

PACS: 61.66.–f, 62.20.–x

Е.Г. Пашинская, А.В. Завдоев, А.А. Максакова, В.Н. Варюхин,
А.А. Толпа, В.М. Ткаченко

ВЛИЯНИЕ ВОЛОК СО СДВИГОМ НА ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2015 года

Изучены изменения структуры и свойств низкоуглеродистой проволоки в процессе волочения со сдвигом. Показано, что основной особенностью при использовании сдвиговых волок является наличие тенденции к разупрочнению проволоки с ростом степени обжата, в то время как при классическом волочении через круглые волокна прочностные свойства растут, а пластические – ухудшаются. Установлено, что применение волок со сдвигом дает возможность залечивать поры, варьировать размер зерна и получать проволоку требуемого диаметра с высоким уровнем прочностных и пластических свойств. Обнаруженные эффекты позволили предположить высокотехнологичный способ волочения проволоки без промежуточного отжига.

Ключевые слова: малоуглеродистая сталь, волочение со сдвигом, прочность, пластичность

Вивчено зміни структури та властивостей низьковуглецевого дроту в процесі волочіння зі зрушенням. Показано, що основною особливістю при застосуванні зсувних волок є наявність тенденції до знеміцнення дроту зі зростанням ступеню обтиснення, в той час як при класичному волочінні через круглі волокна властивості міцності зростають, а пластичні – погіршуються. Встановлено, що застосування волок зі зсувом надає можливість заліковувати пори, варіювати розмір зерна й отримувати дріт необхідного діаметру з високим рівнем міцності та пластичних властивостей. Виявлені ефекти дозволили запропонувати високотехнологічний спосіб волочіння дроту без проміжного відпалу.

Ключові слова: маловуглецева сталь, волочіння зі зрушенням, міцність, пластичність

Для получения материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой используются различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД) со сдвигом как в горячем, так и в холодном состояниях: равноканальное угловое прессование, винтовая экструзия, а также комбинации этих методов с последующей прокаткой, осадкой, волочением и др. Применение их позволяет значительно повысить прочность материала при сохранении определенного запаса пластичности.

Однако указанные комбинации методов нельзя реализовать для массовых волочильных производств, тогда как последние весьма заинтересованы в

получении новых технологических и эксплуатационных характеристик в длинномерных проволочных изделиях [1,2]. Одним из ограничений при изготовлении проволоки с УМЗ-структурой является то, что объемы материалов, полученных с помощью вышеперечисленных методов ИПД, исчисляются десятками килограммов и тоннами, в то время как требуемая производительность волоочильного производства составляет сотни тысяч тонн.

Решение указанной проблемы может заключаться в использовании волочения со сдвигом. Для катанки и проволоки повышение запаса пластичности предположительно позволит удешевить и упростить технологию производства за счет упразднения процесса промежуточного отжига.

В работах [1–6] описаны различные методы ИПД для металлических длинномерных изделий различных конфигураций. Наибольший интерес для нас представляют работы [5,6]. Так, авторы [5] рассматривают применение знакопеременного изгиба на холодотянутой арматуре без дополнительного нагрева. Основными преимуществами такого метода являются его непрерывность и возможность использовать для получения длинномерных изделий с повышенными механическими свойствами. Главный его недостаток – сложность деформирующего узла.

В работе [6] описан способ пластического структурообразования материала длинномерных заготовок и представлено устройство для его реализации, основанное на знакопеременной деформации в пересекающихся каналах. Очаг деформации заготовки при этом образуется за счет смещения осей симметрии каналов с одноосным растяжением. Данный способ прерывный, позволяет изготавливать длинномерные изделия с конечной длиной порядка нескольких метров. Его преимуществом является формирование мелкозернистой структуры. Однако деформирующий блок конструктивно еще более сложный, чем в работе [5]. Оба способа [5,6] не позволяют изготавливать проволоку малых диаметров.

Цель данной статьи – представить разработанную технологию волочения со сдвигом для повышения технологической пластичности низкоуглеродистых сталей без применения термической обработки. Эта технология должна обеспечивать определенные физико-механические свойства проволоки, а также быть дешевой, простой и надежной при эксплуатации.

Для проведения исследований по волочению со сдвигом использовали прокат из стали 08Г2С. Химический состав обрабатываемого материала приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав проволоки из стали Св-08Г2С, %

С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N
0.071	1.98	0.84	0.015	0.018	0.015	0.009	0.016	0.0055
Ti	As	B	Al	V	Mo	W	Co	
< 0.005	< 0.005	< 0.0005	0.005	0.006	< 0.01	0.024	0.01	

Волочение осуществляли на стане АЗТМ 7000/1 по новой экспериментальной технологии со сдвиговыми волокнами и по классической технологии со стандартными круглыми волокнами.

На полученных образцах измеряли механические свойства, в частности предел прочности и относительное сужение. Механические испытания на прочность выполняли на машине УММ-50 при температуре 293 К и скорости нагружения 10 mm/min согласно ГОСТу 25.601–80.

Микроструктуру отожженного и деформированных образцов изучали при увеличениях 100–1000 на приборе «Neophot-32» после многократной полировки и травления на границы зерен (состав травителя: 4% азотной кислоты, 97% спирта). Фотографирование осуществляли на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT с помощью программного обеспечения Axiovision 4.6. Для оценки качества проволоки была изучена структура в поперечном и продольном сечениях проволоки. Также проводили количественную оценку размеров зерен и их фрагментов в поперечном и продольном направлениях сечений образцов. По каждой фотографии выполняли 100 измерений. Осуществляли измерение микротвердости H_{μ} (нагрузка 100 g). Погрешность измерений составляла $\pm 5\%$.

Коэффициент вытяжки рассчитывали по формуле

$$k = D_1/D_2, \quad (1)$$

где D_1 , D_2 – длина зерна соответственно по направлению вытяжки зерен и перпендикулярно ей в продольном сечении образца, mm.

Для оценки дефектности структуры металла определяли плотность образцов методом гидростатического взвешивания на весах SHIMADZU. Для этого отбирали образцы длиной по 10 mm каждого диаметра, измерения проводили по шесть раз для каждого образца. Смазку подсыпали на каждом этапе волочения, скорость волочения 1.1 m/s.

Расчет плотности осуществляли по формуле

$$c = \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_2} c_0, \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

где ω_1 , ω_2 – вес пробы соответственно в воздухе и жидкости, g; c_0 – плотность жидкости при данной температуре, g/cm^3 .

Маршруты волочения приведены на рис. 1. Эксперимент был построен следующим образом:

1. Из катанки $\varnothing 6.5^*$ осуществляли волочение обычным способом для получения круглых диаметров: 5.57, 5.35, 5.1.

2. Полученные образцы отжигали при 650°C и 30-минутной выдержке, охлаждение проводили на воздухе.

3. Все три типоразмера волочили через волоку со сдвигом $\varnothing 4.65$.

* Величины диаметров в статье приведены в mm.

4. Каждый из трех типоразмеров разделили на три части и проволочили через круглую волоку диаметрами: 4.65, 4.46, 4.28. Это дало 9 вариантов состояний с разными частичными обжатыми на переходах: «обычная волока–волока со сдвигом» и «волока со сдвигом–обычная волока».

5. После этого проведены испытания на разрыв, исследования плотности и микроструктуры.

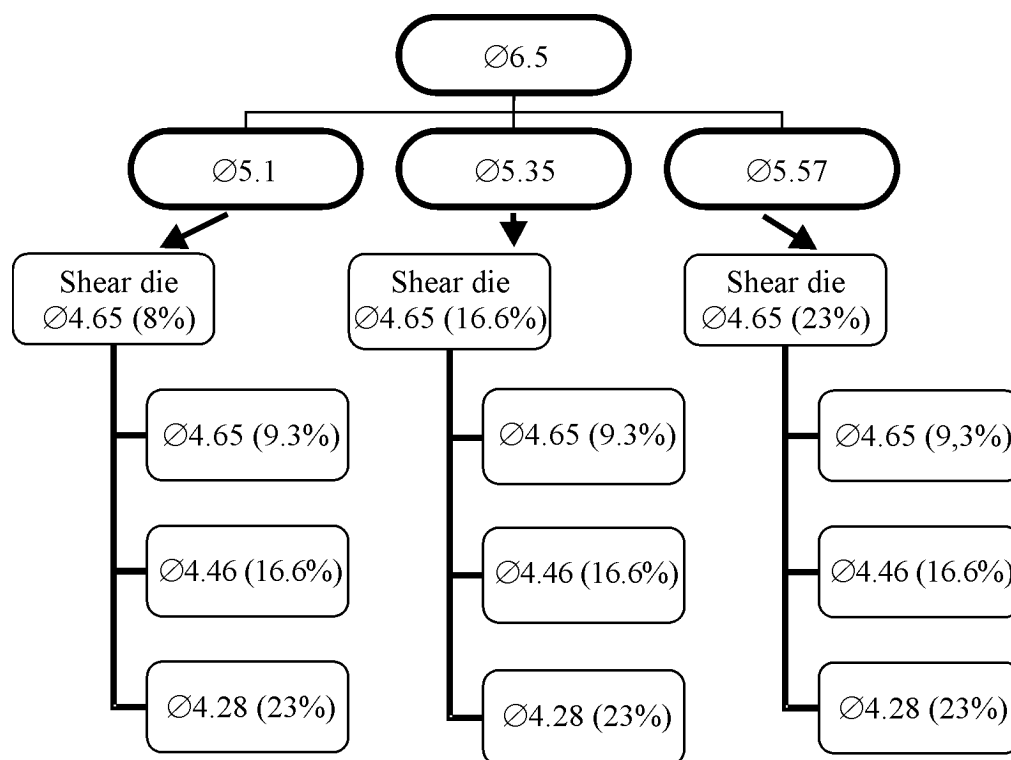


Рис. 1. Схема волочения (в процентах приведены разовые обжаты)

При больших обжатых абсолютные значения предела прочности выше в проволоке, полученной волокой со сдвигом (рис. 2), в сравнении с проволокой, полученной по стандартной технологии. Однако при больших обжатых волока со сдвигом в сравнении с круглой волокой приводит к меньшему упрочнению проволоки (рис. 3). С увеличением степени обжаты волокой со сдвигом снижается прирост предела прочности. Это необычное явление, так как повышение степени деформации (обжаты) должно приводить к большему росту прочности.

При этом с увеличением степени обжаты сдвиговой волокой относительное удлинение δ падает для всех обжаты до одного и того же уровня, т.е. величина δ не зависит от степени обжаты сдвиговой волокой. Отсюда следует вывод о том, что при разработке новой технологии волочения со сдвигом *нецелесообразно* использовать величину δ в качестве контрольного параметра.

Применение сдвиговой волоки приводит к росту относительного сужения для всех вариантов обжаты. Относительное сужение ψ с ростом степени обжаты сдвиговой волокой существенно (на 19–25%) увеличивается,

причем, чем больше обжатие сдвиговой волокой, тем значительно повышается ψ . Это благоприятный факт, так как относительное сужение обычно тесно связано с технической пластичностью проволоки во время волочения и в рассматриваемой разработке новой технологии волочения со сдвигом ψ может быть использовано как контрольный параметр.

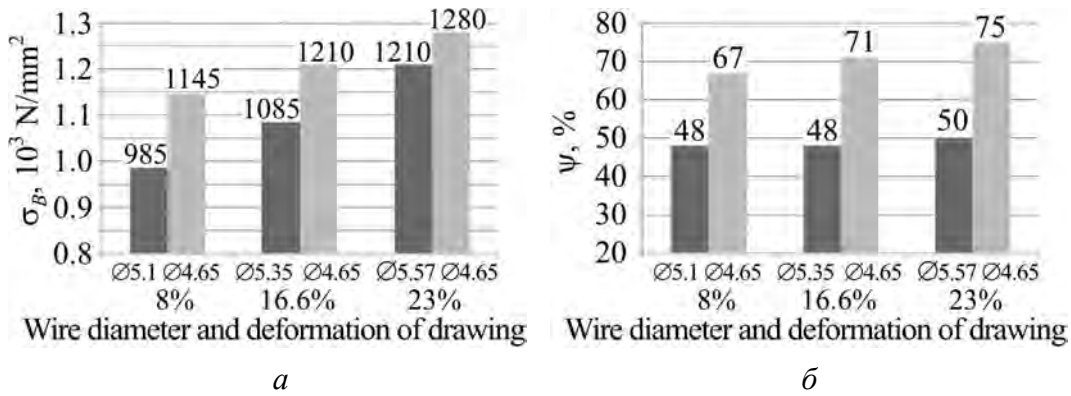


Рис. 2. Механические свойства проволоки при разных степенях обжатия при переходе с круглой волоки (Ø5.1, 5.35, 5.57) на волоку со сдвигом (Ø4.65): а – предел прочности, б – относительное сужение

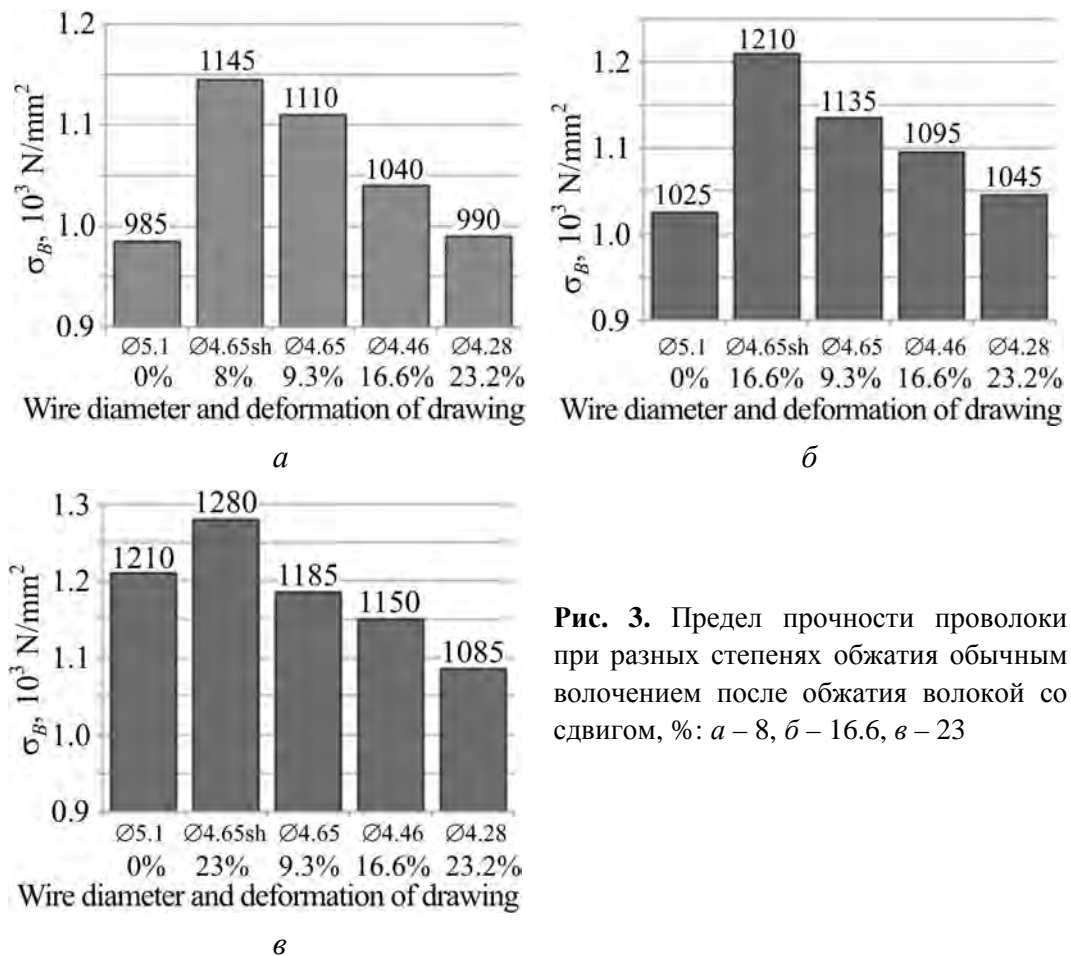


Рис. 3. Предел прочности проволоки при разных степенях обжатия обычным волочением после обжатия волокой со сдвигом, %: а – 8, б – 16.6, в – 23

Для уточнения природы роста относительного сужения с увеличением степени деформации были проведены измерения плотности. При обжатии сдвиговой волокой плотность в пределах погрешности не меняется (рис. 4). При последующем обжатии круглой волокой (режим «сдвиговая волока + круглая волока») плотность для всех случаев обжатий растет. Это означает, что смена сдвиговой волоки на круглую приводит к залечиванию пор за счет изменения направления течения металла. Данное явление служит дополнительным благоприятным фактором для повышения технологической пластичности при волочении со сдвигом. Дальнейшее увеличение частичных обжатий при использовании круглых волок приводит к классической картине понижения плотности. Исключение составляет режим волочения «сдвиговая волока (23%) + круглая волока (23%)», для которого значения плотности растут с повышением степени деформации. Уменьшение плотности может привести к падению микротвердости при обжатии 8 и 16.6%, однако не определяет ее роста при обжатии 23%.

Объяснение такого поведения микротвердости может состоять в том факте, что при комбинации сдвиговых обжатий с большими обжатиями обычным волочением активно развиваются релаксационные процессы, способствующие стоку точечных дефектов и уменьшению количества микропор.

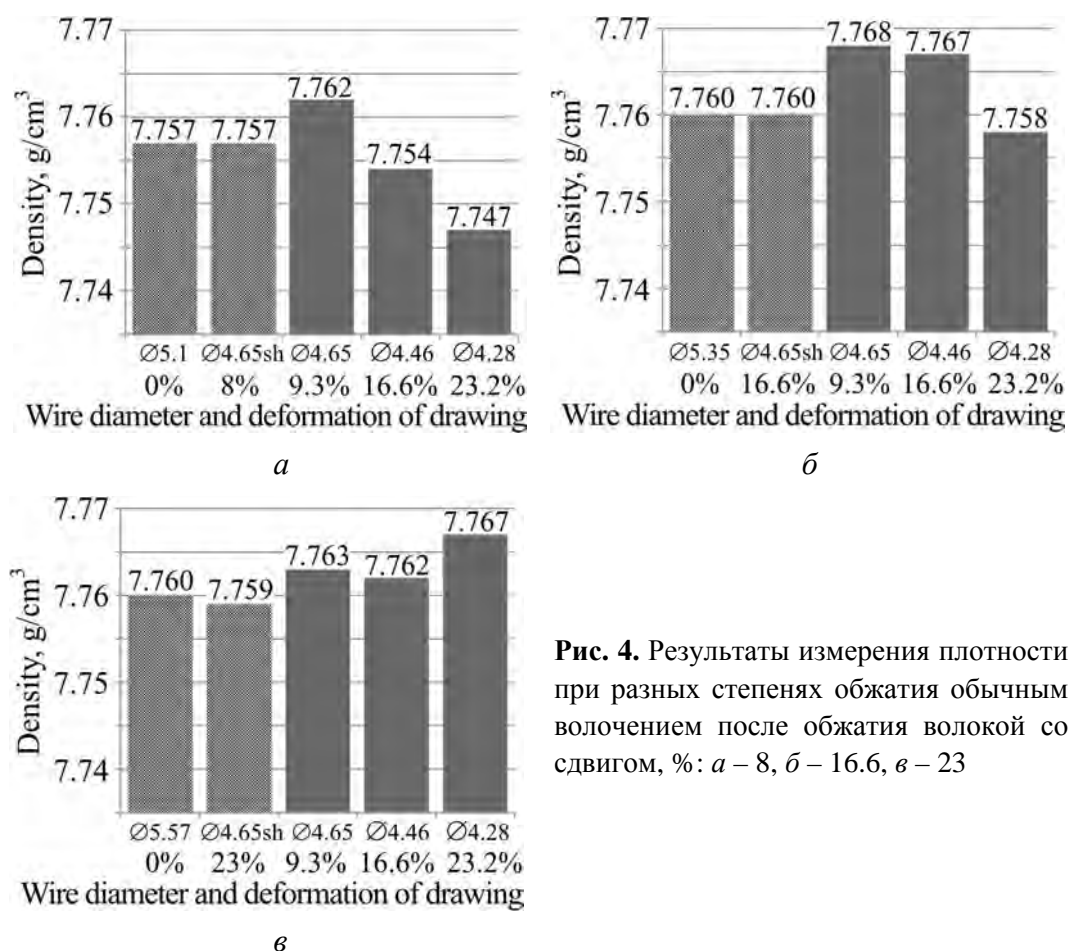


Рис. 4. Результаты измерения плотности при разных степенях обжатия обычным волочением после обжатия волокой со сдвигом, %: а – 8, б – 16.6, в – 23

В пользу последнего соображения свидетельствует увеличение поперечного размера зерна на 20% при обжатиях в $23 + 23 = 46\%$ по сравнению с обжатиями $23 + 17 = 40\%$ (табл. 2). Примечательно, что при этом наблюдается не уменьшение, а увеличение продольного размера зерна. Также следует отметить распределение (дробление) перлитных колоний в ферритном зерне и их более равномерное распределение по ферриту. В то же время при меньших обжатиях релаксационные процессы либо не развиваются, либо развиваются в меньшей степени.

Применение сдвиговой волоки приводит к росту микротвердости (рис. 5). С увеличением степени обжатия сдвиговой волокой наблюдается тенденция к уменьшению анизотропии микротвердости (значения в продольном и поперечном сечениях). Это, безусловно, положительное явление, поскольку вызывает повышение ресурса пластичности проволоки.

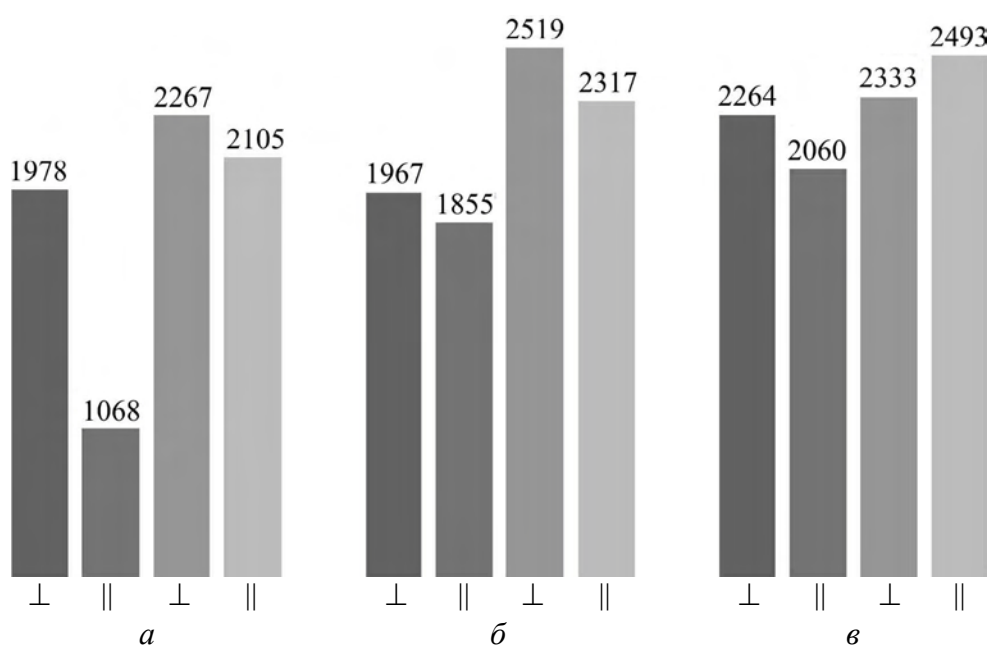
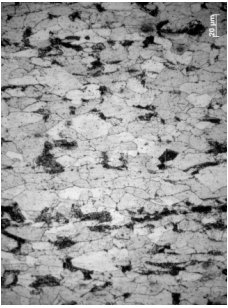
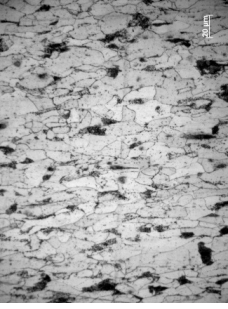
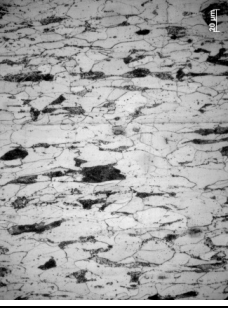
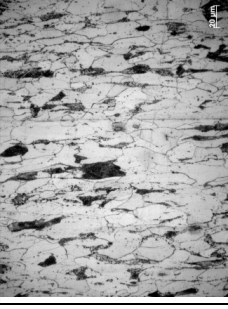
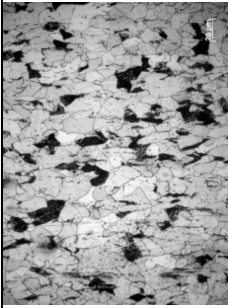
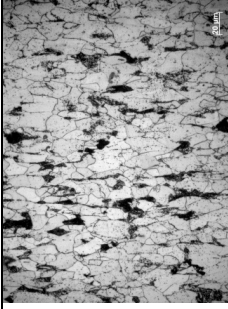
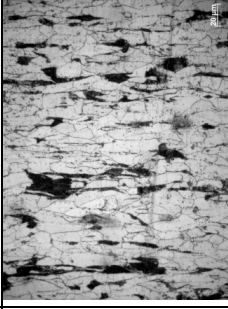
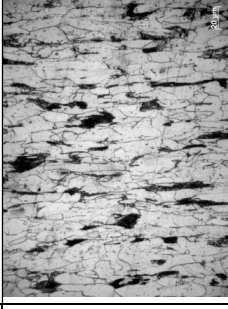
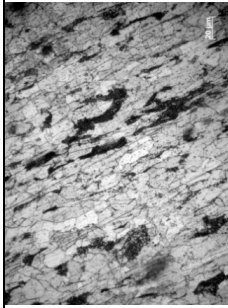
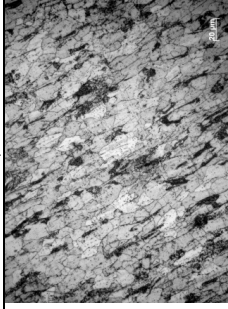
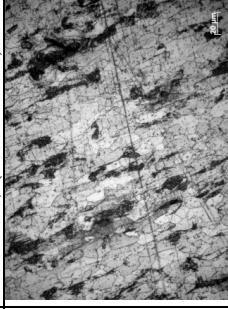
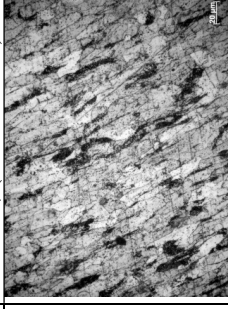
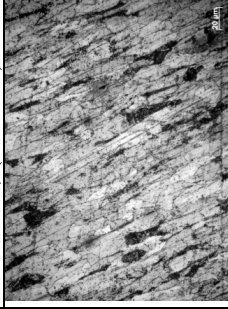
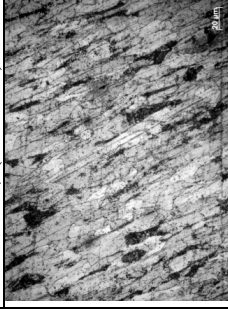


Рис. 5. Микротвердость проволоки в поперечном (\perp) и продольном (\parallel) сечениях при переходе с круглой проволоки ($\varnothing 5.1, 5.35, 5.57$) на проволоку со сдвигом ($\varnothing 4.65$) при разных степенях обжатия проволокой со сдвигом, %: *a* – 8, *b* – 16.6, *v* – 23

При этом обжатия сдвиговой волокой в 23% приводят к несколько меньшим значениям микротвердости, чем в случае 16.6%, что обусловлено особенностями структуры, а именно ростом ферритных зерен и переориентировкой (поворотом) перлитных включений относительно оси волочения.

Рассмотрим более подробно изменения зеренной структуры при разных режимах деформации. С ростом степени обжатия при волочении сдвиговой волокой микроструктура становится более мелкой: ферритные зерна уменьшаются, размер перлитных колоний сокращается в 1.5% раза, цементитные пластины раздроблены и однороднее распределены по ферриту внутри перлитных колоний. Такое изменение структуры является ожидаемым, поскольку большие частичные обжатия сдвиговой волокой и должны приводить

Таблица 2
Оптическая микроскопия проволоки после обжатия сдвиговой волокой при увеличении степени деформации обычным волочением (продольное сечение, центр, увеличение $\times 500$)

Схема волочения (см. рис. 1)	Вид волоки			
	круглая	сдвиговая	круглая	
Режим 1	 Ø5.57, 0%	 Ø4.65, 23%	 Ø4.65, (23 + 9.3)%	 Ø4.46, (23 + 16.6)%
Режим 2	 Ø5.35, 0%	 Ø4.65, 16.6%	 Ø4.65, (16.6 + 9.3)%	 Ø4.46, (16.6 + 16.6)%
Режим 3	 Ø5.1, 0%	 Ø4.65, 8%	 Ø4.65, (8 + 9)%	 Ø4.28, (8 + 16.6)%
			 Ø4.28, (23 + 23)%	 Ø4.28, (8 + 23)%

к измельчению структуры. Наиболее мелкая и однородная структура возникает тогда, когда обжатия составляют $17 + 23 = 40\%$ или $23 + 17 = 40\%$ (см. табл. 2). Причем при этих обжатиях не только измельчается само зерно, но и внутри него формируется большая плотность субграниц. Этим фактом объясняется высокая микротвердость рассматриваемых образцов.

Исключение составляет режим волочения «сдвиговая волока (8%) + круглая волока (23%)». При сочетании «сдвиговая волока (23%) + круглая волока (23%)» в пределах погрешности плотность вырастает. Примечателен тот факт, что при этом наблюдается не уменьшение размера зерна, а увеличение. Также наблюдается распределение (дробление) перлитных колоний в ферритном зерне (табл. 3). Это явление приводит к перераспределению перлита по объему зерна феррита. Кроме того, обнаружен эффект дробления цементитных пластин, что хорошо видно при рассмотрении продольного сечения проволоки. После сдвиговой волоки ориентировка цементита вдоль оси волочения не наблюдается, а сами пластины крошатся и превращаются в глобули.

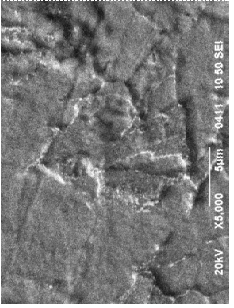
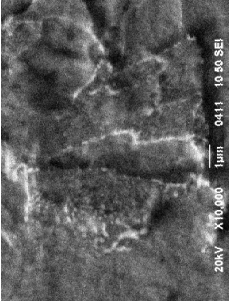
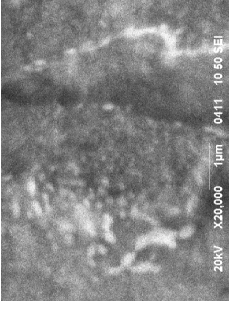
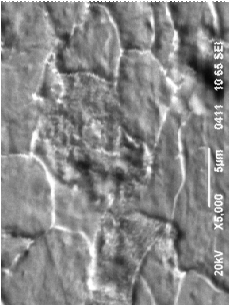
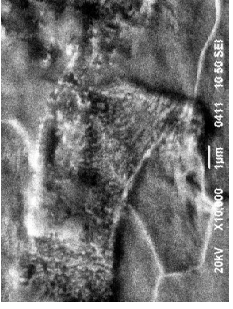
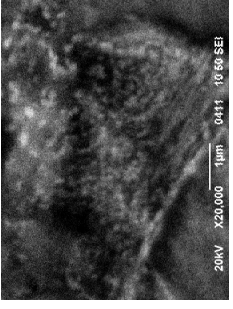
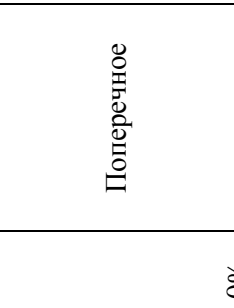
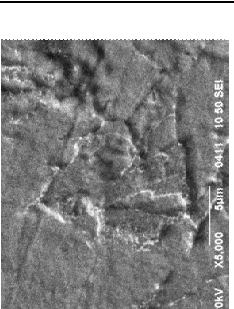
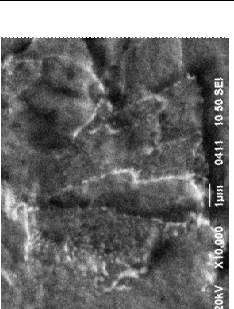
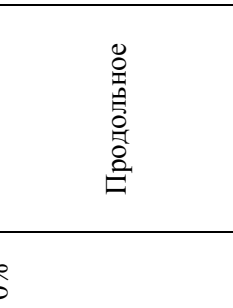
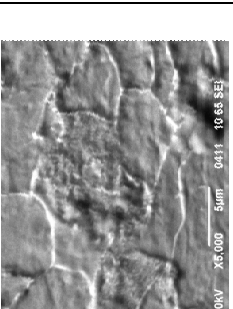
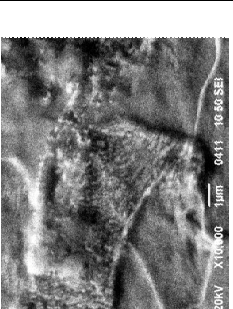
Данные факты являются важным доказательством того, что волочение со сдвигом может приводить не только к последовательному уменьшению размера зерен и, как следствие, к росту прочности с падением пластичности, но и к увеличению роста зерна и снижению темпа повышения прочности с ростом пластичности. Следует учесть, что ранее также был обнаружен рост ферритных зерен и переориентировка (поворот) перлитных включений относительно оси волочения. Эти три фактора (увеличение плотности и размера зерна, меньший прирост микротвердости) позволяют обоснованно предположить, что все вышеперечисленные явления объясняются развитием динамической полигонизации, что приводит и к росту зерен, и к снижению пористости вследствие перемещения границ зерен и аннигиляции пор. С практической точки зрения этот факт интересен, поскольку процесс волочения проволоки можно не прекращать ввиду отсутствия порывов вследствие формирования пор. Данные эффекты позволяют реализовать повышение пластичности проволоки без отжига в процессе волочения до технически необходимого уровня.

С увеличением степени обжатия круглой волокой после предварительного применения сдвиговой волоки наблюдается тенденция к разупрочнению. Большие обжатия сдвиговой волокой приводят к большим значениям прочности. Следует отметить, что сочетание «сдвиговая волока (23%) + круглая волока (23%)» приводит к несколько большему разупрочнению, однако достигнутый уровень предела прочности в этом случае все равно выше, чем при меньших обжатиях.

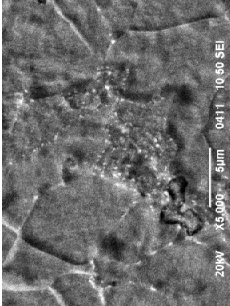
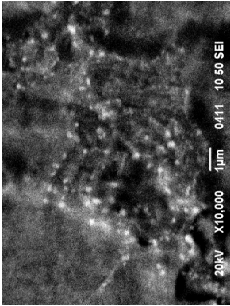
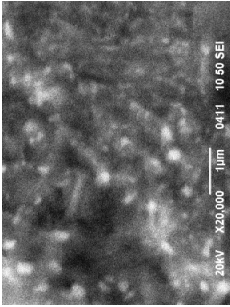
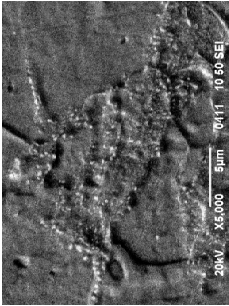
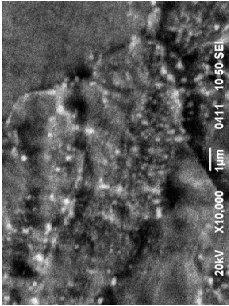
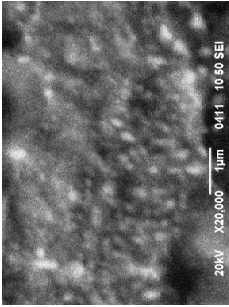
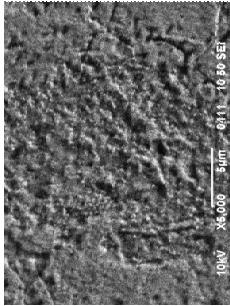
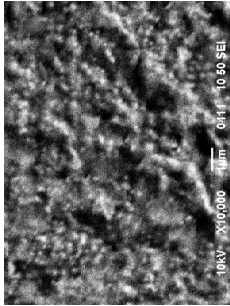
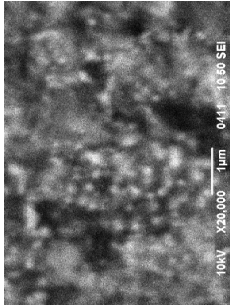
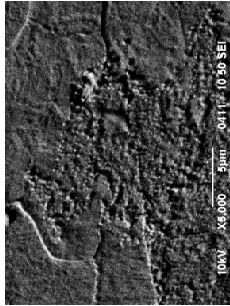
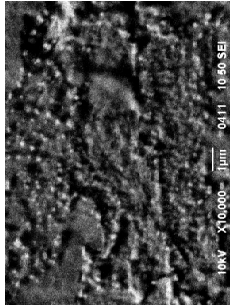
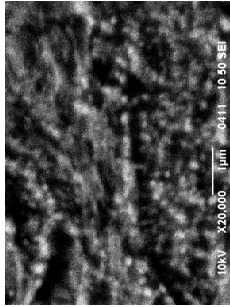
После применения круглых волок вслед за сдвиговой волокой пластичность ведет себя традиционным образом, т.е. падает с ростом степени деформации.

Наблюдается тенденция к увеличению относительного сужения с повышением степени обжатия круглой волокой после сдвиговой волоки. При этом большие обжатия сдвиговой волокой приводят к большим значениям ψ . Нужно отметить ту особенность, что применение круглой волоки после сдвиговой вызывает падение относительного удлинения, однако последующее

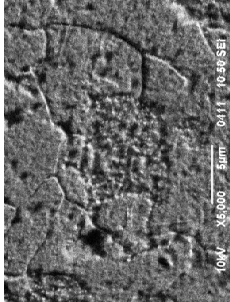
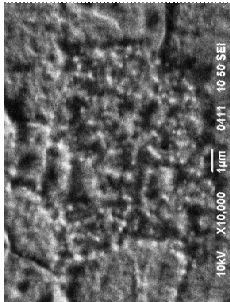
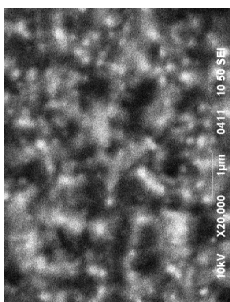
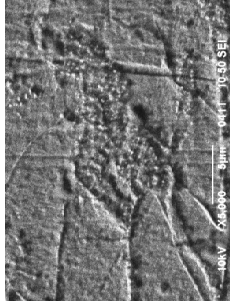
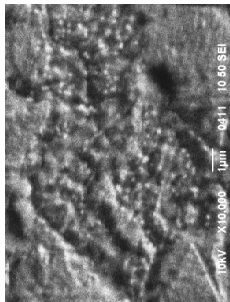
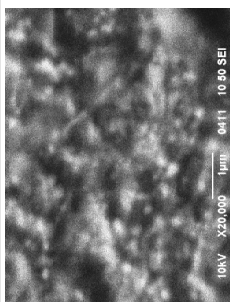
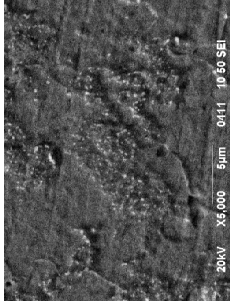
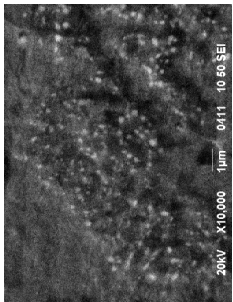
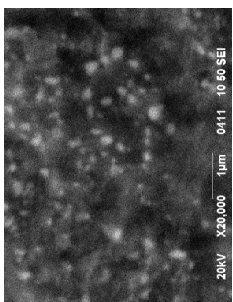
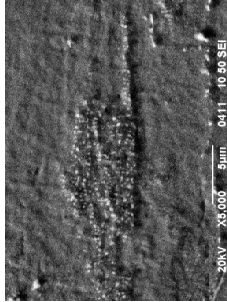
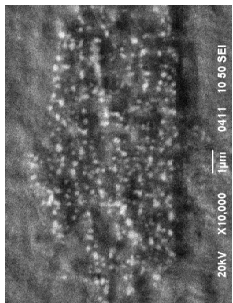
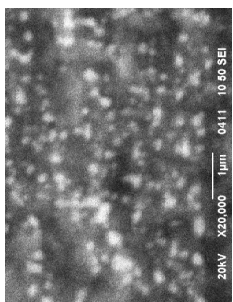
Таблица 3
Растровая микроскопия проволок в поперечном и продольном сечениях после обжатия 23% сдвиговой волокой при увеличении степени деформации обычным волочением

Вид волокна, диаметр проволоки, частичные обжатия в %	Сечение	Увеличение		
		×5000	×10000	×20000
Круглая, Ø5.57, 0%	2	1	2	3
		3	4	5
	Поперечное			
				
Продольное				
				

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
<p>Сдвиговая, $\varnothing 4.65$, 23%</p>	<p>Поперечное</p>			
	<p>Продольное</p>			
<p>Сдвиговая в круглую, $\varnothing 4.65$ в $\varnothing 4.65$, (23 + 9)%</p>	<p>Поперечное</p>			
	<p>Продольное</p>			

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
Сдвиговая в круглую, Ø4.65 в Ø4.46, (23 + 17)%	Поперечное			
Сдвиговая в круглую, Ø4.65 в Ø4.46, (8 + 17)%	Продольное			
Сдвиговая в круглую, Ø4.65 в Ø4.28, (8+23)%	Поперечное			
	Продольное			

использование круглой волоки приводит к увеличению относительного сужения. Такое нетрадиционное поведение ψ говорит о наследовании структуры, сформированной сдвиговой волокой, а само явление может быть использовано при создании новой технологии волочения со сдвигом для увеличения пластичности проволоки.

Выводы

1. С увеличением степени обжатия сдвиговой волокой снижается прирост прочности, т.е. сдвиговая волока при больших обжатиях в сравнении с круглой волокой приводит к меньшему упрочнению проволоки.

2. С увеличением степени обжатия сдвиговой волокой относительное удлинение δ падает до одного и того же уровня для всех обжатий, т.е. удлинение δ не зависит от степени обжатия сдвиговой волокой. Поэтому величину δ целесообразно использовать в качестве контрольного параметра при разработке новой технологии волочения со сдвигом.

3. Применение сдвиговой волоки приводит к росту относительного сужения для всех вариантов обжатий. Относительное сужение ψ с ростом степени обжатия сдвиговой волокой существенно (на 19–25%) увеличивается, причем, чем больше обжатие сдвиговой волокой, тем больше повышение уровня. Это благоприятный факт, поскольку относительное сужение обычно тесно связано с технической пластичностью проволоки во время волочения и в рассматриваемом случае разработки новой технологии волочения со сдвигом ψ также может быть использовано как контрольный параметр.

4. Обжатие сдвиговой волокой вызывает рост микротвердости. С увеличением степени обжатия наблюдается тенденция к уменьшению анизотропии микротвердости (значения в продольном и поперечном сечениях). Это, безусловно, положительное явление, т.к. вызывает увеличение ресурса пластичности проволоки. При этом обжатия сдвиговой волокой в 23% приводят к несколько меньшим значениям микротвердости, чем в случае обжатия в 16.6%, что обусловлено особенностями структуры, а именно ростом ферритных зерен и переориентировкой (поворотом) перлитных включений относительно оси волочения. Данный факт является важным доказательством того, что волочение со сдвигом может приводить не только к последовательному уменьшению размера зерен и, как следствие, к росту прочности с падением пластичности, но и к увеличению роста зерна и снижению темпа роста прочности с ростом пластичности. Это отличие от классических схем волочения и является тем физическим процессом, который позволяет реализовать повышение пластичности проволоки без отжига в процессе волочения до технически необходимого уровня.

5. С ростом степени обжатия при волочении сдвиговой волокой микроструктура становится более мелкой: ферритные зерна уменьшаются, перлитные колонии имеют в 1.5% раза меньший размер, цементитные пластины раздроблены и однороднее распределены по ферриту внутри перлитных колоний. Это

изменение структуры является ожидаемым, так как большие частичные обжатия сдвиговой волокой и должны приводить к измельчению структуры.

6. При обжатии сдвиговой волокой плотность в пределах погрешности не меняется. При последующем обжатии круглой волокой («сдвиговая волока + + круглая волока») плотность для всех случаев обжатий увеличивается. Это означает, что смена сдвиговой волоки на круглую приводит к залечиванию пор за счет изменения направления течения металла. Данное явление служит дополнительным благоприятным фактором для повышения технологической пластичности при волочении со сдвигом. Дальнейшее увеличение обжатий при использовании круглых волок приводит к классической картине понижения плотности с ростом частичного обжатия. Исключение составляет режим волочения «сдвиговая волока (8%) + круглая волока (23.2%)». При сочетании «сдвиговая волока (23%) + круглая волока (23%)» в пределах погрешности плотность вырастает. Примечателен тот факт, что при этом наблюдается не уменьшение размера зерна, а увеличение. Также наблюдается распределение (дробление) перлитных колоний в ферритном зерне. Это явление можно образно назвать «растягиванием перлита по зерну феррита».

Следует учесть, что ранее также был обнаружен эффект меньшего повышения микротвердости, связанный с ростом ферритных зерен и переориентировкой (поворотом) перлитных включений относительно оси волочения. Эти три факта (увеличение плотности и размера зерна, меньший прирост микротвердости) позволяют обоснованно предположить, что все вышеперечисленные явления объясняются развитием динамической полигонизации, что приводит и к росту зерен, и к снижению пористости в результате перемещения границ зерен и аннигиляции пор. С практической точки зрения этот факт также интересен, поскольку достоверно показано, что процесс волочения проволоки, как правило, прекращают из-за многочисленных порывов вследствие формирования пор.

7. Наблюдается тенденция к разупрочнению с увеличением степени обжатия круглой волокой после предварительного применения сдвиговой волоки. Большие обжатия сдвиговой волокой приводят к высоким значениям прочности. Следует отметить, что сочетание «сдвиговая волока (23%) + + круглая волока (23%)» приводит к несколько большему разупрочнению, однако достигнутый уровень предела прочности в этом случае все равно выше, чем при меньших обжатиях.

8. После применения круглых волок вслед за сдвиговой пластичность ведет себя традиционным образом, т.е. падает с ростом степени деформации.

9. Наблюдается тенденция к увеличению относительного сужения с повышением степени обжатия круглой волокой после сдвиговой волоки. При этом большие обжатия сдвиговой волокой приводят к высоким значениям ψ . Нужно отметить ту особенность, что применение круглой волоки после сдвиговой вызывает падение относительного удлинения, однако последующее использование круглой волоки приводит к увеличению ψ . Такое нетрадиционное поведение относительного сужения свидетельствует о наследо-

вании структуры, сформированной сдвиговой волокой, а само явление может быть использовано при создании новой технологии волочения со сдвигом для увеличения пластичности проволоки.

1. *Е.М. Киреев, М.Н. Шуляк, А.В. Столяров*, Сталь № 3, 56 (2009).
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*, Mater. Sci. Eng. **A574**, 68 (2013).
4. *М.В. Чукин, А.Г. Рааб, В.И. Семенов*, Вестник Магнитогорского государственного технического университета № 4, 33 (2012).
5. *Sun Kwang Hwanga, Hyun Moo Baeka, Il-Heon Sonb, Yong-Taek Ima, Chul Min Baeb*, Mater. Sci. Eng. **A579**, 118 (2013).
6. *Jung Wan Leea, Hyun Moo Baeka, Sun Kwang Hwanga, Il-Heon Sonb, Chul Min Baeb, Yong-Taek Ima*, Materials & Design **55**, 898 (2014).

E.H. Pashinskaya, A.V. Zavdoveev, A.A. Maksakova, V.N. Varyukhin, A.A. Tolpa, V.M. Tkachenko

EFFECT OF DRAWING DIES WITH SHEAR ON THE STRUCTURE AND THE PROPERTIES OF LOW-CARBON STEEL

The changes in the structure and the properties of low-carbon wire in the course of drawing with shear have been studied. It is demonstrated that the main specific feature of the application of the shear drawing dies is the tendency to softening of the wire when the reduction ratio increases. In the course of the classical drawing through the round dies, the strength properties are enhanced contrary to the plastic ones. It has been found that the application of the dies with shear allows pore healing, grain size variation and obtaining the wire of the set diameter characterized by a high level of the strength and plasticity. The found effects formed the basis of a suggested high-tech method of wire drawing without an interpass annealing.

Keywords: low-carbon steel, drawing with shear, strength, plasticity

Fig. 1. Drawing scheme (percentage of pass reduction is marked)

Fig. 2. Mechanical properties of the wire at varied reduction when a round die ($\varnothing 5.1, 5.35, 5.57$) is followed by a shear die ($\varnothing 4.65$): a – yield strength, b – contraction ratio

Fig. 3. Yield strength of the wire at varied reduction by the conventional drawing after the reduction in the shear die, %: a – 8, b – 16.6, c – 23

Fig. 4. The results of the density measurements at varied reduction by the conventional drawing after the reduction in the shear die, %: a – 8, b – 16.6, c – 23

Fig. 5. Microhardness of the wire in the transversal section (\perp) and in the longitudinal sections (\parallel) when a round die ($\varnothing 5.1, 5.35, 5.57$) is followed by the shear die ($\varnothing 4.65$) at varied reduction by the shear die, %: a – 8, b – 16.6, c – 23