

УДК 621.771.252:620.17

## О ВЛИЯНИИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ИЗГИБА, СОВМЕЩЕННОГО С РАСТЯЖЕНИЕМ, НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУНТОВОГО ПРОКАТА

ПАРУСОВ Э. В.<sup>1\*</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
СЫЧКОВ А. Б.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
ГУБЕНКО С. И.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
РАЗДОБРЕЕВ В. Г.<sup>4</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
ПАЛАМАРЬ Д. Г.<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Отдел термической обработки металла для машиностроения, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49107, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Кафедра литейного производства и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, пр. Ленина, 38, Магнитогорск, 455000, Россия, +7(919) 348-66-84, e-mail: [absychkov@mail.ru](mailto:absychkov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>4</sup> Отдел процессов и машин обработки металлов давлением, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49107, Украина, тел. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [v\\_razdobreev@ukr.net](mailto:v_razdobreev@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-7402-7992

<sup>5</sup> Отдел процессов и машин обработки металлов давлением, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49107, Украина, тел. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [damjan@i.ua](mailto:damjan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-9503-3248

**Аннотация. Постановка проблемы.** Анализ литературных данных показывает эффективность совмещения различных способов деформирования с целью формирования сложного напряженно-деформированного состояния в металлопрокате. Применение сложных схем напряженно-деформированного состояния при пластической деформации обеспечивает формирование благоприятной субструктуры деформированных металлов и сплавов, что позволяет в широком диапазоне влиять на изменение механических свойств. **Цель работы** – определение закономерностей изменения механических свойств бунтового проката, предварительно подвергнутого холодной пластической деформации (калибровке) волочением, при обработке, включающей знакопеременный изгиб и растяжение. **Результаты.** Установлены закономерности изменения прочностных и пластических показателей бунтового проката из сталей С7Д и С70Д после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, после предварительной холодной пластической деформации (калибровки) волочением. Результаты исследований позволяют утверждать, что в основе процессов разупрочнения при сложноподвижной схеме деформации, включающей знакопеременный изгиб и растяжение в области малых пластических деформаций, происходит трансформация дислокационной субструктуры металла, сопровождаемая снижением плотности дислокаций, а снижение прочностных и рост пластических показателей металла можно рассматривать как возможность разработки дополнительного способа разупрочняющей технологии производства холоднодеформированного проката различного назначения, не связанной с термической обработкой.

**Ключевые слова:** бунтовый прокат; напряженно-деформированное состояние; механические свойства; термическая обработка; знакопеременный изгиб

## ПРО ВПЛИВ ЗНАКОЗМІННОГО ВИГІНУ, ПОЄДНАНОГО З РОЗТЯГОМ, НА ЗМІНУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БУНТОВОГО ПРОКАТУ

ПАРУСОВ Е. В.<sup>1\*</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
СИЧКОВ О. Б.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
ГУБЕНКО С. І.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
РАЗДОБРЄЄВ В. Г.<sup>4</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
ПАЛАМАР Д. Г.<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Кафедра ливарного виробництва і матеріалознавства, Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова, пр. Леніна, 38, Магнітогорськ, 455000, Росія, тел. +7 (919) 348-66-84, e-mail: [absychkov@mail.ru](mailto:absychkov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>4</sup> Відділ процесів і машин обробки металів тиском, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [v\\_razdobreev@ukr.net](mailto:v_razdobreev@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-7402-7992

<sup>5</sup> Відділ процесів і машин обробки металів тиском, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [damjan@i.ua](mailto:damjan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-9503-3248

**Анотація. Постановка проблеми.** Аналіз літературних даних показує ефективність поєднання різних способів деформування з метою формування складного напружено-деформованого стану в металопрокаті. Застосування складних схем напружено-деформованого стану під час пластичної деформації забезпечує формування сприятливої субструктури деформованих металів і сплавів, що дозволяє в широкому діапазоні впливати на зміну механічних властивостей. **Мета роботи** – визначення закономірностей зміни механічних властивостей бунтового прокату, попередньо підданого холодній пластичній деформації (калібруванню) волочінням, під час обробки, яка включає знакозмінний вигин і розтягнення. **Результати.** Встановлено закономірності зміни характеристик міцності і пластичних показників бунтового прокату із сталей С7Д і С70Д після обробки, яка включає знакозмінний вигин і розтягнення, після попередньої холодної пластичної деформації (калібрування) волочінням. Результати досліджень дозволяють стверджувати, що в основі процесів зменшення за складнонапруженою схемою деформації, яка включає знакозмінний вигин і розтягнення в області малих пластичних деформацій, відбувається трансформація дислокаційної субструктури металу, супроводжувана зниженням щільності дислокацій, а зниження показників міцності і зростання пластичних показників металу можна розглядати як можливість розроблення додаткового способу зменшувальної технології виробництва холоднодеформованого прокату різноманітного призначення, не пов'язаної з термічною обробкою.

*Ключові слова:* бунтовий прокат; напружено-деформований стан; механічні властивості; термічна обробка; знакозмінний вигин

## ON THE INFLUENCE OF AN ALTERNATING BENDING COMBINED WITH THE STRETCHING ON THE CHANGE OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE ROLLED STEEL

PARUSOV E.V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,  
SYCHKOV A.B.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
GUBENKO S.I.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
RAZDOBREEV V.G.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,  
PALAMAR D.G.<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Department metal heat treatment for mechanical engineering, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Academic Starodubov area, 1, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

<sup>2</sup> Department of foundry and materials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Lenin Avenue, 38, Magnitogorsk, 455000, Russia, tel. +7 (919) 348-66-84, e-mail: [absychkov@mail.ru](mailto:absychkov@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-0886-1601

<sup>3</sup> Department of material science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>4</sup> Department of processes and machines for metal forming, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Academic Starodubov area, 1, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [v\\_razdobreev@ukr.net](mailto:v_razdobreev@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-7402-7992

<sup>5</sup> Department of processes and machines for metal forming, Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Academic Starodubov area, 1, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-30, e-mail: [damjan@i.ua](mailto:damjan@i.ua), ORCID ID: 0000-0002-9503-3248

**Abstract. Issues statement.** The analysis of literature data shows the effectiveness of combining various deformation methods with the aim of forming a complex stress-strain state in a rolled metal product. The use of complex schemes of stress-strain state during plastic deformation provides the formation of a favorable substructure of deformed metals and alloys, which allows a wide range to influence the change in mechanical properties. **Purpose.** Determination of the regularities of the change in the mechanical properties of rolled steel, previously subjected to cold plastic deformation (calibration) by drawing, during processing, including alternating bending and stretching. **Results.** The regularities of the change in the strength and plastic parameters of rolled steel from C7D and C70D steels have been established, after the treatment, including alternating bending and stretching, after preliminary cold plastic deformation (calibration) by drawing. The results of research allow us to assert that the softening process under a complex stress strain scheme involving alternating bending and stretching in the region of small plastic deformations transforms the

dislocation substructure of the metal which is accompanied by a decrease in the density of dislocations, and the decrease in strength and the growth of the plastic indices of the metal can be regarded as an opportunity to develop an additional method for softening the technology for the production of cold-formed rolled products for various purposes that are not related to heat treatment.

*Keywords:* rolled steel; stress-strain state; mechanical properties; heat treatment; alternating bending

### Введение

В последнее время активно развиваются способы пластической деформации, которые связаны с применением сложных схем напряженно-деформированного состояния, различных комбинированных воздействий. Это обеспечивает измельчение зеренной структуры и формирование благоприятной субструктуры деформированных металлов и сплавов, что позволяет в широком диапазоне влиять на изменение механических свойств [1–7]. Авторы работ [3–5] показали эффективность совмещения различных способов деформирования с целью формирования сложного напряженно-деформированного состояния в металлопрокате. В работе [6] исследовано влияние деформации, сочетающей изгиб и растяжение, на изменение структуры и свойств холоднокатаного листового проката из низкоуглеродистой стали, подвергнутой предварительному деформированию прокаткой со степенью деформации 20 %.

Такая обработка приводит к монотонному снижению предела текучести и временного сопротивления разрыву в среднем до 20 % при одновременном повышении относительного удлинения в 1,5...2 раза. При этом фиксировалось одновременное уменьшение плотности дефектов кристаллического строения, зафиксированных при первоначальном нагружении, а также изменение их распределения. Увеличение числа циклов (более четырех) сопровождалось разупрочнением холоднодеформированной стали, что связано с ростом объемной доли указанных областей с пониженным уровнем прочностных характеристик [6; 8].

Следует отметить, что рассматриваемые эффекты наблюдались в стали, в которой произошел определенный этап формирования ячеистой дислокационной субструктуры.

В работе [9] исследованы структурные изменения в прокате после холодной деформации (волочения) со сдвиговыми волокнами. Показано, что такая обработка уменьшает анизотропию зерен, а их размер снижается с повышением степени деформации. Однако на определенных этапах наблюдается поочередное изменение (уменьшение / увеличение) размеров зерна, которое авторы связывают с развитием конкурирующих процессов фрагментации и динамической полигонизации структуры металла.

Близкие результаты получены при исследовании изменения дислокационной субструктуры бериллия в условиях циклической разнонаправленной

деформации и квазигидростатического сжатия [10]. Показано, что механические свойства деформированного бериллия определяются, в первую очередь, характером формирования дислокационной субструктуры металла. В работах [3–5; 11–13] выполнены исследования влияния комбинирования волочения с деформациями изгиба на изменение структуры и свойств холоднотянутой проволоки. Показано, что при волочении металла в двух последовательно расположенных конических монолитных волокнах с одновременным приложением сдвиговых напряжений за счет кручения возможно реализовать сложную схему напряженно-деформированного состояния обрабатываемого металла.

Такая схема приложения нагрузки вызывает поворот зерен и их вытяжку. В результате этого происходит дополнительный сдвиг зерен близкой ориентации и их измельчение. Фактором, который повышает интенсивность пластической деформации, является знакопеременный изгиб в процессе вращения деформируемого металла в зоне между волокнами.

При повышении скорости вращения преформатора и увеличении степени деформации кручением происходит формирование сверхмелкого зерна в структуре высокоуглеродистой стали, а размер перлитных колоний в проволочной заготовке уменьшается от 64 до 13 мкм. После такой обработки в стали происходит рост пластических характеристик при одновременном повышении временного сопротивления разрыву и предела текучести. Необходимо понимать, что использование разнообразных комбинированных способов деформационного воздействия вызывает формирование различной структуры в поперечном сечении металла.

Анализ литературных данных позволяет утверждать, что в основе процессов разупрочнения холоднодеформированных сталей при обработке, сочетающей знакопеременный изгиб с растяжением в области малых пластических деформаций, лежат различные процессы трансформации дислокационной субструктуры металла. Однако эффект от использования комбинированной обработки, которая включает знакопеременный изгиб и растяжение, достигается лишь в том случае, когда металл предварительно подвергнут холодной пластической деформации.

**Цель работы** – определение закономерностей изменения механических свойств бунтового проката, предварительно подвергнутого холодной пластической деформации (калибровке) волочением,

при обработке, включающей знакопеременный изгиб и растяжение.

### Материал и методика исследований

Исследования проведены на промышленных партиях калиброванного бунтового проката из сталей С7Д и С70Д, химический состав которых соответствовал требованиям стандарта EN 16120-2:2011 «Бунтовой прокат из нелегированной стали для передела в проволоку». Используемое оборудование: световой оптический микроскоп «Axiovert 200 M MAT», трансмиссионный электронный микроскоп «JEOL JEM-100CX», универсальная разрывная машина «TTDM Instron», волочильный стан SKET UDZSA-2500/6, роликовые устройства для обработки проката.

При проведении исследований по влиянию обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, на изменение механических свойств бунтового проката, использовали стандартное оборудование технологической линии, предназначенной для волочения, а в качестве деформирующего инструмента – устройство знакопеременной деформации металла с горизонтальным и вертикальным расположением роликов (двухплоскостное устройство), схема конструкции которого приведена на рисунке 1. Оно состоит из жестко закрепленного металлического основания, на котором установлены ролики диаметром 40,0...60,0 мм (по пять штук в горизонтальном и в вертикальном положениях соответственно). Из них шесть роликов закреплены неподвижно (опорные), а остальные (нажимные) могут перемещаться в поперечном направлении основания и фиксироваться с помощью регулировочных винтов. Ролики установлены на подшипниках и приводятся во вращение проходящим через них прокатом, что позволяет устанавливать необходимое натяжение и регулировать степень деформации в зависимости от исходного профилеразмера и марки стали.

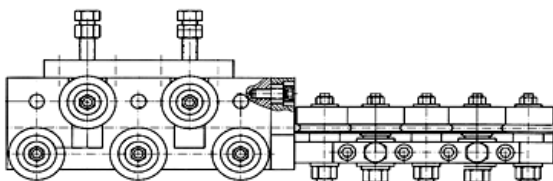


Рис. 1. Схема конструкции двухплоскостного устройства для знакопеременного изгиба калиброванного проката / Fig. 1. Scheme of the construction of a two-plane device for alternating bending of calibrated rolled steel

В качестве альтернативного деформирующего устройства калиброванного проката использовали

промышленное устройство (окалиноломатель) в составе волочильного стана SKET UDZSA 2500/6, схематическое изображение которого представлено на рисунке 2. Вал рабочего колеса этого устройства закреплен в подшипниковом узле, расположенном в станине. Четыре ролика закреплены на станине и два на рабочем колесе. Ролики установлены на подшипниках и приводятся во вращение проходящим через них прокатом. Степень холодной деформации зависит от изгиба проката относительно роликов, установленных на рабочем колесе, и определяется его поворотом относительно оси вращения. С целью снижения усилия поворота рабочего колеса устройство знакопеременной деформации снабжено редуктором. Фиксация положения рабочего колеса производится с помощью механизма, представляющего собой подпружиненный палец, установленный на станине и входящий в отверстия рабочего колеса. Для смотки проката использовали намоточный аппарат производства компании SKET, который предназначен для протягивания обрабатываемого металла через устройства линии холодной деформации.

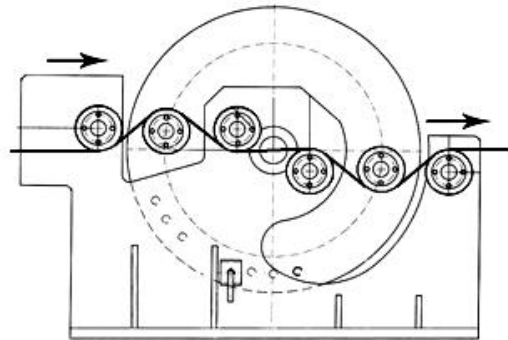


Рис. 2. Схема конструкции устройства (окалиноломателя) знакопеременного изгиба калиброванного проката (стрелками указано направление передвижения проката) / Fig. 2. Scheme of the construction of the device (mechanical descaling machine) of the alternating bending of the calibrated rolled steel (the arrows indicate the direction of rolling movement)

Механические свойства проката до и после проведения обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, выполняли в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение».

Химический состав и механические свойства калиброванного проката из сталей С7Д ( $\varnothing$  6,5  $\rightarrow$  6,0 мм) и С70Д ( $\varnothing$  6,5  $\rightarrow$  5,7 мм;  $\varnothing$  5,5  $\rightarrow$   $\varnothing$  5,1 мм) приведены в таблицах 1–3.

Таблиця 1

**Химический состав и механические свойства калиброванного проката диаметром 6,0 мм из стали C7D /  
Chemical composition and mechanical properties of calibrated rolled steel with a diameter of 6,0 mm  
made of C7D**

Химический состав, % масс.					Механические свойства				
C	Mn	Si	S	P	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\delta_{10}$ , %	$\psi$ , %
0,09	0,42	0,028	0,023	0,010	471	522	17,4	2,47	63

Таблиця 2

**Химический состав калиброванного проката из стали C70D / The chemical composition of the  
calibrated rolled steel made of C70D**

Диаметр проката, мм	Химический состав стали, % масс.					
	C	Mn	Si	Cr	S	P
5,1	0,72	0,65	0,20	0,02	0,015	0,022
5,7	0,72	0,64	0,19	0,02	0,015	0,022

Таблиця 3

**Механические свойства калиброванного проката из стали C70D / Mechanical properties of calibrated rolled  
steel made of C70D**

Диаметр проката, мм	Механические свойства			
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
5,1	1201	768	14,0	43,4
5,7	1170	769	11,7	30,0

### Результаты исследований и их обсуждение

Исследование микроструктуры калиброванного проката показало, что она преимущественно состоит из сорбитообразного перлита, отличие по содержанию избыточной фазы (структурного свободного феррита) незначительно и в среднем не превышает 7 % (рис. 3).

Обработку калиброванного проката, включающую знакопеременный изгиб и растяжение, выполняли в устройстве, состоящем из десяти роликов (рис. 1). Материал роликов – сталь марки 40X; диаметр роликов – 60 мм; расстояние между осями опорных роликов по «горизонтали» 105,0 мм. Необходимое тяговое усилие обеспечивал намоточный аппарат, входящий в состав волочильного стана SKET UDZSA 2500/6. Ввиду незначительной скорости протяжки проката нагрев металла компенсировался охлаждением на воздухе и

проявлялся незначительно. При проведении экспериментов изменяли количество задействованных роликов и величину перемещения центра нажимных роликов. По результатам экспериментов рассчитывали накопленные степени относительной деформации ( $\epsilon_\Sigma$ ) и определяли механические свойства проката после проведения указанной обработки.

Для проката диаметром 5,1 мм были выполнены две серии экспериментов: в первой серии (п. № 1...4) последовательно увеличивали количество роликов – от 3 до 10. При этом первые пять роликов располагались в горизонтальной плоскости, а остальные пять были повернуты на 90° относительно первых пяти роликов, т. е. в вертикальной плоскости. Величина перемещения центра используемых нажимных роликов ( $S$ ) для всех режимов обработки составляла 8,0 мм.



а



б (b)

Рис. 3. Микроструктура в поперечном сечении калиброванного проката из стали C70D: а – диаметр 5,1 мм; б – диаметр 5,7 мм / Fig. 3. Microstructure in cross-section of calibrated rolled steel made of C70D: a – diameter of 5,1 mm; b – diameter of 5,7 mm

Во второй серии экспериментов (п. № 5...7) калиброванный прокат протягивали через шесть роликов – три ролика в горизонтальной плоскости (один нажимной и два опорных) и три ролика в вертикальной плоскости (один нажимной и два опорных), при этом изменяли величину перемещения центра нажимного ролика на 8,0, 12,0 и 15,0 мм. Скорость намотки проката диаметром 5,1 мм для

первой и второй серии экспериментов была постоянной и составляла ~ 9,3 м/мин.

Расчитанные степени накопленной относительной деформации и механические свойства проката диаметром 5,1 мм, подвергнутого знакопеременному изгибу с растяжением, приведены в таблице 4.

Таблица 4

**Режимы обработки, включающие знакопеременный изгиб с растяжением, и механические свойства проката диаметром 5,1 мм из стали C70D / Processing modes, including alternating bending with stretching, and mechanical properties of rolled steel with a diameter of 5,1 mm made of C70D**

№ п/п	Режим обработки		S, мм	$\epsilon_{\Sigma}$	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
	Количество роликов, шт.							
	горизонт.	вертик.						
1	3	–	8	0,070	1 199	721	14,0	43,4
					1 196	792	14,0	43,4
2	5	–	8	0,134	1 199	803	14,3	43,4
					1 199	762	14,0	44,9
					1 199	752	14,0	44,9
3	5	2	8	0,204	1 196	793	13,7	44,7
					1 199	789	13,7	46,1
					1 204	828	13,7	44,7
4	5	5	8	0,274	1 204	764	14,0	44,9
					1 205	772	14,0	44,9
					1 205	732	14,0	43,4
5	3	3	8	0,140	1 203	789	14,0	43,4
					1 205	784	14,0	43,4
					1 203	793	14,0	43,4
6	3	3	12	0,150	1 201	766	14,0	43,6
					1 206	759	14,0	43,6
					1 206	766	14,0	43,6
7	3	3	15	0,160	1 211	771	13,3	46,6
					1 211	765	13,3	43,6
					1 201	759	13,3	45,1

Для калиброванного проката диаметром 5,7 мм были также проведены две серии экспериментов. В первой серии (п. № 8...11) обработку выполняли с использованием трех роликов (два опорных и один нажимной), расположенных в горизонтальной плоскости, величина перемещения центра нажимного ролика изменялась на 2,0; 4,0; 6,0 и 8,0 мм, а во второй серии (п. № 12...15) с использованием шести роликов – три ролика в горизонтальной плоскости (один нажимной и два опорных) и три ролика в вертикальной плоскости (один нажимной и два опорных), величину перемещения центра нажимного ролика изменяли на 2,0; 4,0; 6,0 и 8,0 мм. Скорость намотки проволоочной заготовки диаметром 5,7 мм для всех экспериментов составляла ~ 11,0 м/мин. Расчитанные степени накопленной относительной деформации и механические свойства проката диаметром 5,7 мм, подвергнутого знакопеременному изгибу с растяжением, приведены в таблице 5.

На рисунке 4 приведено изменение механических свойств калиброванного проката, подвергнутого знакопеременному изгибу с растяжением, по отношению к исходным значениям в зависимости от

накопленной степени деформации. Повышение накопленной степени деформации в исследованных диапазонах показало незначительное ее влияние на временное сопротивление разрыву. Несколько больше это влияние проявляется для предела текучести. Полученные результаты свидетельствуют о цикличном характере изменения пластических показателей проволоочной заготовки по мере повышения степени деформации. Максимальные значения относительного удлинения соответствуют степени деформации 0,07...0,10 и 0,27 %, а относительного сужения – 0,20 %. Необходимо отметить, что для проката диаметром 5,7 мм после обработки наблюдается несколько больший разброс значений пластических характеристик ( $\delta_5$ ,  $\psi$ ), что, очевидно, связано с проявлением масштабного фактора. При этом микроструктура металла после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, осталась неизменной.

Дальнейшие исследования влияния обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, на изменение механических свойств, а также тонкую структуру металла были проведены на

калиброванном прокате диаметром 6,0 мм из стали С7D.

Таблица 5

**Режимы обработки, включающие знакопеременный изгиб с растяжением, и механические свойства проката диаметром 5,7 мм из стали С70D / Processing modes, including alternating bending with stretching, and mechanical properties of rolled steel with a diameter of 5,7 mm made of С70D**

№ п/п	Режим обработки		S, мм	$\varepsilon_{\Sigma}$	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
	Количество роликов, шт.							
	горизонт.	вертик.						
8	3	–	2	0,095	1 172	783	12,3	25,6
					1 201	819	12,3	25,6
					1 186	796	12,7	28,6
9	3	–	4	0,096	1 159	786	11,0	28,6
					1 182	816	12,7	28,6
					1 175	800	12,7	31,0
10	3	–	6	0,097	1 197	793	–	29,1
					1 189	789	11,0	25,6
					1 197	814	12,0	29,1
11	3	–	8	0,098	1 200	779	11,0	29,1
					1 199	789	11,0	28,6
					1 166	799	–	29,1
12	3	3	2	0,190	1 198	773	11,7	34,8
					1 204	795	11,7	29,1
					1 197	775	12,7	32,0
13	3	3	4	0,192	1 189	783	11,7	29,1
					1 162	769	12,0	34,8
					1 198	799	11,7	32,0
14	3	3	6	0,194	1 181	781	11,7	34,8
					1 204	789	11,7	32,0
					1 197	789	10,3	34,8
15	3	3	8	0,195	1 185	791	11,0	29,1
					1 177	799	11,3	32,0
					1 197	795	14,0	29,1

Прокат из стали С7D подвергали обработке по различным режимам: 1 – протяжка через двухплоскостное устройство с тремя горизонтальными и тремя вертикальными роликами (диаметр роликов 60 мм, межосевое расстояние по «горизонтали» 105,0 мм, величина перемещения центра используемых нажимных роликов 8,0 мм); 2 – протяжка через одноплоскостное (окалиноломатель) устройство, имеющее шесть роликов (диаметр роликов 150,0 мм, максимальный угол поворота рабочего колеса – 90°, расстояние между осями роликов по «горизонтали» 200,0 мм); 3 – протяжка через одноплоскостное устройство, имеющее шесть роликов (диаметр роликов 150,0 мм, максимальный угол поворота рабочего колеса – 90°, расстояние между осями роликов по «горизонтали» 200,0 мм) и устройство знакопеременной деформации металла с тремя горизонтальными роликами (диаметр роликов 60,0 мм, расстояние между осями роликов по «горизонтали» 105,0 мм, величина перемещения центра используемых нажимных роликов 8,0 мм); 4 – протяжка через одноплоскостное устройство, имеющее шесть роликов (диаметр роликов 150,0 мм, максимальный угол поворота рабочего колеса – 90°, расстояние между осями роликов по «горизонтали» 200,0 мм) и устройство с тремя горизонтальными и тремя

вертикальными роликами (диаметр роликов 60,0 мм; расстояние между осями роликов по «горизонтали» 105,0 мм; величина перемещения центра используемых нажимных роликов 8,0 мм).

Скорость протяжки заготовки по режимам № 1...4 составила ~ 6 м/мин. Накопленная степень деформации и механические свойства проката в зависимости от режима обработки представлены в таблице 6.

Представленные данные свидетельствуют о том, что при повышении диаметра роликов в процессе обработки калиброванного проката одного и того же диаметра уменьшается относительная степень деформации за проход (режимы № 1 и 2). Использование проката разных профила размеров при одном и том же диаметре роликов приводит к повышению относительной степени деформации с одновременным ростом силы протяжки в процессе обработки металла через устройство знакопеременного изгиба.

Изменение механических свойств проката, подвергнутого знакопеременному изгибу с растяжением, по отношению к исходным значениям показано на рисунке 5. Максимальные значения равномерного удлинения соответствуют степеням деформации 0,05 и 0,20 % (для стали С70D 0,07...0,1 и 0,27 %), а относительного сужения – одной области 0,15...0,20 % (для стали С70D 0,20 %).

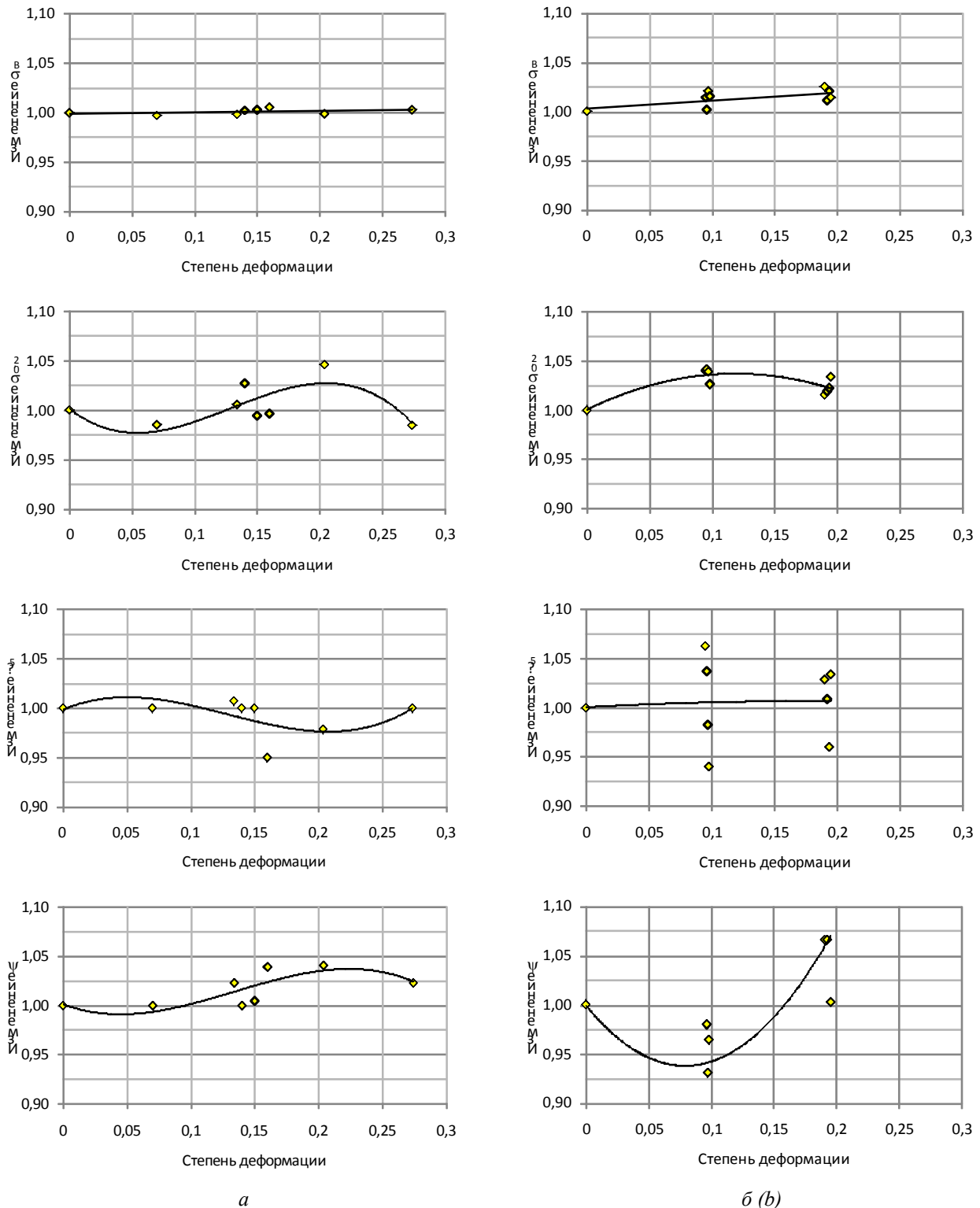


Рис. 4. Изменение механических свойств проката из стали C70D по отношению к исходному состоянию в зависимости от накопленной степени деформации после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение: а – диаметр 5,1 мм; б – диаметр 5,7 мм / Fig. 4. Change of mechanical properties of rolled steel from C70D steel with respect to the initial state, depending on the accumulated degree of deformation after treatment, including alternating bending and stretching: а – diameter of 5,1 mm; б – diameter of 5,7 mm



Таблиця 6

**Механические свойства калиброванного проката диаметром 6,0 мм из стали С7Д после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение / Mechanical properties of the calibrated rolled steel with a diameter of 6,0 mm from С7D steel after treatment, including alternating bending and stretching**

№ режима	$\varepsilon_{\Sigma}$	Механические свойства				
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\delta_{10}$ , %	$\psi$ , %
1	0,164	503	474	18,8	1,8	64,4
		506	474	16,3	4,0	65,8
		504	469	19,7	3,5	67,3
2	0,044	519	465	17,8	3,3	61,9
		515	468	18,8	3,8	63,5
		513	470	17,5	3,0	59,7
3	0,126	511	472	17,5	1,8	61,1
		503	472	18,2	3,8	63,8
		498	466	16,3	1,3	64,3
4	0,208	498	473	18,3	3,5	65,9
		498	476	17,8	2,8	63,9
		498	476	19,3	3,8	64,9

Известно, что величины сопротивления малым пластическим деформациям предварительно деформированного металла ниже, если направление последующего деформирования не совпадает с первоначальным [14]. Величина указанного эффекта оценивается по различным характеристикам и определяется многими факторами. К главным из них следует отнести кристаллографическую направленность приложения деформирующего напряжения [15], величины предварительной и последующей пластической деформации, температуру нагружения, размер зерна, объемные доли фаз, их морфологию и т. д. По сравнению с однонаправленным нагружением, изменение знака деформации сопровождается снижением напряжения течения области микротекучести и ростом параметров деформационного упрочнения [15; 16].

Экспериментальные данные, свидетельствующие о снижении прочностных и росте пластических свойств при знакопеременной деформации, можно рассматривать как дополнительное доказательство возможности разработки разупрочняющей нетермической технологии производства холоднодеформированного проката. В целом по внешним признакам проявление влияния обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, подобно развитию эффекта Баушингера. Однако, в отличие от эффекта Баушингера, эта обработка приводит, наряду с изменением сопротивления малым пластическим деформациям, к снижению временного сопротивления разрыву. В данном случае не только изменяется знак и вид деформации по сравнению с исходным состоянием, но и происходит деформация металла растяжением, которая обычно вызывает его упрочнение. По данным работы [18], при подобной обработке низкоуглеродистых сталей происходит монотонное снижение предела текучести на величину не менее 10 %, а относительное удлинение возрастает не менее чем в 1,3...1,5 раза.

Металлографические исследования на световом оптическом микроскопе, так же как и для стали

С70D, не выявили заметных изменений в структуре образцов стали С7D, подвергнутой обработке, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, что хорошо согласуется с данными, приведенными в работах [15; 17]. Вместе с тем только после нескольких десятков (10...50) циклов появляется тенденция к росту степени дисперсности и вытянутости зерен ферритной структуры [16; 19].

Холодная пластическая деформация указанным способом, как показали исследования, сопровождается повышением плотности дислокаций, а также совершенствованием текстуры металла. Прогрессирующему повышению плотности дефектов кристаллического строения, росту уровня прочностных свойств со степенью обжатия при волочении соответствует вполне закономерное снижение указанных характеристик в случае проведения указанной обработки.

Ввиду того, что тонкая структура деформированного металла оказывает существенное влияние на формирование механических свойств металлов и сплавов [20], целесообразно было провести электронномикроскопические исследования образцов проката до и после проведения обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение. Исследования показали, что в ферритной структуре исходного проката присутствует довольно значительное количество дислокаций (рис. 6 а-в), которые образуют фрагментированную субструктуру с размытыми границами ячеек. При этом в самих ячейках, особенно вблизи субграниц, наблюдается повышенная плотность дислокаций.

Субструктура холоднодеформированного (калиброванного) проката оказывает неизбежное влияние на процессы, происходящие при последующей обработке, включающей знакопеременный изгиб и растяжение. Известно [20], что при повторной деформации дислокационная субструктура предшествующей обработки (в нашем случае – калибровки), теряет устойчивость и перестраивается, что связано с накопленной упругой

внутренней энергией и изменением ее в результате перераспределения дефектов кристаллического строения. Эти изменения могут быть связаны с изменением плотности дислокаций, размеров ячеек субструктуры и углов их разориентировки, а также характера самой субструктуры.

Указанные изменения особенно очевидны, когда последующая деформация происходит в условиях

изменения способа деформации, в том числе в условиях сложно-напряженного состояния. Это относится и к использованной в настоящей работе обработке, включающей знакопеременный изгиб и растяжение.

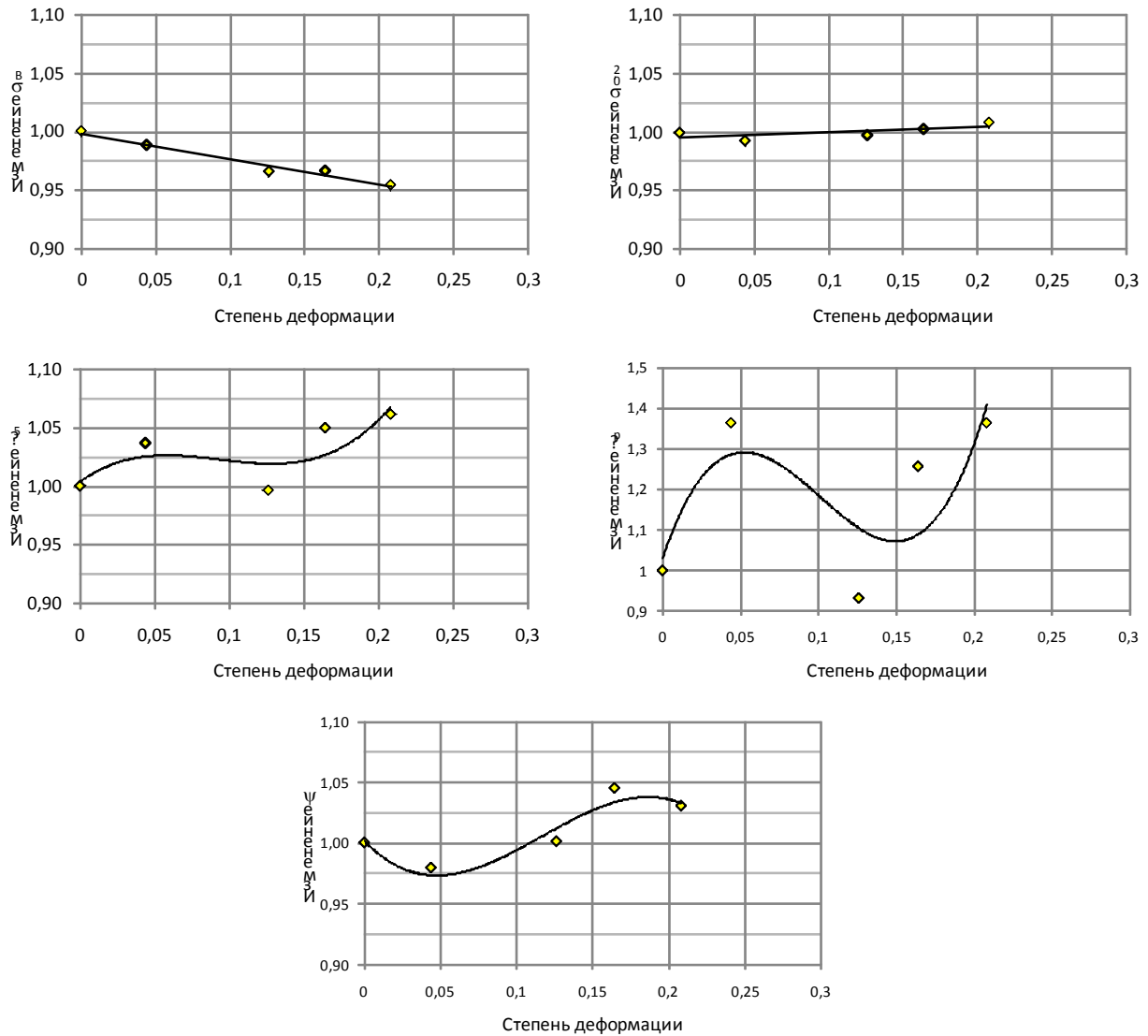


Рис. 5. Изменение механических свойств калиброванного проката из стали C7D после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение / Fig. 5. Change of mechanical properties of calibrated rolled steel from C7D steel after treatment, including alternating bending and stretching

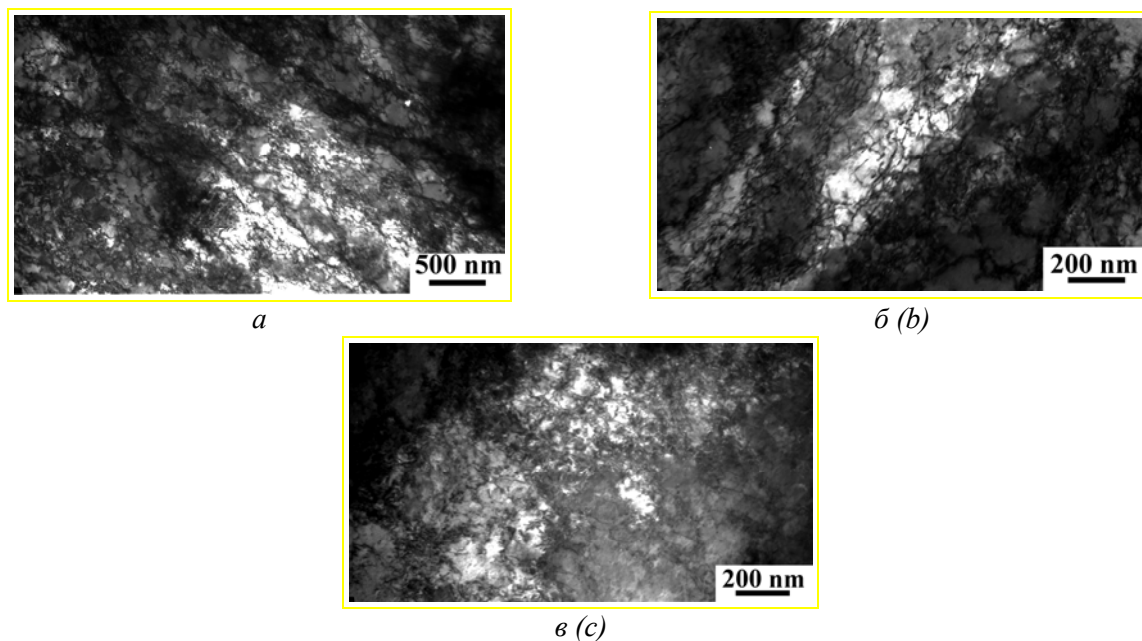


Рис. 6. Дислокационная структура калиброванного проката диаметром 6,0 мм из стали C7D до проведения обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение / Fig. 6. The dislocation structure of calibrated rolled steel with a diameter of 6,0 mm from C7D steel before processing, including alternating bending and stretching

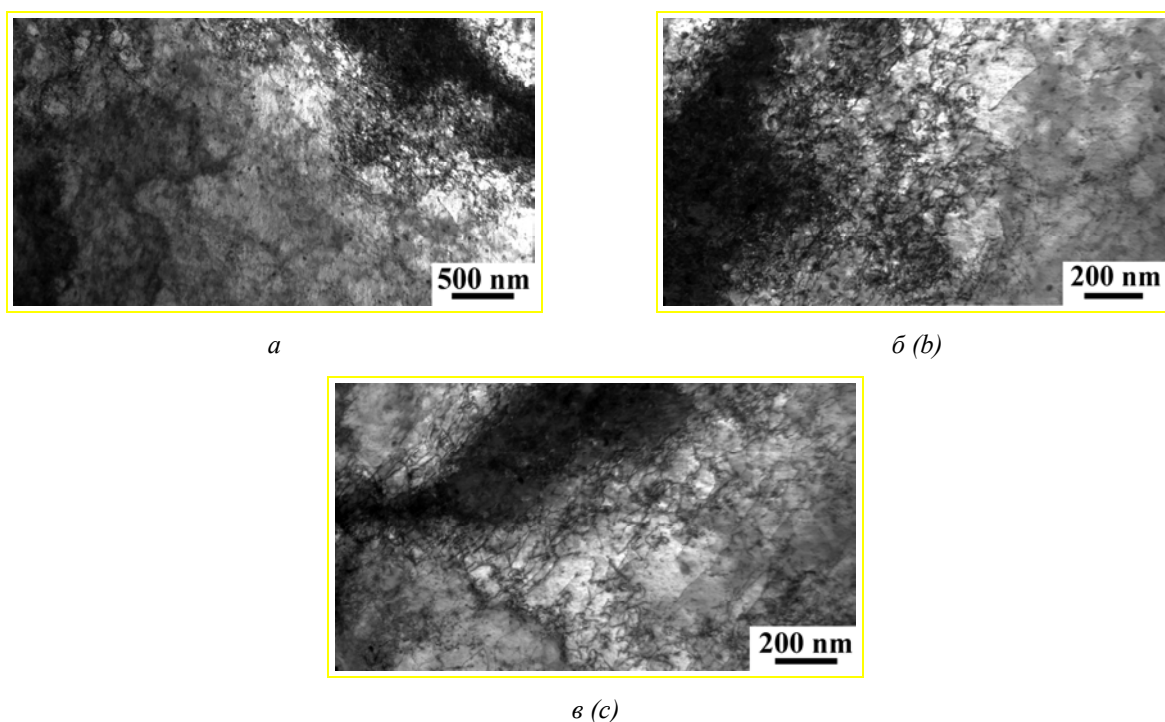


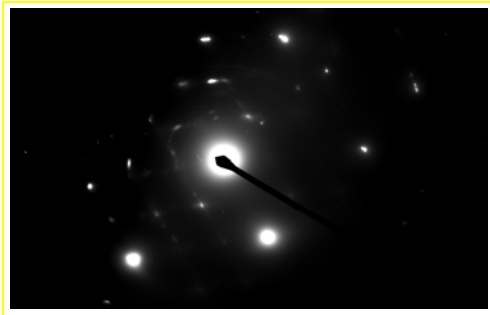
Рис. 7. Дислокационная структура проката из стали C7D после знакопеременного изгиба с растяжением / Fig. 7. Dislocation structure of rolled steel from C7D steel after alternating bending with stretching

Анализ тонкой структуры стали C7D после знакопеременного изгиба с растяжением показал, что в феррите произошла ее трансформация по сравнению с исходным состоянием. Сформировалась мезоскопическая субструктура, которая связана с образованием мезополос локализованной деформации вдоль направлений максимальных касательных напряжений (рис. 7).

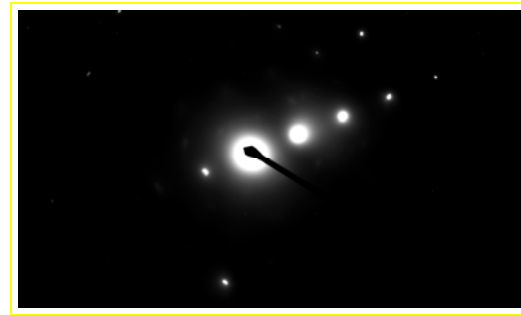
Представляется, что в зернах феррита возникают системы мезополос локализованной деформации, которые формируют микровихри, обусловленные возникновением встречных полей напряжений в условиях сложного силового поля напряжений при обработке, включающей знакопеременный изгиб с растяжением, что приводит к формированию

моментных напряжений и повороту микрообъемов зерен и субзерен.

Вследствие локального вихревого пластического течения происходит трансформация ячеек



а



б (b)

Рис. 8. Микродифракция феррита в образцах проката из стали С7D до и после проведения обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение: а – исходное состояние; б – после обработки / Fig. 8. Microdiffraction of ferrite in samples of rolled steel from C7D steel before and after processing, including alternating bending and stretching: a – initial state; b – after treatment

Электронограммы, снятые с ферритных зерен стали С7D калиброванного проката (рис. 8 а), показали, что большая часть рефлексов вытянута в азимутальном направлении. Это свидетельствует о наличии микронапряжений в субзернах феррита и, как следствие, о повышении плотности дислокаций. В образцах проката, подвергнутого знакопеременному изгибу с растяжением, азимутальное размытие наблюдается лишь для отдельных периферийных рефлексов (см. рис. 8 б), что свидетельствует о том, что микронапряжения в субзернах феррита и, соответственно, плотность дислокаций в стали уменьшились по сравнению с исходным холоднодеформированным состоянием. Действительно в данном случае азимутальное размытие незначительного количества рефлексов феррита проявляется (рис. 8 б) только на периферийных рефлексах с большими углами дифракции.

Таким образом, обработка холоднодеформированного (калиброванного) проката по схеме сложнонапряженного состояния, связанного со знакопеременным изгибом и растяжением, способствует трансформации тонкой субструктуры стали и уменьшению плотности дислокаций в результате их перераспределения и аннигиляции, обусловленных перераспределением напряжений, а также сложным характером течения стали. Указанные изменения способствуют изменению характера тонкой субструктуры металла.

Следует отметить, что наблюдаемые эффекты снижения прочностных свойств, роста пластических и параметров деформационного упрочнения получены для стали, в которой уже произошел определенный этап формирования дислокационной ячеистой субструктуры. Результаты исследований позволяют утверждать, что в основе процессов разупрочнения при обработке проката, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, в области

субструктуры, связанная с генерированием, аннигиляцией и перераспределением дислокаций, искривлением и переориентировкой субграниц, дроблением ячеек.

малых пластических деформаций лежат процессы трансформации дислокационной субструктуры металла.

### Выводы

1. Установлены закономерности изменения прочностных и пластических показателей бунтового проката из сталей С7D и С70D, после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, после предварительной холодной пластической деформации (калибровки) волочением. Полученные результаты свидетельствуют о циклическом характере изменения пластических показателей проката по мере повышения степени накопленной деформации. Максимальные значения относительного удлинения для стали С70D соответствуют степени деформации 0,07...0,10 и 0,27 %, а относительного сужения – 0,20 %. Повышение накопленной степени относительной деформации в исследованных диапазонах показало незначительное ее влияние на изменение значений временного сопротивления разрыву, которое в большей степени проявляется для предела текучести.

2. Показано, что при повышении диаметра роликов в процессе знакопеременного изгиба проката одного и того же профила размера уменьшается относительная степень деформации за один проход, а при использовании проката разных диаметров при одном и том же диаметре роликов происходит повышение относительной степени деформации с одновременным ростом силы протяжки в процессе обработки металла через деформирующее устройство.

3. Анализ тонкой структуры образцов проката, подвергнутого предварительной холодной пластической деформации, показал, что в феррите проката из стали С7D присутствует довольно значительное количество дислокаций, которые

образуют фрагментированную субструктуру с размытыми границами ячеек. При этом в самих ячейках, особенно вблизи субграниц, наблюдается повышенная плотность дислокаций.

4. Исследование тонкой структуры стали С7D после обработки, включающей знакопеременный изгиб и растяжение, показало, что в феррите произошла ее трансформация по сравнению с исходным состоянием. Сформировалась мезоскопическая субструктура, которая связана с формированием мезополос локализованной деформации. Мезополосы локализованной деформации формируют микровихри, обусловленные возникновением встречных полей напряжений в условиях сложного силового поля напряжений при обработке, включающей знакопеременный изгиб с растяжением, и приводящие к формированию моментных напряжений и повороту микрообъемов зерен и субзерен. Вследствие локального вихревого

пластического течения происходит трансформация ячеек субструктуры, связанная с генерированием, аннигиляцией и перераспределением дислокаций, искривлением и переориентировкой субграниц, дроблением ячеек.

5. Результаты исследований позволяют утверждать, что в основе процессов разупрочнения при сложнонапряженной схеме деформации, включающей знакопеременный изгиб и растяжение в области малых пластических деформаций происходит трансформация дислокационной субструктуры металла, сопровождаемая снижением плотности дислокаций, а снижение прочностных и рост пластических показателей металла можно рассматривать как возможность разработки дополнительного способа разупрочняющей технологии производства холоднодеформированного проката различного назначения, не связанной с термической обработкой.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка сдвиговой деформации при обработке проволоки в роликовых устройствах [Электронный ресурс] / В. А. Харитонов, Е. Ю. Ямашева, Ю. Ю. Ефимова, А. Ю. Столяров. Обработка сплошных и слоистых материалов. – (Научная библиотека КиберЛенинка). – Режим доступа : <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sdvigovoy-deformatsii-pri-obrabotke-provoloki-v-rolikovyh-ustroystvah#ixzz3n1WNXEYZ>.
2. Буркин С. П. Производство проволоки растяжением с изгибом / С. П. Буркин, Б. Р. Картак, Ю. В. Мамаев // Сталь. – 1975. – № 8. – С. 729–730.
3. Харитонов Вик. А. Современное состояние и тенденция развития производства холоднодеформированной арматурной стали класса прочности 500 диаметром 5–12 мм / Вик. А. Харитонов, В. А. Харитонов // Сталь. – 2008. – № 5. – С. 72–76.
4. Чукин М. В. Влияние комбинированных методов деформационной обработки на механические свойства углеродистой проволоки / М. В. Чукин, М. А. Полякова, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева // Черные металлы. – 2014. – № 12. – С. 35–40.
5. Чукин М. В. Применение методов формирования ультрадисперсной структуры при производстве высокопрочной сталемедной продукции / М. В. Чукин, М. А. Полякова, Д. Г. Емалеева, А. Е. Гулин // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 100–104.
6. Вакуленко И. А. Структурные изменения при изгибно-растяжном деформировании холоднокатаной низкоуглеродистой стали / И. А. Вакуленко, В. Г. Раздобреев // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2003. – Вып. 22. – Ч. 2. – С. 78–80.
7. Бабаченко А. И. Анализ макро- и микроструктуры железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства / А. И. Бабаченко, А. В. Кныш, А. А. Кононенко [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2015. – Вып. 80. – С. 27–32.
8. Вакуленко И. А. Исследование механизма атермического разупрочнения холоднокатаной низкоуглеродистой стали / И. А. Вакуленко, Г. В. Левченко // Металознавство та термічна обробка металів. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2001. – № 1. – С. 9–12.
9. Пашинская Е. Г. Влияние технологии волочения со сдвигом на структуру и свойства низкоуглеродистой проволоки [Электронный ресурс] / Е. Г. Пашинская, В. Н. Варюхин, А. А. Максакова [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – Т. 24, № 1. – С. 23–31. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/69696/12-PashinskayaNEW.pdf?sequence=1>.
10. Папилов И. И. Формирование ячеистой структуры в бериллии при обработке давлением [Электронный ресурс] / И. И. Папилов, А. А. Николаенко, В. С. Шокуров, А. И. Пикалов // ВАНТ – 2012. – № 5(81) – С. 88–92. – Режим доступа : [http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2012\\_5/article\\_2012\\_5\\_88.pdf](http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2012_5/article_2012_5_88.pdf).
11. Гулин А. Е. Разработка процесса изготовления углеродистой проволоки с повышенными механическими свойствами методом комбинированной пластической деформации : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.05 «Обработка металлов давлением» / А. Е. Гулин. – Магнитогорск, 2014. – 20 с.
12. Чукин М. В. Исследование особенностей структурообразования в процессе интенсивной пластической деформации углеродистых конструкционных сталей / М. В. Чукин, Н. В. Копцева, А. Г. Корчунов [и др.] // Черные металлы. – 2011. – № 7–8. – С. 25–28.
13. Чукин М. В. Разработка критериальной оценки эффективности процессов интенсивной пластической деформации конструкционных углеродистых сталей / М. В. Чукин, А. Г. Корчунов, М. А. Полякова [и др.] // Черная металлургия. – 2013. – № 2. – С. 46–51.
14. Деформация и разрушение материалов : монография / [Ф. Маклинток, А. Аргон]. – Москва : Мир, 1970. – 443 с.
15. Деформационное старение стали : монография / [В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков]. – Москва : Металлургия, 1972. – 320 с.
16. Вакуленко И. А. Влияние размера зерна феррита и дисперсности перлита углеродистой стали на сопротивление малым пластическим деформациям / И. А. Вакуленко, В. Г. Раздобреев, О. Н. Перков, Н. Н. Грищенко // Сб. докладов

6-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков : ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст». – 2005. – Ч. II. – С. 19–21.

17. Битков В. В. Технология и машины для производства проволоки : монография / В. В. Битков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 344 с.

18. Вакуленко И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании : монография / И. А. Вакуленко. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2003. – 94 с.

19. Вакуленко И. А. Структурные изменения при изгибно-растяжном деформировании холоднокатаной низкоуглеродистой стали / И. А. Вакуленко, В. Г. Раздобреев // Металлы. – 2004. – № 3. – С. 86–90.

20. Деформация металлических материалов : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов]. – Днепропетровск : Арт-пресс, 2006. – 316 с.

## REFERENCES

1. Haritonov V.A., Yamasheva E.Yu., Efimova Yu.Yu. and Stolyarov A. Yu. *Otsenka sdvigovoy deformatsii pri obrabotke provoloki v rolkovykh ustroystvakh* [Evaluation of the shear strain at processing wire in roller devices]. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of solid and laminar materials]. Nauchnaya biblioteka KiberLeninka. [Elektronnyy resurs]. (in Russian)

2. Burkin S.P., Kartak B.R. and Mamaev Yu.V. *Proizvodstvo provoloki rastyazheniem s izgibom* [Wire production by stretching with bending]. *Stal'* [Steel]. 1975, no. 8, pp. 729–730. (in Russian)

3. Haritonov Vik.A. and Haritonov V.A. *Sovremennoe sostoyanie i tendenciya razvitiya proizvodstva holodnodeformirovannoy armaturnoy stali klassa prochnosti 500 diametrom 5–12 mm* [Current state and development trend of production of cold-deformed reinforcing steel of strength class 500 with a diameter of 5–12 mm]. *Stal'* [Steel]. 2008, no 5, pp. 72–76. (in Russian)

4. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulin A.E. and Emaleeva D.G. *Vliyanie kombinirovannykh metodov deformatsionnoy obrabotki na mekhanicheskie svoystva uglerodistoy provoloki* [The effect of combined methods of deformation processing on the mechanical properties of carbon wire]. *Chernye metally* [Black metals]. 2014, no. 12, pp. 35–40. (in Russian)

5. Chukin M.V., Polyakova M.A., Emaleeva D.G. and Gulin A.E. *Primenenie metodov formirovaniya ul'tradispersnoy struktury pri proizvodstve vysokoprochnoy stalemednoj produktsii* [Application of methods for the formation of ultrafine structure in the production of high-strength steel-copper products]. *Stal'* [Steel]. 2014, no. 4, pp. 100–104. (in Russian)

6. Vakulenko I.A. and Razdobreev V.G. *Strukturnye izmeneniya pri izgibno-rastyazhnom deformirovani holodnokatanoy nizkouglerodistoy stali* [Structural changes during bending-stretching deformation of cold-rolled low-carbon steel]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2003, no. 22, part 2, pp. 78–80. (in Russian)

7. Babachenko A.I., Knysh A.V. and Kononenko A.A. *Analiz makro- i mikrostruktury zheleznodorozhnykh koles, izgotovlennykh razlichnymi sposobami proizvodstva* [Analysis of the macro- and microstructure of railway wheels manufactured by different methods of production]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, no. 80, pp. 27–32. (in Russian)

8. Vakulenko I.A. and Levchenko G.V. *Issledovanie mekhanizma atermicheskogo razuprochneniya holodnokatanoy nizkouglerodistoy stali* [Investigation of the mechanism of athermal softening of cold-rolled low-carbon steel]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2001, no. 1, pp. 9–12. (in Russian)

9. Pashinskaya E.G., Varyuhin V.N. and Maksakova A.A. *Vliyanie tekhnologii volocheniya so sdvigom na strukturu i svoystva nizkouglerodistoy provoloki* [Effect of drawing technology on the structure and properties of low-carbon wire]. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [Physics and technique of high pressures]. 2014, issue 24, no. 1. [Elektronnyy resurs]. (in Russian)

10. Papirov I.I., Nikolaenko A.A., Shokurov V.S. and Pikalov A.I. *Formirovaniye yacheistoy struktury v berillii pri obrabotke davleniem* [Formation of a cellular structure in beryllium during pressure treatment]. *VANT* [VANT]. 2012, no. 5 (81), pp. 88–92. [Elektronnyy resurs]. (in Russian)

11. Gulin A.E. *Razrabotka processa izgotovleniya uglerodistoy provoloki s povyshennymi mekhanicheskimi svoystvami metodom kombinirovannoy plasticheskoy deformatsii* [Development of the process of manufacturing carbon wire with increased mechanical properties by the method of combined plastic deformation] Avtoref. dis. na soisk. nauch. stepeni kand. tekhn. Nauk : spec. 05.16.05 «Obrabotka metallov davleniem». Magnitogorsk, 2014, 20 p. (in Russian)

12. Chukin M.V., Kopceva N.V. and Korchunov A.G. *Issledovanie osobennostey strukturoobrazovaniya v processe intensivnoy plasticheskoy deformatsii uglerodistykh konstrukcionnykh stalej* [Investigation of the peculiarities of structure formation in the process of intensive plastic deformation of carbon structural steels]. *Chernye metally* [Black metals]. 2011, no. 7–8, pp. 25–28. (in Russian)

13. Chukin M.V., Korchunov A.G. and Polyakova M.A. *Razrabotka kriterial'noy ocenki ehffektivnosti processov intensivnoy plasticheskoy deformatsii konstrukcionnykh uglerodistykh stalej* [Development of a criterial evaluation of the efficiency of intensive plastic deformation processes of structural carbon steels]. *Byull. Chernaya metallurgiya* [Bull. Ferrous metallurgy]. 2013, no. 2, pp. 46–51. (in Russian)

14. Maklintonk F. and Argon A. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials]. Moscow : Mir, 1970, 443 p. (in Russian)

15. Babich V.K., Gul' Yu.P. and Dolzhenkov I.E. *Deformatsionnoe starenie stali* [Deformation aging of steel]. Moscow : Metallurgy, 1972, 320 p. (in Russian)

16. Vakulenko I.A., Razdobreev V.G., Perkov O.N. and Grishchenko N.N. *Vliyanie razmera zerna ferrita i dispersnosti perlita uglerodistoy stali na soprotivlenie malym plasticheskim deformatsiyam* [Effect of the grain size of ferrite and the dispersity of carbon steel perlite on the resistance to small plastic deformations]. *Sb. dokladov 6 Mezhdunarodnoy konferentsii «Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov»* [Collection of reports of the 6th International Conference «Equipment and Technologies for Heat Treatment of Metals and Alloys»]. Kharkov, 2005, part II, pp. 19–21. (in Ukrainian)

17. Bitkov V.V. *Tekhnologiya i mashiny dlya proizvodstva provoloki* [Technology and machines for wire production]. Ekaterinburg : Uro RAN, 2004, 344 p. (in Russian)

18. Vakulenko I.A. *Struktura i svojstva uglirodistoј stali pri znakoperemennom deformirovanii* [Structure and properties of carbon steel under alternating deformation]. Dnepropetrovsk : Gaudeamus, 2003, 94 p. (in Russian)

19. Vakulenko I.A. and Razdobreev V.G. *Strukturnye izmeneniya pri izgibno-rastyazhnom deformirovanii holodnokatanoј nizkouglerodistoј stali* [Structural changes during bending-stretching deformation of cold-rolled low-carbon steel]. *Metally* [Metals]. 2004, no. 3, pp. 86–90. (in Russian)

20. Gubenko S.I. and Parusov V.V. *Deformaciya metallicheskih materialov* [Deformation of metallic materials]. Dnipropetrovsk: Art-Press, 2006, 316 p. (in Russian)

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Г. В. Левченко (Украина), д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина).*

*Поступила в редколлегию 21.07.2017*

*Принята в печать 23.07.2017*