению цементитных пластин, в структуре наблюдаются полосы сброса. При увеличении степени деформации кручением происходит интенсивная де-

формация цементитных пластин и их дробление. При большом увеличении наблюдается фрагментация ферритных зерен.

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 происходят в большей степени. Полученную микроструктуру можно классифицировать как ультрамелкозернистую.

На рис. 3 представлены диаграммы растяжения проволоки из высокоуглеродистой стали 70 после различных видов деформационной обработки.

Рис. 2. Микроструктура проволоки из стали 70 после различных видов деформационной обработки: а — волочение; б — волочение и знакопеременный изгиб; в — волочение, знакопеременный изгиб и деформация кручением 150 об/мин

Fig. 2. Microstructure of the wire of Stal 70 grade after different kinds of deformation processing: а — drawing; б — drawing and sign-reversing bending; в — drawing, sign-reversing bending and deformation by twisting 150 r/min

Рис. 3. Диаграммы растяжения лабораторных образцов проволоки из высокоуглеродистой стали 70, полученных традиционным волочением по маршруту 3,45 → 2,90 → 2,75 и при комбинировании волочения со знакопеременным изгибом и кручением с различными скоростями вращения четырехроlikового блока

Fig. 3. Tensile diagrams of laboratory wire specimens of high-carbon Stal 70 steel, made by traditional drawing by route 3,45 → 2,90 → 2,75 and at combined drawing with sign-reversing bending and twisting with different rotation speed of four-rolled block

Из полученных данных видно, что при всех видах деформационного воздействия величина предела прочности на разрыв проволоки из высокоуглеродистой стали 70 не изменяется. Однако комбинированное деформационное воздействие волочением с изгибом (при скорости кручения четырехроlikового блока 0 об/мин) приводит к увеличению ее пластичности. Комбинирование волочения с изгибом и кручением, наоборот, снижает пластические свойства обрабатываемой проволоки.

В работах [31–33] представлены результаты теоретического обоснования механизмов формирования наноструктуры при интенсивной пластической деформации. В качестве основного механизма рассматривается дислокационно-дислокационная модель деформации, основанная на изучении поведения дислокаций при интенсивной пластической деформации. Между тем в последние годы появились работы по изучению роли точечных дефектов в процессах структурообразования при больших деформациях [34]. При этом формирование структуры в процессе деформации происходит путем движения, накопления и взаимодействия дефектов решетки. После деформации накопленную концентрацию дефектов можно оценить посредством анализа запасенной энергии, которая выделяется в процессе нагрева образцов в дифференциальном сканирующем калориметре [34, 35].

Результаты калориметрических исследований проволоки из высокоуглеродистой стали 70 после различных видов комбинирования пластической деформации приведены на рис. 4.

На кривой ДСК проволоки после различных видов деформационной обработки, кроме волочения, выявляется один экзотермический пик, температура которого находится в интервале 400–500 °С. Наблюдаемый пик, по-видимому, обусловлен перестройкой и аннигиляцией линейных и точечных дефектов. С увеличением деформации температура начала пика уменьшается, а площадь пика, характеризующая запасенную энергию деформации, увеличивается примерно в 1,3 раза (с 1,97 до 2,51 Дж/г). Изменение площади пика с увеличением степени деформации кручением (см. рис. 4), вероятнее всего, связано с изменением уровня внутренних напряжений, который растет с увеличением плотности дислокаций [34]. Максимальная величина запасенной энергии ($E_{\text{зап}} = 3,25$ Дж/г) наблюдается при скорости кручения 150 об/мин (рис. 5). Повышение скорости кручения четырех-

роликового блока, по-видимому, снижает подвижность дислокаций и способствует накоплению дефектов, что и объясняет высокий уровень запасенной энергии.

Рис. 4. Зависимость теплового потока от температуры нагрева деформированных образцов проволоки из высокоуглеродистой стали 70:

- 1 — волочение по маршруту 3,45 → 2,90 → 2,75;
- 2 — волочение с изгибом; 3 — волочение по маршруту 3,45 → 2,90 → 2,75 с изгибом и кручением четырехроlikового блока 50 об/мин

Fig. 4. Dependence of heat flow on heating temperature of deformation wire specimens of high-carbon Stal 70 steel: 1 — drawing by route 3,45 → 2,90 → 2,75; 2 — drawing with bending; 3 — drawing by route 3,45 → 2,90 → 2,75 with bending and twisting by the four-rolled block at 50 r/min

Рис. 5. Зависимость запасенной энергии деформации в проволоке из высокоуглеродистой стали 70 после комбинированной деформационной обработки волочением с изгибом и кручением при различной скорости кручения четырехроlikового блока

Fig. 5. Dependence of deformation stored energy in the wire of high-carbon Stal 70 steel after combined deformation processing by drawing with bending and twisting at different four-rolled block twisting speed

Из результатов проведенного калориметрического исследования следует, что формирование УМЗ структуры в высокоуглеродистой проволоке из стали 70 при комбинированной деформационной обработке происходит в условиях непрерывного накопления деформационных дефектов, измельчения элементов структуры, что и приводит к получению характерного для данного состояния сочетания прочности и пластичности.

Выводы

1. Комбинированная деформационная обработка волочением с изгибом и кручением проволоки из высокоуглеродистой стали 70 приводит к измельчению микроструктурных составляющих стали. Такую микроструктуру можно идентифицировать как ультрамелкозернистую. Это обеспечивает сочетание высокой прочности с сохранением уровня пластичности обработанной проволоки, характерное для данного типа микроструктуры.

2. Методом ДСК выявлено, что запасенная энергия деформации характерна для проволоки с УМЗ структурой. Показано, что с ростом степени деформации кручением наблюдается увеличение запасенной энергии, которая выделяется в процессе нагрева образцов в дифференциальном сканирующем калориметре и фиксируется на кривой ДСК в виде экзотермического пика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бубнов В.А., Костенко С.Г. Механизмы упрочнения аустенитных сталей при пластическом деформировании // Изв. вузов. Машиностроение. 2008. № 6. С. 63–70.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

5. Гуль Ю.П., Перчун Г.И. Влияние циклической деформации на свойства холоднодеформированной низкоуглеродистой стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. № 3. С. 105–108.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 3 (43). С. 69–73.
7. 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.
8. Clement K., Iseli A., Karote D. etc. Nanostructured materials: industrial applications // Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology. 2012. P. 265–306.
9. 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.
10. Noskova N., Mulyukov R. Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys. — Ekaterinburg: Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. — 279 p.
11. Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г. и др. Перспективные направления развития методов деформационного наноструктурирования // Деп. в ВИНТИ. 2011. № 302 – В 2011. — 56 с.
12. 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.
13. Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П. и др. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 64–68.
14. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. — М.: МАКС Пресс, 2005. — 344 с.
15. Харитонов В.А., Галимов Д.Э. Повышение эффективности волочения на основе применения совмещеннокомбинированных процессов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 8. С. 71–77.
16. Харитонов В.А., Таранин И.В. Сравнительный анализ эффективности совмещенных способов обработки металлов давлением при производстве проволоки // Статья. 2015. № 1. С. 61–64.
17. Харитонов В.А., Таранин И.В. Повышение деформируемости проволоки на основе применения модульных и комбинированных способов деформации // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 11. С. 70–78.
18. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Оценка эффективности способов волочения с кручением при изготовлении углеродистой проволоки с УМЗ-структурой // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 2 (22). С. 116–121.
19. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Влияние кручения при волочении круглой проволоки в монолитной волоке // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2015. № 21. С. 82–88.
20. Харитонов В.А., Галимов Д.Э. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом “прокатка-волочение” // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 12. С. 15–21.
21. Пат. 2467816 РФ, МПК В 21 С 1/04, В 21 С 1/00. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, В.П. Рудаков, С.Е. Носков, А.Е. Гулин // Заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.
22. Пат. 130525 РФ, МПК В 21 С 1/00. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.А. Полякова, М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.Е. Гулин // Заявл. 04.02.2013; опубл. 27.07.2013. Бюл. № 21.
23. Пат. 159535 РФ, МПК В 21 С 3/02. Устройство для получения длинномерных заготовок с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, Д.Г. Емалеева, А.Е. Гулин // Заявл. 23.07.2015; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
24. 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. вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 552–557.
25. 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.
26. 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.
27. Чукин М.В., Полякова М.А., Пивоварова К.Г. и др. Исследование структуры и некоторых свойств проволоки из углеродистой стали марки 50 при волочении // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. № 7. С. 572–578.
28. Polyakova M.A., Calliari I., Pivovarova K.G., Gulina A.E. Approach to obtaining medium carbon steel wire with a specified set of mechanical properties after combined deformational processing // Materials Physics and Mechanics. 2018. Vol. 36. P. 53–59.
29. Polyakova M.A., Chukin M.V., Brunelli K., Efimova Yu.Yu., Golubchik E.M. Study of texture and microstructure formation in medium carbon steel wire submitted to combined deformation by drawing with bending and twisting // Materials Physics and Mechanics. 2018. Vol. 36. P. 60–66.
30. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика. — М.: Химия, 1990. — 176 с.
31. Лотков А.И., Батурина А.А., Гришков В.Н., Копылов В.И. О возможной роли дефектов кристаллического строения в механизмах нанофрагментации зеренной структуры при интенсивной холодной пластической деформации металлов и сплавов // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 3. С. 64–79.
32. Фарбер В.М. Вклад диффузионных процессов в структурообразование при интенсивной холодной пластической деформации металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. Т. 8. С. 3–9.
33. Zehetbauer M., Stilwe H.P., Vorhauer A., Schafner E., Kohout J. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation // Nanomaterials by severe plastic deformation: fundamentals – processing – applications. Proc. 2nd International Conference. — Vienna: J. Wiley VCH Weinheim. 2004. P. 435–446.

34. Корзникова Е.А. Калориметрические исследования меди подвергнутой деформации кручением на наковальнях Бриджмена // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 67–70.
35. Красноперова Ю.Г., Воронова Л.М., Дегтярев М.В. и др. Рекристаллизация никеля при нагреве ниже температуры термоактивируемого зарождения // Физика металлов и металлообразование. 2015. Т. 116. № 1. С. 1–8.

PECULIARITIES OF STRUCTURE FORMATION OF STEEL CARBON WIRE OF PERLITE CLASS AFTER A COMBINED DEFORMATION PROCESSING

M. A. POLYAKOVA¹, HD (Tech), Dpt of materials processing technologies, m.polyakova@magtu.ru;
 K. NARASIMHAN², PhD, Dpt of metallurgical engineering and materials science, nara@iitb.ac.in;
 M. J. N. V. PRASAD², PhD, Dpt of metallurgical engineering and materials science;
 K. G. PIVOVAROVA¹, PhD (Tech), Dpt of materials processing technologies;
 A. E. GULIN¹, PhD (Tech), PhD (Tech), Dpt of materials processing technologies;
 YU. YU. EFIMOVA¹, PhD (Tech), Dpt of materials processing technologies
 (¹ Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Russia, Magnitogorsk;
² The Indian Institute of Technology Bombay (IIT Bombay), India, Powai, Mumbai)

Abstract. Creation of methods of metals and alloys deformation nanostructuring, which could be adapted into existing industrial plant by their technological parameters and productivity, is one of actual problems to be solved at present by researchers.

Description of a wire combined deformation processing by drawing with bending and twisting presented. Results of metallographic study of high-carbon wire of Stal 70 grade steel indicated specific peculiarities of influence of different kinds of plastic deformation combining on the steel structure. Mechanical tests of the wire after different kinds of combined processing showed, that such a processing provides combination of strength and ductility, typical for a steel with ultrafine grain structure. Using a method of differential scanning calorimetry, the stored energy value and calorimetric peak temperature value of deformed wire made of high-carbon Stal 70 steel determined. It was shown, that the stored energy value and calorimetric peak temperature value are sensitive to technological parameters of combined deformation processing change.

Key words: wire deformation processing; drawing with bending and twisting; sign-reversing bending; ultrafine grain structure; stored energy value.

For citation: Polyakova M.A., Narasimhan K., Prasad M. J. N.V., Pivovarova K.G., Gulin A.E., Efimova Yu.Yu. Peculiarities of structure formation of steel carbon wire of perlite class after a combined deformation processing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 10, pp. 74–81. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-10-71-81

REFERENCES

1. Bubnov V.A., Kostenko S.G. Mechanisms of austenite steels hardening at plastic deforming. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*, 2008, no. 6, pp. 63–70. (In Russ.).
2. Petrova L.G., Chudina O.V. Forecasting of metals and alloys hardening level based on structure formation control. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2007, no. 7, pp. 3–11. (In Russ.).
3. Kharitonov V.A., Ivantsov A.B., Kharitonov V.A. Processing of coiled rebar steel by route “tensile – sign-reversing bending” (theory, technology, equipment). *Metallurg*, 2010, no. 4, pp. 78–83. (In Russ.).
4. Bryukhanov A.A., Shkatulyak N.M., Rodman M., Shaper M., Usov V.V., Kloze Kh. Influence of d sign-reversing bending on texture, structure and mechanical properties of low-carbon steel sheets. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 11, pp. 19–24. (In Russ.).
5. Gul’ Yu.P., Perchyn G.I. Influence of cyclic deformation on properties cold-deformed low-carbon steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1990, no. 3, pp. 105–108. (In Russ.).
6. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Status and development directions of continuous methods of round wire nano-structuring. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2013, no. 3 (43), pp. 69–73. (In Russ.).
7. Kulisch W., Freudenstein R., Ruiz A. etc. Nanostructured marias 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.
8. Clement K., Iseli A., Karote D. etc. Nanostructured materials: industrial applications. *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*, 2012. pp. 265–306.
9. 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.
10. Noskova N., Mulyukov R. Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys. Ekaterinburg: Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003, 279 p.
11. Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G., Noskov S.E., Danilova Yu.V., Ryazanova A.A., Gulin A.E. *Perspektivnye napravleniya razvitiya metodov deformatsionnogo nanostrukturirovaniya. Deponirovannaya rukopis’* [Perspective directions of nano-structuring deformation methods developing. Deposited manuscript]. Moscow: VINITI, 2011, no. 302 – B 2011, 56 p. (In Russian, unpublished).
12. 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.

13. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. Innovation potential of new technologies of production of hardware products of nano-structural steels. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2009, no. 2, pp. 64–68. (In Russ.).
14. Sidel'nikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov* [Combined methods of non-ferrous metals and alloys processing]. Moscow: MAKSS Press, 2005, 344 p. (In Russ.).
15. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Drawing efficiency increasing based on combined processes application. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2016, no. 8, pp. 71–77. (In Russ.).
16. Kharitonov V.A., Taranin I.V. Comparative analysis of efficiency of combined methods of metal processing by pressure at wire production. *Stal'*, 2015, no. 1, pp. 61–64. (In Russ.).
17. Kharitonov V.A., Taranin I.V. Wire deformability increase by module and combined deformation methods application. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2016, no. 11, pp. 70–78. (In Russ.).
18. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Estimation of efficiency of drawing methods with twisting at UMZ-structure carbon wire production. *Pis'ma o materialakh*, 2016, vol. 6, no. 2 (22), pp. 116–121. (In Russ.).
19. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Influence of twisting at round wire drawing in a monolithic drawhead. *Modelirovanie i razvitiye protsessov OMD*, 2015, no. 21, pp. 82–88. (In Russ.).
20. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Estimation of efficiency of steel wire production by a combined method “rolling-drawing”. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2014, no. 12, pp. 15–21. (In Russ.).
21. Chukin M.V., Polyakova M.A., Golubchik E.M., Rudakov V.P., Noskov S.E., Gulin A.E. *Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh polufabrikatov volocheniem s krucheniem* [A method of ultrafine grain semi-finished product obtaining by drawing with twisting]. Patent RF no. 2467816. IPC B 21 C 1/04, B 21 C 1/00. *Byulleten' izobretenii*, 2012, no. 33. (In Russ.).
22. Polyakova M.A., Chukin M.V., Golubchik E.M., Gulin A.E. *Ustroistvo dlya izgotovleniya provoloki s ul'tramelkozernistoi strukturoi* [A facility for production of wire with ultrafine grain structure]. Patent RF no. 130525. IPC B 21 C 1/00. *Byulleten' izobretenii*, 2013, no. 21. (In Russ.).
23. Chukin M.V., Polyakova M.A., Golubchik E.M., Emaleeva D.G., Gulin A.E. *Ustroistvo dlya polucheniya dlinnomernykh zagotovok s ul'tramelkozernistoi strukturoi* [A facility for production of long bars with ultrafine grain structure]. Patent RF no. 159535. IPC B 21 C 3/02. *Byulleten' izobretenii*, 2016, no. 4. (In Russ.).
24. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulin A.E. Peculiarities of influence of different kinds of plastic deformation on microstructure refinement and mechanical properties of carbon steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 552–557. (In Russ.).
25. 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.
26. 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.
27. Chukin M.V., Polyakova M.A., Pivovarova K.G., Efimova Yu.Yu., Gulin A.E. Study of structure and some properties of grade 50 carbon steel wire at drawing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2018, no. 7, pp. 572–578. (In Russ.).
28. Polyakova M.A., Calliari I., Pivovarova K.G., Gulin A.E. Approach to obtaining medium carbon steel wire with a specified set of mechanical properties after combined deformational processing. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, vol. 36, pp. 53–59.
29. Polyakova M.A., Chukin M.V., Brunelli K., Efimova Yu.Yu., Golubchik E.M. Study of texture and microstructure formation in medium carbon steel wire submitted to combined deformation by drawing with bending and twisting. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, vol. 36, pp. 60–66.
30. Khemminger V., Khene G. *Kalorimetriya. Teoriya i praktika* [Calorimetry. Theory and practice]. Moscow: Khimiya, 1990, 176 p. (In Russ.).
31. Lotkov A.I., Baturin A.A., Grishkov V.N., Kopylov V.I. About possible role of crystal structure defects in mechanisms of grain structure nano fragmentation at intensive cold plastic deformation of metals and alloys. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2007, vol. 10, no. 3, pp. 64–79. (In Russ.).
32. Farber V.M. Input of diffusion processes in structure formation at intensive cold plastic deformation of metals. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 8, pp. 3–9. (In Russ.).
33. Zehetbauer M., Stilwe H.P., Vorhauer A., Schafler E., Kohout J. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation. *Nanomaterials by severe plastic deformation: fundamentals – processing – applications. Proc. 2nd International Conference*. Vienna: J. Wiley VCH Weinheim, 2004, pp. 435–446.
34. Korznikova E.A. Calorimetric study of copper under twisting deformation at Bridgemen anvils. *Pis'ma o materialakh*, 2012, vol. 2, no. 2 (6), pp. 67–70. (In Russ.).
35. Krasnoperova Yu.G., Voronova L.M., Degtyarev M.V. etc. Recrystallization of nickel at heating lower thermo-activated conception temperature. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, vol. 116, no. 1, pp. 1–8. (In Russ.).