

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ

А.Г. Корчунов, М.А. Полякова, А.Е. Гулин

На примере высокоуглеродистой проволоки диаметром 3,0 мм исследованы особенности изменения механических свойств и измельчения структурных составляющих в ходе реализации разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» совмещением деформаций растяжения, сжатия и кручения. Предложена система критериев для оценки эффективности разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки.

Ключевые слова: деформационное наноструктурирование, высокоуглеродистая проволока, параметры микроструктуры, механические свойства, критериальная оценка.

В настоящее время преимущества металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ), получаемой методами интенсивной пластической деформации (ИПД), не вызывают сомнений перед их крупнокристаллическими аналогами [1–8]. Однако промышленное внедрение методов ИПД сдерживается рядом факторов, среди которых наиболее существенными являются ограниченные габариты обрабатываемых заготовок, дискретность процессов, сложность применяемого оборудования и оснастки, несовместимость со скоростными и деформационными режимами технологических процессов металлургического и метизного производств [9]. 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.

На кафедре машиностроительных и металлургических технологий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» проводится комплекс исследований по конструированию нового метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки из высокоуглеродистых марок стали, основанного на совмещении волочения с другими методами деформационного воздействия. С одной стороны, необходимость проведения данных исследований обусловлена тем, что расширение рынка сбыта проволоки требует обеспечения такого сочетания прочностных и пластических свойств, которое достаточно сложно получить традиционными методами обработки. Поэтому с этой точки зрения формирование в проволоке ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры является единственным возможным вариантом. С другой стороны, при производстве проволоки основной операцией является волочение, которое, как известно, изучено теоретически и имеет хорошую техниче-

скую и технологическую оснащенность. Представляет практический интерес разработка такого метода деформационного наноструктурирования, который по своим скоростным параметрам совместим со скоростями волочения на действующем промышленном оборудовании.

При волочении основными деформациями, действующими на проволоку, являются деформации растяжения и сжатия. Поскольку для формирования УМЗ структуры металлов и сплавов необходимо воздействие деформаций сдвига на обрабатываемую заготовку, то рассматривается вариант совмещения волочения с процессом кручения. Это позволяет, с одной стороны, получать сложную схему напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой проволоке за счет совмещения деформаций растяжения, сжатия и кручения, с другой – в технологиях канатного производства существуют устройства, позволяющие реализовать данное деформационное воздействие. Была разработана установка, осуществляющая совмещение процесса волочения с процессом кручения. При этом проволока проходит между двумя волоками, между которыми установлено устройство, обеспечивающее ее кручение. На разработанный метод получен патент Российской Федерации на изобретение [10].

Была проведена серия экспериментов по изучению эффективности получения УМЗ структуры в проволоке в ходе данного метода деформационного наноструктурирования. В качестве объекта исследований была выбрана высокоуглеродистая проволока из стали марки 75 с исходным диаметром 3,05 мм, которая востребована на рынке металлопродукции. Диаметр первой волоки по ходу движения проволоки составлял 2,85 мм, относительное обжатие 12,68 %. Диаметр второй волоки по ходу движения проволоки составлял 2,73 мм, относительное обжатие 8,24 %.

В ходе проведения металлографического анализа микроструктуры проволоки после разрабо-

танного метода непрерывного деформационного наноструктурирования «волочение – кручение» (рис. 1, 2) выявлено изменение основных структурных составляющих (дробление цементитных пластин, уменьшение межпластиночного рас-

стояния в перлите), что свидетельствует о развитии процессов измельчения структурных составляющих стали с увеличением степени деформации кручением и формировании ультрамелкозернистой структуры [11, 12].

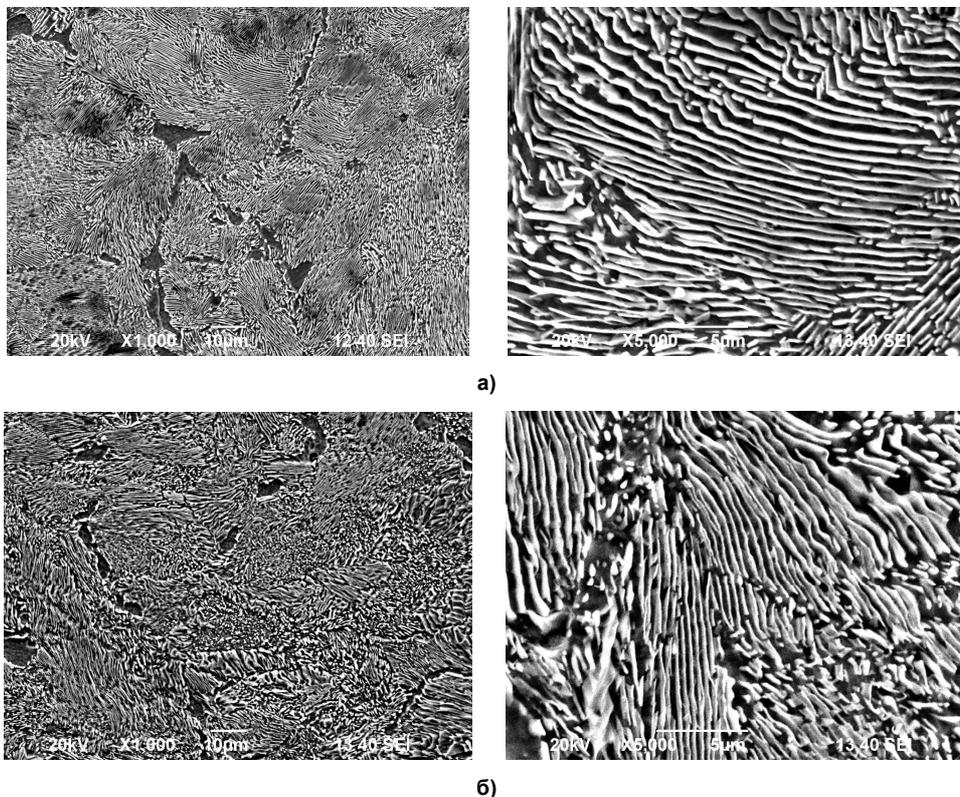


Рис. 1. Микроструктура высокоуглеродистой проволоки из стали марки 75 диаметром 3,05 мм в исходном состоянии (а) и после процесса деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» (б)

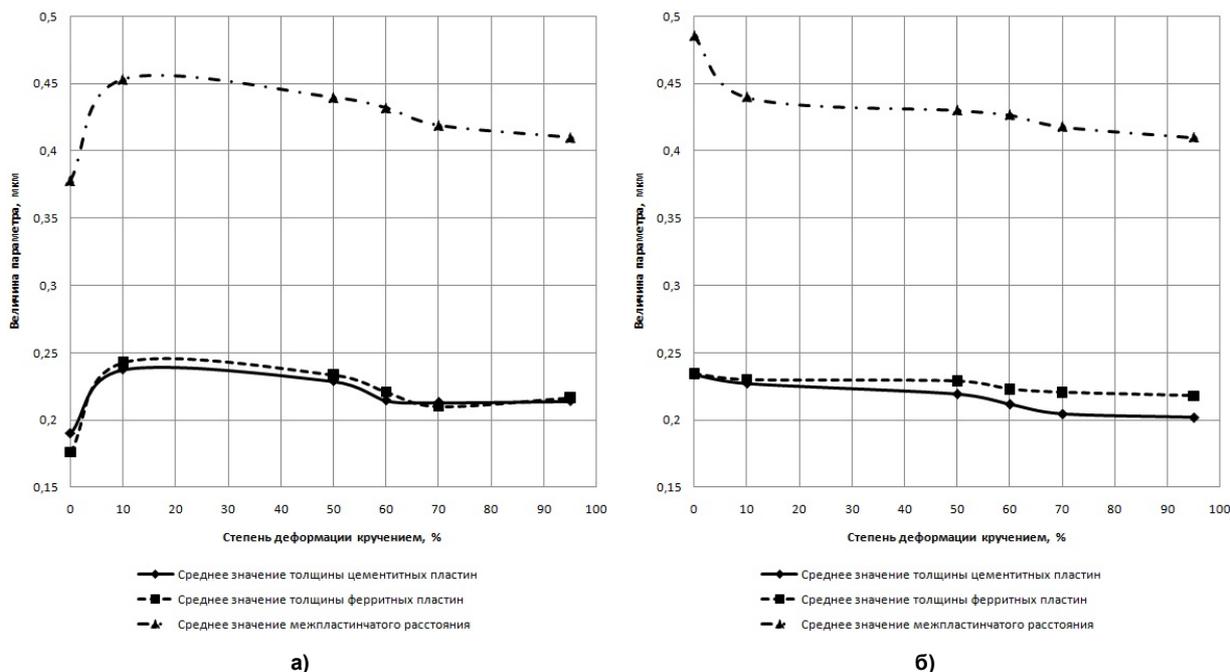


Рис. 2. Величина параметров микроструктуры проволоки из стали марки 75 после реализации метода деформационного наноструктурирования «кручение – волочение»: а – на поверхности; б – в центральной области

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния деформации кручения на механические свойства проволоки с УМЗ структурой, полученной в результате реализации разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования «кручение – волочение». Увеличение степени деформации кручением до 70 % не оказывает существенного влияния на уровень значений временного сопротивления разрыву. При увеличении степени деформации кручением происходит незначительное увеличение значений временного сопротивления разрыву, а затем его уменьшение. Характер изменения пластических свойств проволоки после деформационного наноструктурирования «волочение – кручение» свидетельствует о повышении ресурса пластичности стали при данном виде деформационного наноструктурирования.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении степени измельчения структурных составляющих высокоуглеродистой стали с возрастанием степени деформации кручением как на поверхности, так и в центральных областях проволоки. Это свидетельствует о равномерности получаемой структуры по сечению, а, значит, о стабильности механических свойств получаемой проволоки с УМЗ структурой.

Схема управления свойствами и УМЗ структурой проволоки из высокоуглеродистой стали в разработанном процессе деформационного наноструктурирования представлена на рис. 4 и включает четыре функциональных блока (блок входных переменных, объект управления, блок выходных переменных, блок сравнения и оценки), которые представлены в виде универсальных множеств.

Функциональный блок входных переменных включает:

- переменные, характеризующие показатели механических свойств стали в исходном состоянии

$X = (x_1, x_2)$, где $x_1 = \sigma_{во}$ – временное сопротивление разрыву, МПа; $x_2 = \psi_0$ – относительное сужение, %;

- управляющие переменные, характеризующие параметры управления процессом деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» $U = (u_1, u_2, \dots, u_5)$, где $u_1 = n$ – количество оборотов скручивающего устройства; $u_2 = \varepsilon_1$ – абсолютное обжатие в первой волоке, %; $u_3 = \varepsilon_2$ – абсолютное обжатие во второй волоке, %; $u_4 = V$ – скорость волочения проволоки, м/с; $u_5 = d$ – исходный диаметр проволоки, мм.

Функциональный блок объекта управления включает переменные состояния, характеризующие параметры микроструктуры обрабатываемой стали $Z = (z_1, z_2, z_3)$, где $z_1 = s$ – межпластиночное расстояние в перлите, мкм; $z_2 = h_{ц}$ – толщина цементитных пластин, мкм; $z_3 = h_{ф}$ – толщина ферритных пластин, мкм.

Функциональный блок выходных переменных включает переменные, характеризующие показатели механических свойств стали после осуществления процесса «кручение – волочение» $Y = (y_1, y_2)$, где $y_1 = \sigma_{в}$ – временное сопротивление разрыву, МПа; $y_2 = \psi$ – относительное сужение, %.

Функциональный блок сравнения и оценки включает:

- процедуру сравнения показателей механических свойств, полученные в результате деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» $Y = (y_1, y_2)$ с заданными показателями механических свойств $Y^3 = (y_1^3, y_2^3)$. Под заданными показателями механических свойств понимаются: временное сопротивление разрыву, относительное сужение;
- множество целевых функций, характеризующих эффективность управления процессом

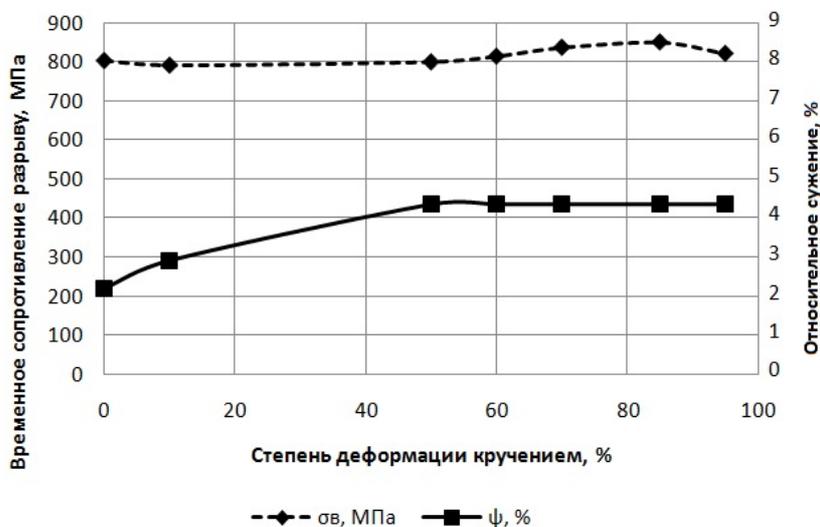


Рис. 3. Влияние степени деформации кручением на прочностные и пластические свойства проволоки из стали марки 75 после деформационного наноструктурирования «кручение – волочение»

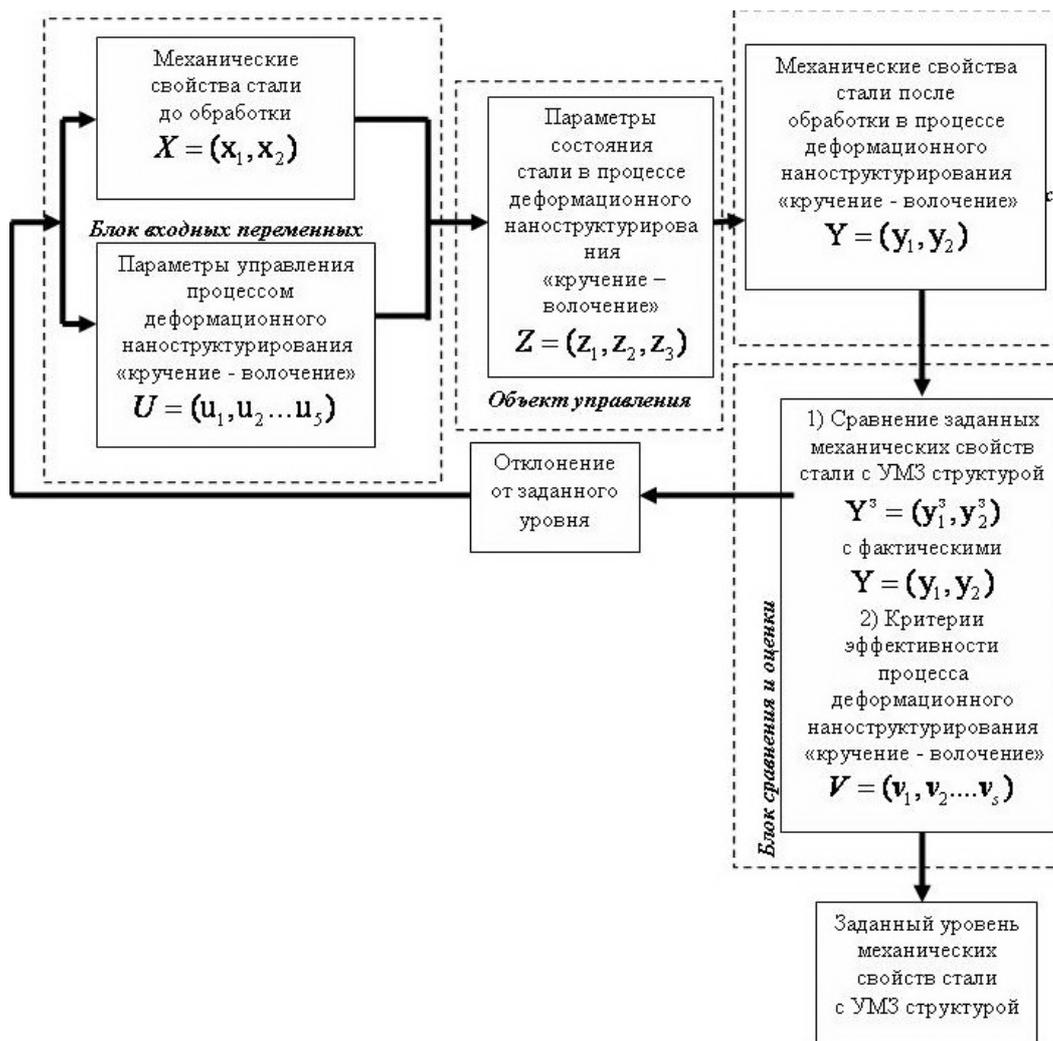


Рис. 4. Схема управления свойствами и структурой проволоки из высокоуглеродистой стали в процессе разработанного метода деформационного наноструктурирования «кручение – волочение»

деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» $V = (v_1, v_2, \dots, v_s)$, где s – общее количество критериев оценки эффективности управления процессом обработки, реализуемых в ходе исследований. Целевые функции выбираются таким образом, чтобы можно было достигнуть максимальной эффективности функционирования разрабатываемого метода.

Одним из подходов для оценки эффективности технологических процессов является использование системы критериев. Применительно к методам деформационного наноструктурирования это позволяет формализовать влияние различных технологических параметров процессов на формирование УМЗ структуры и определять такие режимы, которые обеспечивают достижение необходимого уровня механических свойств обрабатываемой заготовки [13–15].

Критерием, характеризующим эффективность изменения механических свойств, является относительное изменение показателя механического

свойства стали. Данный критерий формализуется в виде

$$K_y = \frac{y_i^m - y_{i-1}^m}{y_{i-1}^m} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $y_i^m - y_{i-1}^m$ – абсолютное изменение величины показателя механического свойства по переходам деформационного процесса; y_{i-1}^m – величина показателя механического свойства стали после $(n - 1)$ -го режима обработки; y_i^m – величина показателя механического свойства стали после n -го режима обработки; m – количество механических свойств стали; $i = 1 \dots n$ – режим обработки.

Интенсивное изменение (увеличение или снижение) показателя механического свойства от каждого предыдущего деформационного перехода к последующему свидетельствует об эффективности деформационной операции, поэтому эффективность деформационного воздействия накладывает требование максимизации данного критерия, а именно $K_y \rightarrow \max$.

Для значений временного сопротивления и относительного сужения после разрыва можно записать

$$K_{\sigma} = \frac{(\sigma_B)_i - (\sigma_B)_{i-1}}{(\sigma_B)_{i-1}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$K_{\delta} = \frac{\Psi_i - \Psi_{i-1}}{\Psi_{i-1}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву, МПа; Ψ – относительное сужение, %; $i = 1 \dots n$ – режим обработки.

В общем виде критериальное уравнение метода деформационного наноструктурирования «волочение – кручение» можно представить следующим образом

$$V = (K_{\sigma}, K_{\psi}). \quad (4)$$

На рис. 5 представлены результаты расчета критериев, характеризующих эффективность изменения механических свойств в ходе разработанного непрерывного метода деформационного наноструктурирования высокоуглеродистой проволоки.

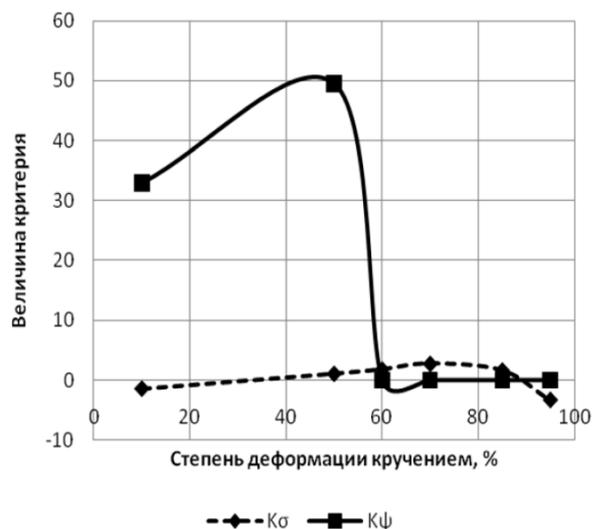


Рис. 5. Изменение величины критериев, характеризующих эффективность изменения механических свойств проволоки из стали марки 75 после процесса деформационного наноструктурирования «кручение – волочение»

При небольших степенях деформации кручением наблюдается незначительное разупрочнение стали (участок кривой K_{σ} ниже оси абсцисс). При увеличении деформации кручением величина относительного сужения увеличивается практически на 100 %. Далее при увеличении степени деформации кручением величина относительного сужения не изменяется, что соответствует горизонтальному участку кривой K_{ψ} . Таким образом, критериальная оценка влияния процесса деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» на уровень механических свойств проволоки позволяет выбрать как наиболее эффективный режим обра-

ботки с 75–80 % степени деформации кручением, так как при этом значения критериев K_{σ} и K_{ψ} достигают максимального значения. При степени деформации более 85 % происходит уменьшение значения критерия K_{σ} , что позволяет судить о нецелесообразности дальнейшего увеличения степени деформации кручением.

Критерии, характеризующие степень изменения структурных составляющих высокоуглеродистой конструкционной стали в ходе процесса деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» формализуются в следующем виде

$$K_z = \frac{z_{исх}^j}{z_i^j}, \quad (5)$$

где $z_{исх}^j$ – величина параметра микроструктуры стали в исходном состоянии; z_i^j – величина параметра микроструктуры стали после n -го режима деформационного наноструктурирования; $j = 1 \dots m$ – количество параметров структуры; $i = 1 \dots n$ – режим (степень деформации) деформационного наноструктурирования.

С увеличением степени деформации при любом методе ИПД происходит уменьшение величин параметров микроструктуры. Причем чем интенсивнее происходит это изменение, тем эффективнее идет процесс наноструктурирования, поэтому условием эффективности является $K_z \rightarrow \max$.

Для исследуемого процесса были рассчитаны значения критериев, характеризующих изменение толщины цементитных пластин ($K_{ц}$), толщины ферритных пластин ($K_{ф}$) и межпластинчатого расстояния (K_s). Критериальное уравнение метода деформационного наноструктурирования «кручение – волочение» имеет вид $V = (K_{\sigma}, K_{\psi}, K_{ф}, K_{ц}, K_s)$. Динамика изменения критериев, характеризующие степень изменения структурных составляющих высокоуглеродистой конструкционной стали в ходе разработанного процесса деформационного наноструктурирования, приведена на рис. 6.

Таким образом, в ходе разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования в высокоуглеродистой проволоке формируется УМЗ структура, в результате чего достигается сочетание высоких прочностных и пластических свойств. Показатели эффективности процесса (изменение значений механических свойств, уменьшение параметров микроструктуры) чувствительны к изменению технологических параметров процесса, прежде всего к степени деформации кручением. Обработка проволоки должна осуществляться таким образом, чтобы использование одного вида деформации не только не исключало целесообразность использования другого вида деформации, а, наоборот, способствовало взаимному усилению их влияния на выбранные показатели эффективности процесса.

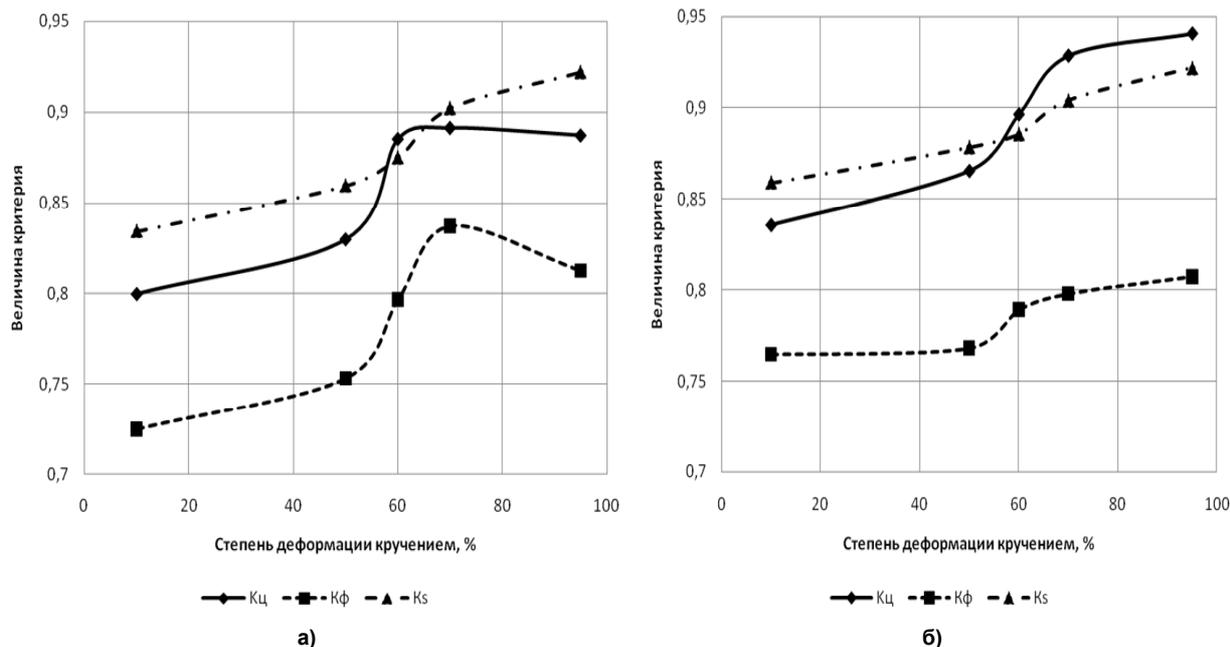


Рис. 6. Изменение значений критериев, характеризующих степень изменения структурных составляющих высокоуглеродистой конструкционной стали в ходе процесса

Работа проведена в рамках программы стратегического развития университета на 2012–2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0068 «Разработка фундаментальных принципов проектирования многостадийных процессов термомеханического наноструктурирования стальных заготовок большого диаметра».

Литература

1. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 186 с.
2. Андриевский, Р.А. Физика металлов и металловедение / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер. – 1999. – Т. 88, № 1. – С. 50–73.
3. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
4. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капусткина. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
5. Панин, В.Е. Металловедение и термическая обработка металлов / В.Е. Панин, А.В. Панин, 2006. – № 12. – С. 5–10.
6. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
7. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 440 с.

8. Gleiter, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / H. Gleiter // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48, no. 1. – P. 1–29.

9. Проблемы получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Д.Г. Емалева и др. // *Метиз*. – 2010. – № 8 (63). – С. 19–22.

10. Пат. 2467816 RU. МПК В21С 1/04, В21С 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.

11. Влияние знакопеременной деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры и механические свойства высокоуглеродистой проволоки / М.А. Полякова, А.Е. Гулин, Ю.Ю. Ефимова, О.А. Никитенко // *Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'12): тр. междунар. науч.-техн. конф.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 278–282.

12. Гулин, А.Е. Влияние схемы деформирования на формирование ультрамелкозернистой структуры в проволоке из углеродистой проволоки / А.Е. Гулин, М.А. Полякова // *Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: тез. докл. Открытой шк.-конф. стран СНГ. 8–12 окт. 2012 г., г. Уфа.* – Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. – С. 105.

13. Критериальная оценка эффективности процессов интенсивной пластической деформации с позиций их влияния на эволюцию структуры углеродистых сталей / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, О.А. Никитенко // *Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'10): тр.*

Международ. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 288–290.

14. *Criterion estimation of severe plastic deformation efficiency from the position of their influence on the carbon steel structures evolution / M.V. Chukin, N.V. Korceva, J.J. Efimova, O.A. Nikitenko // CIS Iron and Steel Review. – 2010. – P. 28–31.*

15. *Formalization control algorithm of carbonaceous nanostructured steels structure and properties with indetermined nature of material state parameters / M. Chukin, A. Korchunov, M. Polyakova et al. // METAL 2012. 21 International conference of metallurgy and materials. 23–25 May, 2012. Brno. Conference proceedings. – P. 151–156.*

Корчунов Алексей Георгиевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механического оборудования металлургических заводов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. Тел.: (3519)298451. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Полякова Марина Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных и металлургических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. Тел.: (3519)298481. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Гулин Александр Евгеньевич, аспирант кафедры машиностроительных и металлургических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. Тел.: (3519)298481. E-mail: walter_chel@mail.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Metallurgy”
2013, vol. 13, no. 1, pp. 122–128

ESTIMATION OF EFFECTIVENESS OF CONTINUOUS DEFORMATION NANOSTRUCTURING OF STEEL WIRE

A.G. Korchunov, M.A. Polyakova, A.E. Gulin

The paper describes peculiarities of change of mechanical characteristics and refinement of microstructure of 3.0 mm diameter high-carbon steel wire in course of the created method of continuous deformation nanostructuring “torsion – drawing” based on combining the tension, compression and torsion deformations. A system of criteria for estimation of effectiveness of this method is also proposed.

Keywords: deformation nanostructuring, high-carbon steel wire, microstructure parameters, mechanical characteristics, criterion estimate.

Korchunov Aleksey Georgievich, doctor of engineering science, associate professor, head of the Mechanical Equipment of Metallurgical Plants Department, Magnitogorsk State Technical University Named After G.I. Nosov. 38 Lenin street, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia 455000. Tel.: 7(3519)298451. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Polyakova Marina Andreevna, candidate of engineering science, associate professor of the Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies Department, Magnitogorsk State Technical University Named After G.I. Nosov. 38 Lenin street, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia 455000. Tel.: 7(3519)298481. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Gulin Aleksandr Evgen'evich, post-graduate student of the Mechanical Engineering and Metallurgical Technologies Department, Magnitogorsk State Technical University Named After G.I. Nosov. 38 Lenin street, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia 455000. Tel.: 7(3519)298481. E-mail: walter_chel@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.