

УДК 621.77.014

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОВОЛОКЕ ИЗ СТАЛИ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2018 М.А. Полякова, Д.А. Горленко, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Статья поступила в редакцию 26.09.2018

В работе описан метод комбинированной пластической деформации проволоки. Сущность метода состоит в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения и сжатия при волочении, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения. Преимуществами такой схемы деформации является использование имеющегося в метизном производстве инструмента, простота установки. Приведена схема лабораторной установки, позволяющей реализовать на проволоке различные виды пластической деформации: растяжение, сжатие, знакопеременный изгиб, кручение. В качестве объекта исследования была выбрана углеродистая проволока из стали перлитного класса марки 50, поскольку она является востребованным видом метизной продукции. Приведены режимы деформационной обработки проволоки. В ходе экспериментальных исследований установлено влияние вида деформационной обработки на текстуру, механические свойства и уровень остаточных напряжений проволоки из стали марки 50. Текстура и остаточные напряжения исследованы рентгеновским методом на дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 с использованием K_{α} излучения хромового анода. Образцы для рентгеноструктурного анализа готовили путем запрессовывания тесно уложенных проволочек, что позволило повысить точность измерения уровня остаточных напряжений и текстуры. Анализ аксиальной текстуры проводили с помощью дифрактометрических кривых $I(\alpha)$. Анализ напряжений осуществляли по линии (211) α -фазы (двойной угол дифракции $2\theta \approx 156^\circ$). Показано, что кристаллографическая текстура после всех видов деформационной обработки (волочения, знакопеременного изгиба и кручения) становится двухкомпонентной: $\langle 110 \rangle + \langle 111 \rangle$. Это способствует повышению пластичности и прочностных свойств проволоки и подтверждает, что текстура является одним из решающих факторов в формировании механических свойств. Результаты проведенных исследований показали, что метод комбинированной пластической деформации обладает существенным преимуществом по сравнению с действующей технологией производства стальной проволоки.

Ключевые слова: Углеродистая проволока, волочение, знакопеременный изгиб, кручение, механические свойства, текстура, остаточные напряжения.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее перспективными материалами для изготовления проволоки являются стали перлитного класса. Проволока и изделия из неё (арматура, канаты, пружины, металлические сетки и т.п.) находят массовое применение и определяют эффективность работы

Полякова Марина Андреевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Горленко Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий металлургии и литейных процессов. E-mail: d.gorlenko@magtu.ru

Пивоварова Ксения Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Гулин Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник инженерингового центра. E-mail: a.gulin@magtu.ru

многих сложных машин и конструкций. Непрерывно возрастающие требования к основным физико-механическим свойствам металлов и сплавов и их эксплуатационным характеристикам требуют не только создания новых материалов, но и разработки прогрессивных технологий производства изделий и полуфабрикатов уже существующих промышленных сплавов с улучшенными механическими свойствами, которые способствовали бы снижению материалоемкости изделий [1].

В этой связи активно развивается научное направление по созданию в сталях ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Причем, наиболее эффективно измельчают структуру до УМЗ и даже наноструктурного состояний методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Получение такого типа структуры позволяет в разы повышать прочностные характеристики металлических материалов, однако, несмотря

на многочисленные разработки, современные способы ИПД обладают рядом существенных ограничений, прежде всего в аспекте непрерывности и производительности технологических схем [2]. Поэтому поиск высокопроизводительных схем формирования УМЗ структуры в металлах на базе традиционных процессов обработки металлов давлением (ОМД) является важным этапом для получения «объемных» длинномерных заготовок, пригодных для использования в машиностроении и строительстве [3–10].

В настоящее время коллективом ученых ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» разработан метод непрерывного деформационного наноструктурирования стальной проволоки [11, 12], который, с одной стороны, обеспечивает формирование УМЗ структуры, с другой – по своим техническим и технологическим характеристикам совместим с существующими процессами металлургического и метизного производств. Сущность метода состоит в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения и сжатия волочением, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения [13]. Волочение проволоки с одновременным знакопеременным изгибом металла и его вращением вокруг своей продольной оси в зоне между волоками позволяет обеспечить за цикл обработки значительные суммарные деформации. При этом благодаря большим сдвиговым деформациям в обрабатываемом металле формируется УМЗ структура с повышенными прочностными и пластическими свойствами.

Особенностям формирования УМЗ структуры и механических свойств углеродистой стальной проволоки при непрерывном деформационном наноструктурировании посвящено достаточно много публикаций [14–16]. Однако при этом отсутствуют исследования о текстурном состоянии проволоки. Вопросам тексту-

рообразования в металлах в последнее время уделяется все большее внимание, так как при грамотном использовании данного явления существует резерв для повышения потребительских свойств продукции [17, 18]. Кроме того, следует учитывать наличие остаточных напряжений, формируемых в готовых изделиях после пластического деформирования, т.к. они с одной стороны могут ухудшать эксплуатационные свойства, с другой – являться весьма эффективным средством повышения многих характеристик металла (например, вибрационной и усталостной прочности) [1, 19, 20].

Целью настоящей работы является исследование текстуры, определение и анализ остаточных напряжений в проволоке из стали перлитного класса после различных схем комбинированного деформационного воздействия (волочения, знакопеременного изгиба, кручения).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана углеродистая проволока из стали марки 50. Химический состав и механические свойства проволоки в исходном состоянии представлены в табл. 1 и 2.

В работе приведены результаты экспериментов с использованием установки (рис. 1), позволяющей реализовать на проволоке различные виды пластической деформации: растяжение волочением, знакопеременный изгиб и кручение [21].

Проволока с начальным диаметром 3,45 мм заправлялась в первую по ходу ее движения неподвижно закрепленную коническую волоку и далее направлялась в систему роликов, обеспечивающую знакопеременный изгиб проволоки. Далее проволока, имеющая после первой волоки диаметр 2,90 мм, поступала во вторую неподвижно закрепленную расположенную соосно с первой коническую волоку меньшего диаметра, после которой она имела диаметр 2,75 мм с последующим закреплением ее переднего конца в

Таблица 1. Химический состав (%) исследуемой стали

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
50	0,47 – 0,55	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08

Таблица 2. Механические свойства проволоки в исходном состоянии

Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
988	706	8,92	60,26

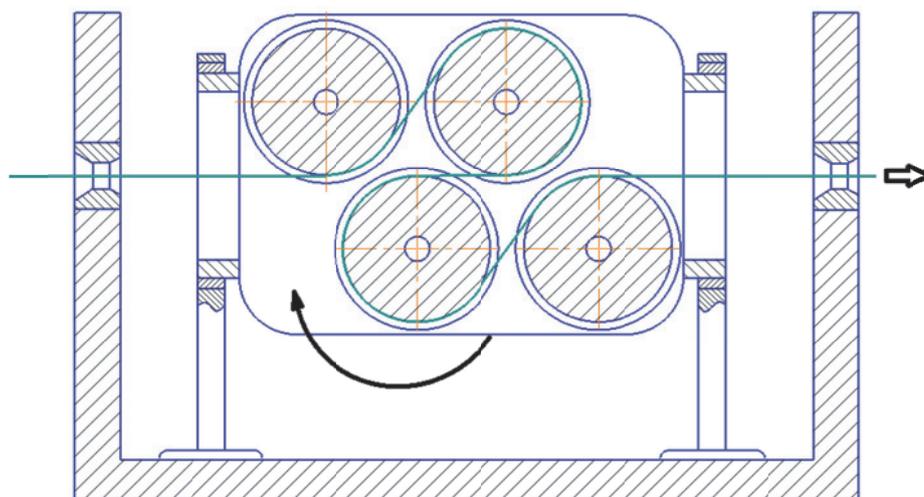


Рис. 1. Принципиальная схема установки для деформационного наноструктурирования стальной проволоки

намоточном устройстве. После этого осуществлялся процесс последовательной комбинированной деформации металла волочением за счет тянущего усилия, создаваемого вращением намоточного устройства. При этом одновременно с деформацией волочением в зоне между волоками производилась дополнительная деформация сдвигом за счет вращения системы роликов вокруг продольной оси металла, обеспечивающей совместный знакопеременный изгиб металла и его вращения вокруг своей продольной оси. Причем в процессе последовательной деформации металла скорости его перемещения в осевом направлении и вращения вокруг своей продольной оси поддерживались постоянными. Процесс обработки производился при комнатной температуре со скоростью 0,06 м/с. При волочении использовалась волочильная смазка СВС-У. Диаметры роликов скручивающего блока были равны 90 мм. Расстояния между выходом из первой волоки до входа на ролик скручивающего блока и между выходом с ролика скручивающего блока до входа во вторую волоку были равны 330 мм и 250 мм соответственно. Скорость вращения преформатора принималась равной 50 и 150 об/мин. В табл. 3 приведены принятые для исследования режимы деформационной обработки.

Полученные таким образом образцы после различных видов деформационной обработки

использовали для исследования текстуры, остаточных напряжений и механических свойств проволоки.

Текстура проволоки и остаточные напряжения были исследованы рентгеновским методом на дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 с использованием K_{α} излучения хромового анода.

Образцы для рентгеноструктурного анализа готовили путем запрессовывания тесно уложенных проволочек длиной 15 мм (рис. 2). Это позволило увеличить полезную для анализа площадь и повысить точность измерения уровня остаточных напряжений и текстуры.



Рис. 2. Образец для рентгеноструктурного анализа

Таблица 3. Режимы комбинированной деформационной обработки

№ режима	Волочение	Изгиб	Кручение
	Маршрут	Диаметр роликов, мм	Скорость вращения, об/мин
1	3,45 → 2,90 → 2,75	отсутствует	отсутствует
2		90	отсутствует
3			50
4			150

При пластической деформации волочением кристаллиты вытягиваются и разворачиваются в направлении деформации, в результате чего возникает так называемая осевая или аксиальная текстура. Аксиальная текстура (неограниченная или текстура волочения) возникает, если определенные кристаллографические направления (ось текстуры) во всех зернах устанавливаются параллельно какому-либо внешнему направлению, для проволоки – это направление волочения. Все возможные варианты расположения кристаллической решетки в проволоке с аксиальной текстурой можно представить вращением одного кристалла вокруг направления, установленного вдоль оси ориентировки. В данном случае направление $\langle 111 \rangle$ (пространственная диагональ куба) совпадает с осью волочения. При этом нормали к плоскостям куба будут равномерно заполнять окружность на стереографической проекции. Это обстоятельство позволяет при определении преимущественной ориентировки на рентгеновском дифрактометре вести съемку образца без вращения, полагая, что в исследуемом объеме материала равновероятно наличие кристаллических плоскостей развернутых относительно оси текстуры на 360° . Для точного определения аксиальной текстуры необходимо исследовать дифракцию от плоскостей, имеющих как можно меньший коэффициент повторяемости в интервале углов от 0° до $70...75^\circ$. Поэтому в настоящем исследовании была выбрана плоскость (200), а угол менялся относительно оси волочения от -45° до $+135^\circ$. Это реализовано с помощью последовательного исследования двух образцов: с плоскостью параллельной оси волочения (от 45° до 135°) и перпендикулярной (от -45° до 45°). В исследовании используется относительная интенсивность, для исключения влияния качества подготовки поверхности и площади, с которой снимается дифракционная

картина. Значение относительной интенсивности – это отношение значения интенсивности от плоскости (200) к значению интенсивности фона при съемке. Анализ аксиальной текстуры проводили с помощью дифрактометрических кривых $I(\alpha)$.

Анализ напряжений осуществляли по линии (211) α -фазы (двойной угол дифракции $2\theta \approx 156^\circ$). Толщина анализируемого слоя, дающая 90 % интенсивности дифрагированного пучка, составляла 16 мкм.

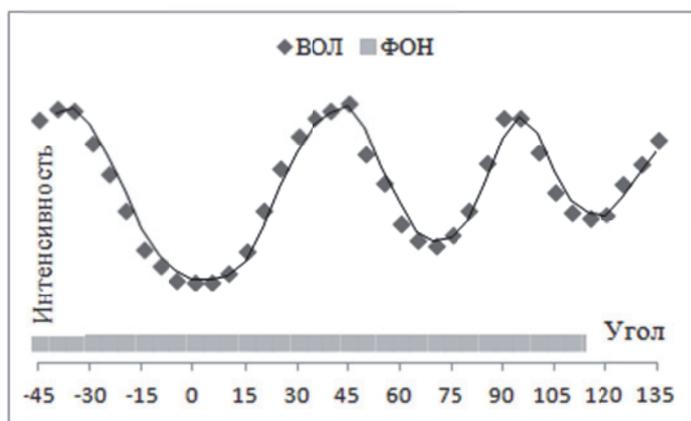
Микроискажения кристаллической решетки рассчитываются в программном пакете XRD: Stress Analysis, входящем в состав программного обеспечения рентгеновского дифрактометра, в котором прописаны необходимые коэффициенты для определения остаточных напряжений в α -железе.

Механические свойства проволоки исследовали по стандартным методикам ГОСТ 1044680, ГОСТ 9450-60 и ГОСТ Р 8.748-2011(ИСО 14577-1:2002).

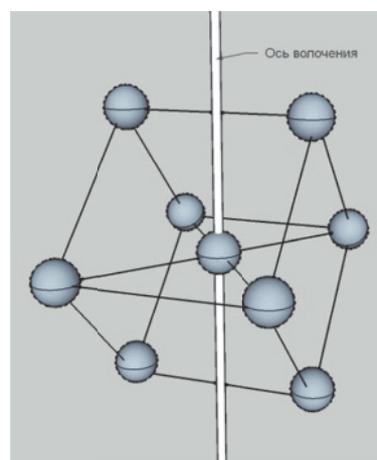
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образец после волочения («ВОЛ») имеет однокомпонентную текстуру $\langle 110 \rangle$ с небольшим углом рассеяния (порядка $10...15^\circ$) (рис. 3, а), а ось волочения совпадает с плоскостной диагональю куба (рис. 3, б).

После волочения с изгибом без кручения проволоки («0») наблюдается изменения в ее текстуре. Один из характерных минимумов интенсивности дифракции смещается с отметки 0° на отметку 15° , при этом один из характерных максимумов не меняет угол и остается на отметке 90° относительно оси волочения (рис. 4, а). Это свидетельствует о том, что изгиб вносит разориентировку между осью текстуры и кристаллографическим направлением $\langle 110 \rangle$ на 15° (рис. 4, б).

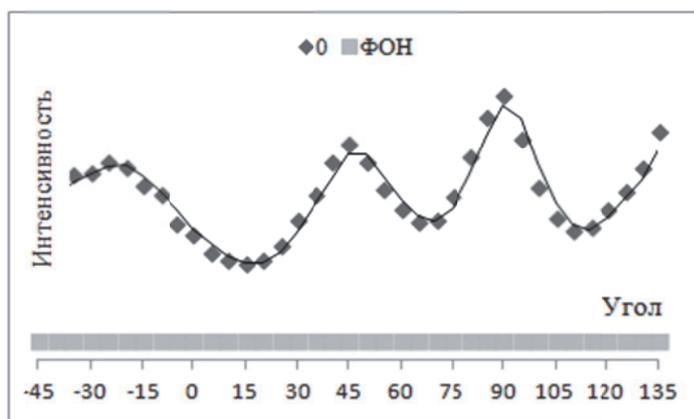


а

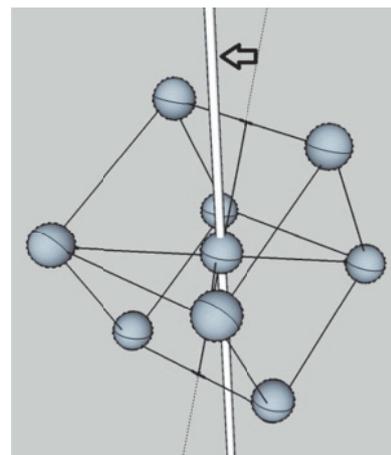


б

Рис. 3. Дифрактограмма (а) и графическое представление ориентировки кристаллической решетки (б) в образце после волочения



а



б

Рис. 4. Дифрактограмма (а) и графическое представление ориентировки кристаллической решетки (б) в образце после волочения изгиба

При этом степень текстурированности уменьшается: увеличивается угол рассеяния текстуры, увеличивается количество разориентированных кристаллитов (уменьшается разность интенсивностей между максимумами и минимумами на дифрактограмме).

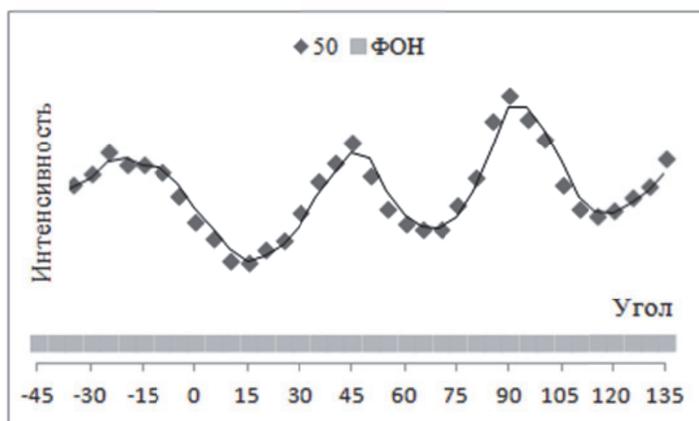
Совместное воздействие волочения, изгиба и кручения со скоростью 50 об/мин («50») меняют характеристики текстуры. Характерный минимум интенсивности начинает обратное смещение с 15° и оказывается в районе 10° , при этом характерный максимум перпендикулярный оси волочения увеличивает свою ширину (рис. 5). Такие изменения говорят о начале смещении оси текстуры в сторону направления $\langle 111 \rangle$.

Увеличение скорости кручения проволоки до 150 об/мин приводит к постепенному снижению текстурированности образца. Текстура увеличивает угол рассеяния до $20...25^\circ$, уменьшается разность между интенсивностью максимумов и минимумов на дифрактограмме (рис. 6).

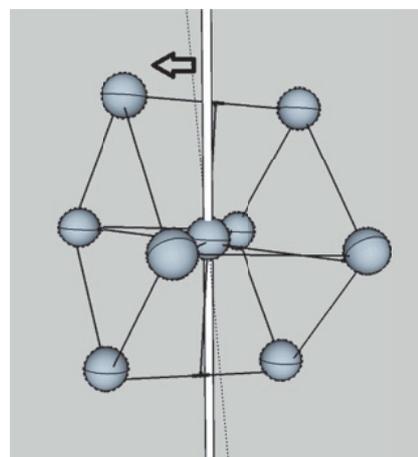
Кроме этого происходит смещение оси текстуры в сторону кристаллографического направления $\langle 111 \rangle$. Такое заключение можно сделать исходя из анализа максимумов на дифрактограмме: постепенно исчезает пик дифрагирующий при угле $\alpha = 90^\circ$; максимум, дифрагировавший только в волоченном образце при угле -45° , после изгиба и кручения смещается в сторону меньших углов. Это говорит о том, что текстура становится двухкомпонентной: $\langle 110 \rangle + \langle 111 \rangle$ (рис. 7, а, б).

В результате деформационной обработки проволоки при температуре ниже температуры рекристаллизации формируется наклепанная структура, которая характеризуется высокой твердостью и значительными остаточными напряжениями, которые в зависимости от режима обработки могут либо увеличиться, либо снизиться при релаксации.

После волочения в проволоке формируются значительные сжимающие напряжения, действующие в радиальном направлении перпенди-



а



б

Рис. 5. Дифрактограмма (а) и графическое представление ориентировки кристаллической решетки (б) в образце после волочения, изгиба и кручения со скоростью 50 об/мин

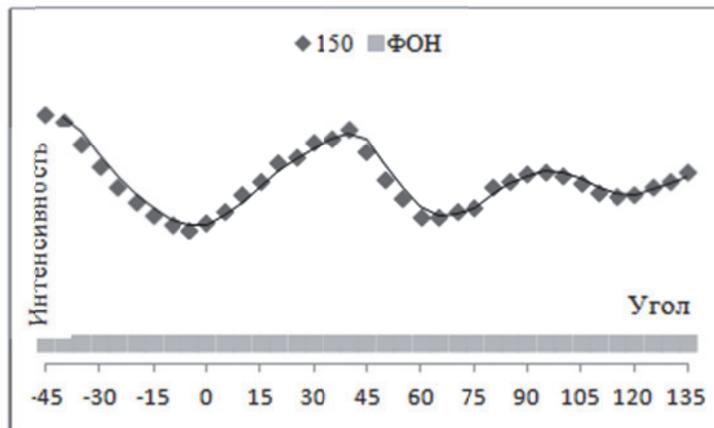


Рис. 6. Дифрактограмма образца после волочения, изгиба и кручения со скоростью 150 об/мин

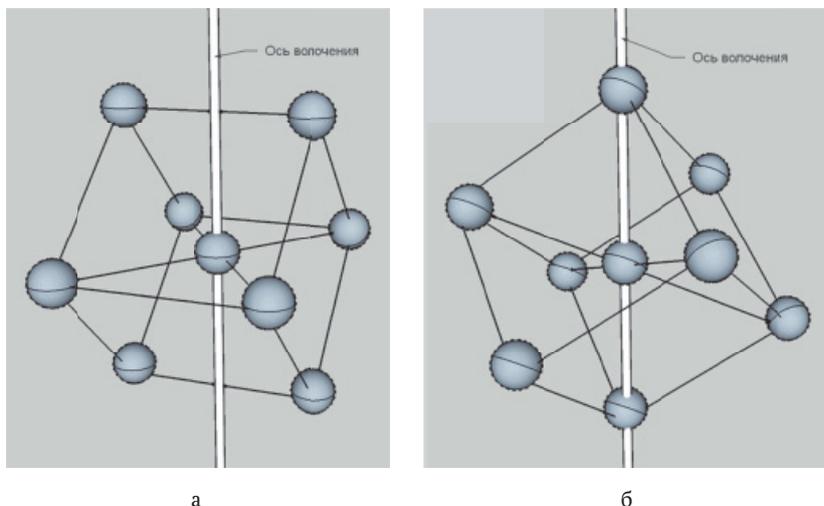


Рис. 7. Графическое представление двухкомпонентной текстуры: $\langle 110 \rangle$ (а) + $\langle 111 \rangle$ (б)

кулярно оси волочения. Значение этих напряжений составляет -405 МПа. В процессе волочения с изгибом остаточные напряжения снижаются до -453 МПа. Если к волочению и изгибу добавляется кручение со скоростью 50 об/мин, то это еще понижает уровень остаточных напряжений до -462 МПа. Дальнейшее увеличение скорости кручения проволоки до 150 об/мин меняет характер изменения остаточных напряжений: они резко увеличиваются до значения -288 МПа (рис. 8).

Механические свойства проволоки после комбинированной пластической деформации представлены в табл. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После волочения проволока имеет неблагоприятную текстуру. Кристаллическая решетка ориентирована преимущественно так, что наиболее плотноупакованная плоскость (110) перпендикулярна оси волочения. Поэтому деформация происходит по менее благоприятной плоскости (100), лежащей под углом в 45° к оси волочения. Это же обстоятельство является причиной столь высоких значений остаточных напряжений.

Волочение с изгибом приводит к смещению оси текстуры в сторону направления $\langle 100 \rangle$. Однако уровень остаточных напряжений в направлении перпендикулярном оси волочения увеличивается, что говорит о сохранении неблагоприятной ориентировки кристаллитов.

Волочение с изгибом и кручением проволоки с различными скоростями приводит к изменению текстуры. Кристаллическая решетка меняет свою ориентацию таким образом, что часть кристаллитов ориентируются направлением $\langle 111 \rangle$ вдоль оси деформации. Процесс изменения текстуры проходит тем полнее, чем выше скорость вращения проволоки. Эта текстура наиболее предпочтительна для дислокационного скольжения, поэтому происходит интенсивное снижение остаточных напряжений в радиальном направлении.

Исследованные в настоящей работе зависимости хорошо коррелируются с полученными данными механических свойств образцов, таких как относительное удлинение и сужение, а также временное сопротивление и условный предел текучести. Показано, что с увеличением скорости вращения проволоки относительное сужение и удлинение проволоки увеличивается.

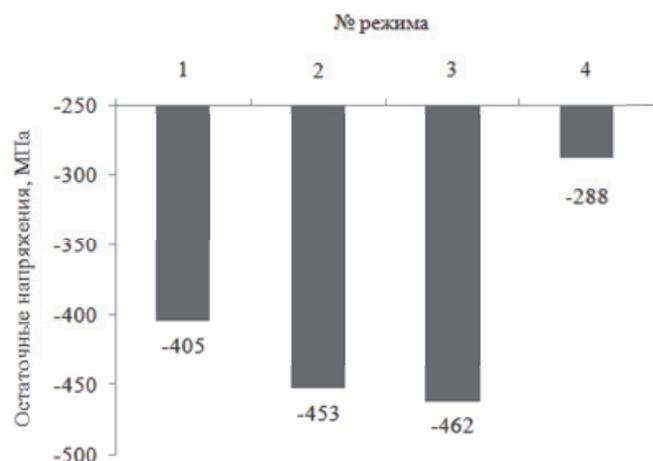


Рис. 8. Зависимость значения остаточных напряжений от режима деформационной обработки

Таблица 4. Механические свойства проволоки после различных режимов деформационной обработки

№ режима	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
1	1434	1286	3,16	53,62
2	1440	1338	2,36	48,74
3	1406	1274	3,04	49,92
4	1382	1152	3,18	52,08

Это также подтверждает, что текстура является одним из решающих факторов в формировании механических свойств.

ВЫВОДЫ

В процессе волочения в проволоке формируется неблагоприятно ориентированная текстура, затрудняющая дислокационное скольжение и приводящая к увеличению прочностных свойств и затруднению релаксации напряжений.

Изгиб совместно с волочением не приводит к благоприятному изменению текстуры, при этом увеличивается значение остаточных напряжений.

Вращение проволоки в процессе волочения и изгиба приводит к формированию текстуры, при которой процесс дислокационного скольжения облегчается, поэтому происходит снижение уровня сжимающих остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и технологическая прочность осесимметричных металлоизделий, полученных пластическим деформированием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2002. 16 с.
2. Рааб А.Г. Разработка процесса изготовления проволоки из низкоуглеродистой стали повышенной прочности и износостойкости совмещенным

- методом волочения со сдвигом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2018. 16 с.
3. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации. Донецк: Изд-во «Вебер» (Донецкое отделение), 2009. 352 с.
4. Сегал В.М. Развитие обработки материалов интенсивной сдвиговой деформацией // Металлы. 2004. № 1. С. 5-15.
5. Рааб Г.И., Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование по схеме «Конформ» длинномерных наноструктурных полуфабрикатов их титана // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2008. № 1. С. 21 – 27.
6. Исследование процесса деформирования заготовок в равноканальной ступенчатой матрице / А.Б. Найзабеков, Ж.А. Ашкеев, С.Н. Лежнев, А.Р. Толеулова // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 16-18.
7. Saito Y., Tsuji N., Utsunomya H. Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process // Scripta Mater. 1998. V. 39. № 9. P. 1221-1227.
8. Huang J.L., Zhu I.T., Jiang H. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and strengthening // Acta Mater. - 2001. V. 49. № 9. P. 1497-1505.
9. Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры // Вестник научно-технического развития. 2013. № 4 (68). С. 29-36.
10. Глезер А.М. Основные направления использования нанотехнологий в металлургии // Металлург. 2010. № 1. С. 5-7.
11. Чукин М.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М. и др. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением: Пат. 2467816 (РФ). 2012.

12. Полякова М.А., Чукин М.В., Голубчик Э.М. и др. Устройство для изготовления проволоки с ультрамелкозернистой структурой: Пат. 130525 (РФ). 2012.
13. Полякова М.А., Гулин А.Е. Создание непрерывного метода деформационного наноструктурирования на основе совмещения операций // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 6. С. 624-630.
14. Чукин М.В., Полякова М.А., Гулин А.Е. Особенности влияния комбинирования различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства углеродистой проволоки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 552-557.
15. Polyakova M., Calliari I., Gulin A. Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716. P. 201-207.
16. Особенности формирования ультрамелкозернистой структуры и механических свойств проволоки после непрерывного метода деформационного наноструктурирования / М.А. Полякова, А.Е. Гулин, О.А. Никитенко, Д.В. Константинов, М.С. Жербцов // Сталь. 2014. № 5. С. 93-96.
17. Текстурирование на этапах изготовления медной проволоки / С.Л. Демаков, М.А. Иванова, А.Г. Илларионов, Ю.Н. Логинов // Кабели и провода. 2012. № 2 (333). С. 8-12.
18. Усов В.В. Влияние текстуры деформации и отжига на анизотропию физико-механических свойств некоторых металлов и сплавов с кубической решеткой: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1984. 242 с.
19. Заруцкий А.В. Анализ остаточных напряжений после упрочнения отверстия методом барьерного обжатия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 60. С. 85-92.
20. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, А.В. Тропотов, М.А. Горланов, В.П. Семенов // Достижения в теории и практике трубного производства: Материалы 1-й Российской конференции по трубному производству «Трубы России - 2004». Екатеринбург: Издательство Уральского государственного технического университета, 2004. С. 87-97.
21. Особенности влияния комбинирования различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства углеродистой проволоки / М.В. Чукин, М.А., Полякова, К.Г. Пивоварова, Ю.Ю. Ефимова, А.Е. Гулин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 7. С. 572-578.

INVESTIGATION OF TEXTURE AND RESIDUAL STRESSES OF PEARLITE CARBON STEEL WIRE AFTER COMBINED PLASTIC DEFORMATION

© 2018 M.A. Polyakova, D.A. Gorlenko, K.G. Pivovarova, A.E. Gulin

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Method of combined deformational processing of carbon steel wire is presented in the paper. The essence of the method consists in applying on the continuously moving wire the deformation of tension and compression at drawing, bending and torsion kinds of deformation when passing the four-rolls system. Advantages of the method consist in using tools of metal ware manufacturing and simplicity of the equipment. The scheme of the laboratory setup which makes it possible to apply on the wire different kinds of plastic deformation (tension, compression, alternate bending, torsion) is presented. Pearlite carbon steel wire with 0.5 %C was chosen as an object for investigation as the in-demand metal product. Modes of the carbon steel wire combined deformational processing are presented. The effect of deformational processing on texture, mechanical properties and residual stresses in carbon steel wire with 0.5% C was found studied experimentally. Texture and residual stresses were investigated by X-ray analysis using K_{α} – radiation of chromium anode of SHIMADZU XRD-7000 diffractometer. The accuracy of residual stresses and texture measurement during X-ray analysis was improved by special sample preparation when pieces of the carbon steel wire after deformational processing were tightly pressed in the special polymer. The axial texture was investigated by diffractometer $I(\alpha)$ curves. Residual stresses were estimated along the (211) line of α -phase (double diffraction angle $2\theta \approx 156^\circ$). It was shown that crystallographic texture after all kinds of deformational processing by drawing, alternate bending and torsion and their combination became doublecomponent: $\langle 110 \rangle + \langle 111 \rangle$. This promotes the increase of carbon steel wire strength and ductile properties after combined deformational processing and proves the high importance of texture in ensuring the mechanical properties level. The obtained experimental results showed that the method of combined deformational processing by drawing with alternate bending and torsion has significant advantage as compared with industrial technology of carbon steel wire manufacturing due to possibility to improve its mechanical properties in a wide range.

Keywords: carbon steel wire, drawing, alternate bending, torsion, mechanical properties, texture, residual stresses.

Marina Polyakova, Doctor of Science in Technology, Professor of the Department of Material Processing.

E-mail: m.polyakova@magtu.ru

Dmitrii Gorlenko, PhD in Technology, Senior Lecturer of the Department of Foundry Production and Material Science.

E-mail: d.gorlenko@magtu.ru

Ksenia Pivovarova, PhD in Technology, Associate Professor, Department of Material Processing.

E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Aleksandr Gulin, PhD in Technology, Associate Research Fellow of Engineering Center. E-mail: a.gulin@magtu.ru