

А. А. Максакова<sup>1</sup>, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук Е. Г. Пашинская<sup>1</sup>, канд. техн. наук А. В. Климов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. Галкина

<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет

*Работа выполнена в Донецком физико-техническом институте им. Галкина*

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СО СДВИГОМ

*Выполнен эксперимент по изучению влияния волочения со сдвигом на свойства малоуглеродистой стали при различном сочетании круглых и сдвиговых волок. Показано влияние обжатий волок со сдвигом на структуру и свойства низкоуглеродистой проволоки. Определены оптимальные режимы волочения для получения улучшенных технологических свойств.*

**Ключевые слова:** волочение со сдвигом, структура, низкоуглеродистая проволока, механические свойства.

### Введение

Применение методов интенсивной пластической деформации сегодня дает возможность получить ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру практически в любом материале. При изготовлении проволоки с УМЗ-структурой одним из ограничений является тот факт, что ее волочение происходит по непрерывной схеме. А типичный объем заказов исчисляется по весу тоннами, а по длине – десятками тысяч километров. Поэтому проведение интенсивной пластической деформации (ИПД) должно проходить в ходе волочения за счет особых волок со сдвигом без снижения производительности процесса. В данном случае важную роль при разработке технологии волочения со сдвигом, основанной на ИПД, будет играть скорость прохождения проволоки через волоку, необходимое количество проходов и схема чередования волок со сдвигом и волок для волочения стандартной круглой формы. Оптимизация этих параметров позволит создать технологию волочения низкоуглеродистой проволоки требуемой технологичности и производительности.

Решением вопроса об использовании методов ИПД при волочении заняты ученые многих стран [1–5]. Наиболее простым с точки зрения реализации является метод [1]. Так, авторы рассматривают применение знакопеременного изгиба на холоднотянутой арматуре без дополнительного нагрева. Основными преимуществами такого метода являются его непрерывность и возможность использовать для получения длинномерных изделий с повышенными механическими свойствами.

Способ получения УМЗ-структуры на длинномерных изделиях, основанный на волочении, описан в работе [2]. Главное его преимущество – непрерывность процесса и возможность применения для массового волочильного производства. Недостатком способа яв-

ляется трудоемкость процесса волочения, так как используется сложный технический узел, требующий при смене волок демонтажа и новой сборки.

В работе [3] показано, что наиболее эффективно измельчение зерен происходит за счет изгиба проволоки в ходе волочения, чего можно добиться, например, поменяв расположение волок относительно оси волочения. Основными недостатками такой схемы является низкая скорость волочения (0,05 м/с), трудность заправки проволоки при каждом волочении и сложная система узла с волоками, поломка которого в промышленном производстве может значительно снизить его производительность.

Данные методы показали, что изменение течения металла при волочении относительно оси волочения приводит к положительным изменениям структуры и свойств. Однако некоторые из них показали также противоречивые данные по изменению уровня механических свойств, например прочности.

Целью данной статьи является:

- изучение влияния волочения со сдвигом на структуру и физико-механические свойства малоуглеродистой стали при различном сочетании стандартных круглых волок и волок со сдвигом;
- определение оптимальных режимов волочения для получения улучшенных механических и технологических свойств;
- разработка подходов для создания новой технологии волочения со сдвигом низкоуглеродистой проволоки, позволяющей исключить промежуточные отжиги.

### Методика

Эксперимент был проведен на малоуглеродистой проволоке Св08Г2С с 0,071 % С и 1,98 % Мп.

Для достижения поставленных целей был проведен модельный эксперимент, выполненный по следующей

схеме (рисунок 1). В качестве подготовительной работы для получения образцов с разной степенью обжатия заготовку  $\varnothing 6,15$  проволочили обычным способом через круглые волокна  $\varnothing 5,57, \varnothing 5,35, \varnothing 5,1$  мм, затем отжгли (рисунок 1) и получили три бунта проволоки разного диаметра. Температура отжига составляла  $650^\circ\text{C}$ , выдержка 30 минут, охлаждение проводили на воздухе. После получения однородной структуры на разных диаметрах все три типоразмера волочили через волокно со сдвигом  $\varnothing 4,65$ . Далее каждый из 3-х бунтов разделили на три части и проволочили через круглые волокна  $\varnothing 4,65, \varnothing 4,46$  и  $\varnothing 4,28$ . Это дало 9 вариантов состояний с разными частичными обжатиями на переходах круглая проволока – проволока со сдвигом и проволока со сдвигом – круглая проволока. Схема волочения показана на рис. 1.

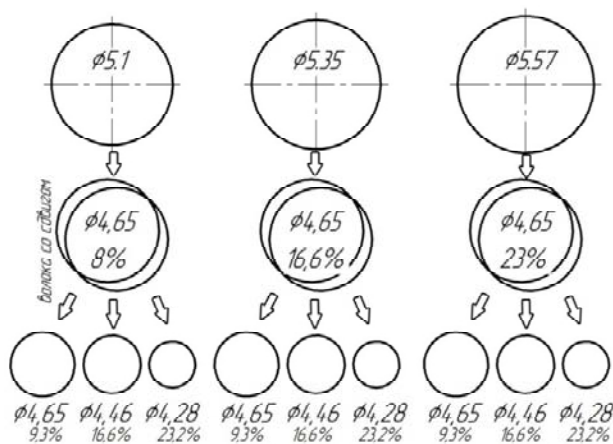


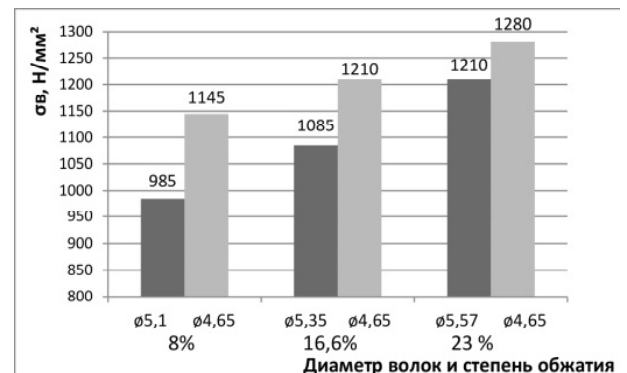
Рис. 1. Схема волочения для модельного эксперимента. В процентах приведены разовые обжатия

На полученных образцах измеряли механические свойства методом испытания на разрыв. Испытания на прочность выполняли на машине УММ-50 при температуре  $293\text{ K}$  и скорости нагружения  $10\text{ mm/min}$  согласно ГОСТу 25.601–80. Определяли предел прочности и относительное сужение. Для оценки дефектности структуры металла определяли плотность образцов методом гидростатического взвешивания на весах SHIMADZU. Микроструктуру отожженного и деформированных образцов изучали при увеличениях  $\times 500$  на приборе «Neophot-32» после многократной полировки и травления для выявления границ зерен (состав травителя: 4 % азотной кислоты, 97 % спирта). Фотографирование осуществляли на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT.

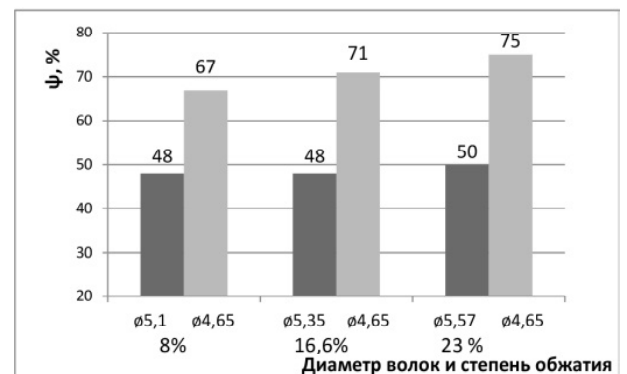
### Результаты

Исследования показали, что при малых обжатиях (8 %) проволокой со сдвигом прочность проволоки увеличивается значительно – на 14 % с  $985$  до  $1145\text{ Н/мм}^2$  (рис. 2, а). С увеличением степени обжатия проволокой со сдвигом прирост прочности снижается: при обжатии в

23 % прочность проволоки увеличивается приблизительно на 4 % (с  $1210$  до  $1240\text{ Н/мм}^2$ ). Другими словами, проволока со сдвигом при больших обжатиях приводит к меньшему упрочнению проволоки. Это необычное явление, т. к. обычно увеличение степени деформации (обжатия) приводит к большему росту прочности. Кроме того, с увеличением степени обжатия растут пластические свойства, что также является нехарактерным явлением при традиционном волочении (рис. 2, б). Относительное сужение  $\psi$  с ростом степени обжатия проволокой со сдвигом существенно увеличивается (на 19–25 единиц), причем чем больше обжатие проволокой со сдвигом, тем значительно повышается уровень пластичности.



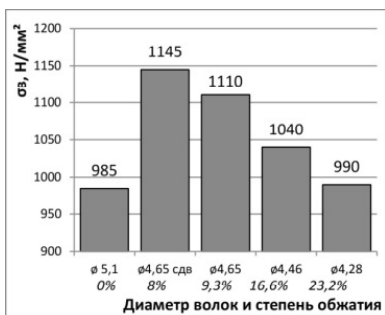
а



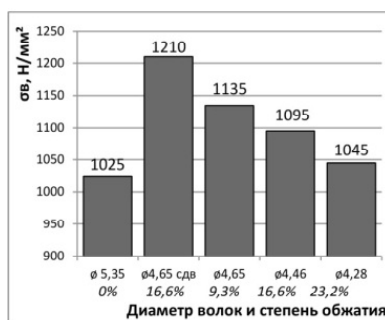
б

Рис. 2. Механические свойства проволоки при разных степенях обжатия при переходе из круга в проволоку со сдвигом: а – предел прочности, б – относительное сужение

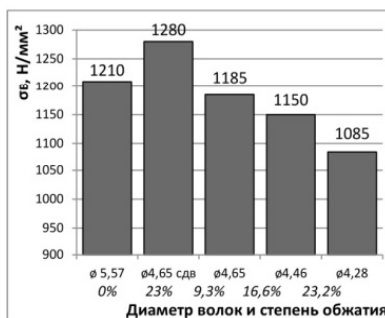
Дальнейшее поведение механических свойств при волочении с проволокой со сдвигом показано на рисунке 3. Как видно из рисунков, с увеличением степени обжатия наблюдается тенденция к уменьшению прочностных свойств. Не трудно заметить, что обжатие в 23,2 % после проволоки со сдвигом является наиболее оптимальным при волочении, так как оно дает возможность понизить предел прочности практически до свойств в исходном состоянии. Тем не менее, результаты механических испытаний не дают нам полного представления о происходящих процессах в ходе волочения со сдвигом.



а



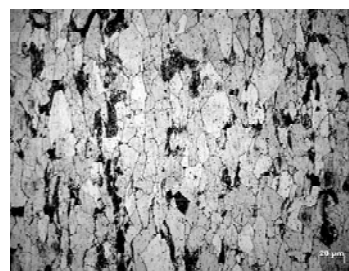
б



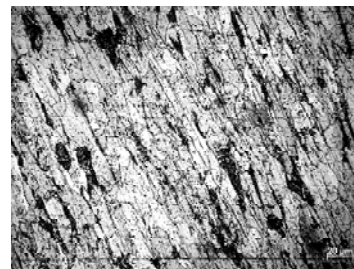
в

**Рис. 3.** Диаграмма изменений механических свойств проволоки при разных степенях обжатия после волоки со сдвигом (Ж4,65 сдвиговая волока): а – 8 % обжатия волокой со сдвигом; б – 16,6 % обжатия волокой со сдвигом; в – 23 % обжатия волокой со сдвигом

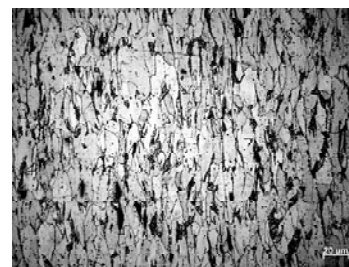
Микроструктурные исследования показали, что степень обжатия сдвиговой волоки на структуру влияет следующим образом. Небольшая степень обжатия волокой со сдвигом (8 %) практически не влияет на изменение размеров структурных составляющих, но при этом с последующим увеличением степени обжатия круглой волокой зерна феррита все больше и больше вытягиваются, как и при стандартном волочении с круглыми волоками. С ростом степени обжатия волокой со сдвигом микроструктура становится более мелкой: ферритные зерна уменьшаются, перлитные колонии имеют в 1,5 % раза меньший размер, цементитные пластины раздроблены и более однородно распределены по ферриту внутри перлитных колоний. Наиболее мелкая и однородная структура при волочении со сдвиговой волокой возникает при сочетании обжатий  $16,6*+23 = 40\%$  или  $23*+17 = 40\%$ , где \* – обжатие сдвиговой волоки (рис. 4). Причем при этих обжатиях не только измельчается само зерно, но и внутри него формируется большая плотность субгранул.



Ø 5,57 (исходная структура)



Ø 4,28 (8 %\*+23 %)

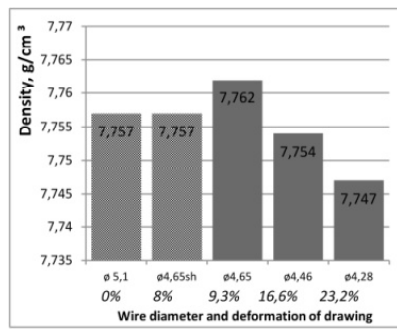


Ø 4,46 (23 %\*+17 %)

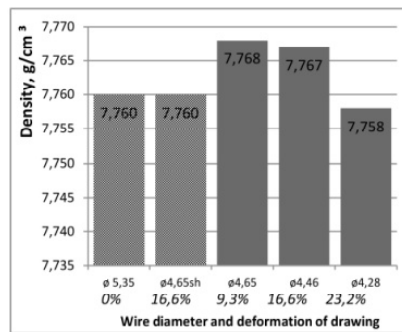
**Рис. 4.** Продольные микроструктуры проволоки Св08Г2С в исходном состоянии и после волочения сдвиговой и круглой волокой с разными степенями обжатия (\* – сдвиговая волока), × 500

Исследования по измерению плотности показали, что при обжатии волокой со сдвигом плотность в пределах погрешности не меняется по сравнению с исходным образцом (рис. 5). При последующем обжатии круглой волокой в 9,3 % плотность увеличивается по сравнению с плотностью проволоки после волоки со сдвигом. Дальнейшее увеличение обжатий при использовании круглых волок приводит к классической картине понижения плотности с ростом частичного обжатия. Исключение составляет изменение поведения плотности после волоки со сдвигом с обжатием в 23 %. При этом с увеличением степени обжатий круглыми волоками плотность не падает, а имеет тенденцию к повышению. Это означает, что смена сдвиговой волоки на круглую приводит к залечиванию пор за счет изменения направления течения металла. Это явление является дополнительным благоприятным фактором для повышения технологической пластичности при волочении со сдвигом.

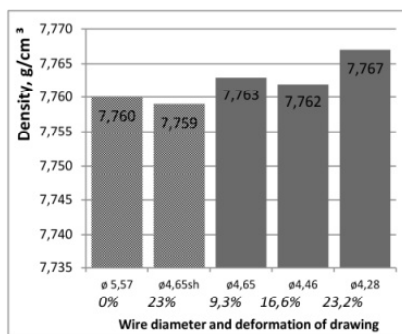
Исходя из приведенных данных по плотности, прочностным свойствам и изменениям микроструктуры можно сделать заключение, что волока со сдвигом с обжатием в 23 % дает наиболее оптимальное сочетание технологических свойств.



а



б



в

Рис. 5. Результати вимірювання густоти при різних степенях обжаття з використанням волок со сдвигом: а – 8 % обжаття волокою со сдвигом; б – 16,6 % обжаття волокою со сдвигом; в – 23 % обжаття волокою со сдвигом

### Висновки

1. С збільшенням ступеня обжаття досліджуваної проволочки волокою со сдвигом приріст міцності зменшується, а пластичність збільшується.

### Максакова А.А., Ольшанецький В.Ю., Пашинська О.Г., Климов О.В. Особливості структури і властивостей дроту залежно від ступеня деформації при волочінні зі зсувом

Проведено експеримент з вивчення впливу волочіння зі зсувом на властивості малоуглецевої сталі при різному поєднанні круглих і зсувних волок. Показано вплив обтиснень волок із зсувом на структуру та властивості низькоуглецевого дроту. Визначені оптимальні режими волочіння для отримання поліпшених технологічних властивостей.

**Ключові слова:** волочіння зі зсувом, структура, низькоуглецевий дріт, механічні властивості.

### Maksakova A., Olshanetskiy V., Pashinska E., Klimov A. The main features of structure and properties of the wire depending on the deformation degree during drawing with shear

An experiment was held to study the effect of drawing with shear on the properties of low-carbon steel with various combinations of round and shear dies. It is shown that the compression of dies with shear effect on the structure and properties of low carbon wire. The optimal reduction ratio while drawing were determined to improve processing properties.

**Key words:** drawing with shear, structure, low carbon wire, mechanical properties.

2. Наиболее оптимальным значением степени обжатия при волочении является 23 %. Волочение через волоку со сдвигом с обжатием в 23 % дает возможность в последующем при применении круглых волок увеличить плотность проволоки, с одновременным повышением прочностных и пластических свойств. Такая степень обжатия дает минимальный прирост прочности, что является одним из основных факторов увеличения технологической волочимости и дает возможность в будущем создать технологию волочения проволоки без использования промежуточного отжига с целью смягчения структуры.

3. Наиболее мелкая и однородная структура при волочении со сдвиговой волокой возникает в проволоке при сочетании обжатий  $16,6^*+23 = 40\%$  или  $23^*+17 = 40\%$ , где \* – обжатие сдвиговой волоки.

4. Смена сдвиговой волоки на круглую приводит к залечиванию пор за счет изменения направления течения металла и является дополнительным благоприятным фактором повышения технологической пластичности.

**Благодарности:** канд. физ.-мат. наук Ткаченко В.М., канд. техн. наук Завдоеву А.В.

### Список литературы

1. Е.М. Киреев, М.Н. Шуляк, А.В. Столяров, Влияние финишной деформации знакопеременным изгибом на формирование механических свойств холоднотянутой арматуры, Сталь № 3, 2009, 56 с.
2. Патент РФ № 2347633, Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом, Г.И. Рааб, А.Г. Рааб, Заявка № 2007141899/02, 12.11.2007.
3. Krzysztof Muszka, Lukasz Madej, Janusz Majta The effects of deformation and microstructure inhomogeneities in the Accumulative Angular Drawing (AAD) Materials Science and Engineering: A Volume 574, 2013, Pages 68–74.
4. Sun Kwang Hwanga, Hyun Moo Baeka, Il-Heon Sonb, Yong-Taek Ima, Chul Min Baeb The effect of microstructure and texture evolution on mechanical properties of low-carbon steel processed by the continuous hybrid process Materials Science and Engineering: A Volume 579, 1 September 2013, Pages 118–125.
5. Jung Wan Leea, Hyun Moo Baeka, Sun Kwang Hwanga, Il-Heon Sonb, Chul Min aeb, Yong-Taek Ima, The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and microstructure evolution of low-carbon steel, *Materials & Design* Volume 55, March 2014, Pages 898–904.

Одержано 12.11.2014