
УДК 548.4; 539.3; 539.4

Д-р техн. наук Е. Г. Пашинская

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Донецк

СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕДИ МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ СО СДВИГОМ

Развит метод прокатки со сдвигом в калибрах с гребенчатой поверхностью для полосы, что позволяет создать условия интенсивной деформации в обрабатываемой меди. Метод обеспечивает формирование структурного состояния с регулируемой частью наноструктуры. Показано, что прокатка со сдвигом приводит к росту прочности на 30 % одновременно с ростом пластических свойств на 15 %, в сравнении со стандартной технологией.

Ключевые слова: прокатка со сдвигом, прочность, пластичность, медь, наноструктура.

Введение

Научные центры США, Германии, России, Украины занимают ведущие позиции в мире по разработке и исследованиям структурной модификации перспективных и функциональных конструкционных материалов. С целью повышения физических и механических свойств материалов уделяется значительное внимание проблеме получения материалов с измененным соотношением прочность-пластичность с помощью методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Авторами [1–5] предлагаются и развиваются новые методы ИПД путем винтовой экструзии, равноканального углового прессования, ковки и др. Однако до сих пор не решена проблема получения материалов с новыми свойствами в массовых количествах для применения в промышленности.

В то же время в Дон ФТИ НАНУ развит деформационный метод (прокатка со сдвигом) для получения материалов с измененным соотношением прочностных и пластических свойств и регулируемой долей наноструктуры [6–8]. Метод представляет собой усовершенствованную стандартную технологию прокатки, в которой за счет дополнительного перетекания металла в поперечном направлении (относительно оси прокатки) создаются дополнительные сдвиговые напряжения.

Материалы и методика исследований

Целью данной работы является исследование эффектов структурной модификации меди после прокатки со сдвигом; изучение физико-механических свойств материалов при варьировании схемы и степени деформации; установление закономерностей формирования структурно модифицированного состояния в металлах и сплавах с применением прокатки со сдвигом, по сравнению с традиционной схемой.

В качестве исследуемого материала применяли образцы из меди марки М1, химический состав которой приведен в таблице 1. Образцы для исследования представляли собой полосу, полученную после прокатки. Заготовкой для прокатки служил литой прутки диамет-

ром 25 мм, отожженный при температуре 600 °С в течение 4 часов. Исходный размер зерна перед прокаткой составлял 250 мкм.

Для получения полосы прокатка выполнялась в калибрах с гребенчатой поверхностью. Исходную заготовку многократно деформировали в системах калибров, что позволило в результате структурной модификации сформировать структуру с измененным соотношением прочность-пластичность. Прокатка осуществлялась на стане 100. Номинальный диаметр бочки валков – 100 мм, ширина бочки – 200 мм; материал валков – сталь 45, HRC 25÷30. Скорость прокатки на стане регулировалась от 0 до 0,2 м/с (валки вращались со скоростью от 0 до 40 об/мин). Мощность двигателя составляла 1,5 кВт. Передача вращения к валкам осуществлялась через редуктор и шестеренную клеть.

Прокатка для получения полосы выполнялась по четырем режимам: на гладких валках (далее режим № 1), на валках с продольными проточками (режим № 2), на валках с поперечными проточками (режим № 3) и комбинированной прокаткой со сдвигом (сочетание продольных и поперечных проточек (режим № 4). Схематическое изображение валков с проточками приведено на рисунке 1.

Микроструктуру отожженного и деформированных образцов исследовали при увеличениях 100÷3000 на приборе «Neophot-32» после многократной полировки и травления на границы зерен (состав травителя: персульфат аммония – 10 г, перекись водорода – 10 мл, вода – 50 мл). Фотографирование осуществляли цифровой камерой «Nikon». На образцах в поперечном и продольном направлениях проводили количественную оценку размеров зерен и их фрагментов. По каждой фотографии выполнено 100 измерений. Также осуществляли измерение твердости по Виккерсу HV (нагрузка 200 г) и микротвердости H_m (нагрузка 25 г). Погрешность измерений составила $\pm 5\%$. Измерения плотности образцов проводили методом гидростатического взвешивания. Испытания на прочность выполняли на машине Schenck-100 при температуре 20 °С и скорости нагружения 10 мм/мин согласно ГОСТу 25.601-80.

Таблица 1 – Химический состав меди М1, % (масс.) (ГОСТ 859-2011)

Fe	Ni	S	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn	Cu+Ag
≤ 0,005	≤ 0,002	≤ 0,004	≤ 0,002	≤ 0,005	≤ 0,05	≤ 0,002	≤ 0,001	≤ 0,002	≥ 99,9

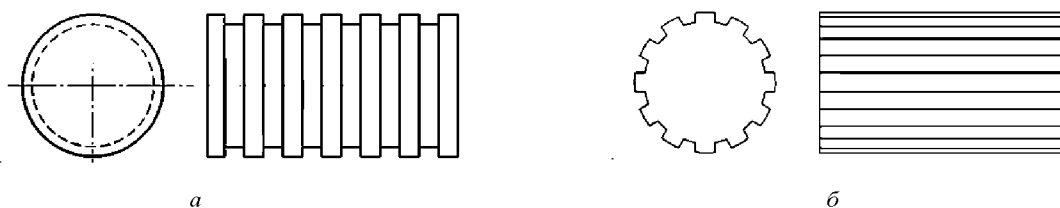


Рис. 1. Валки с поперечными (а) и продольными (б) проточками

Полученные результаты и их обсуждение

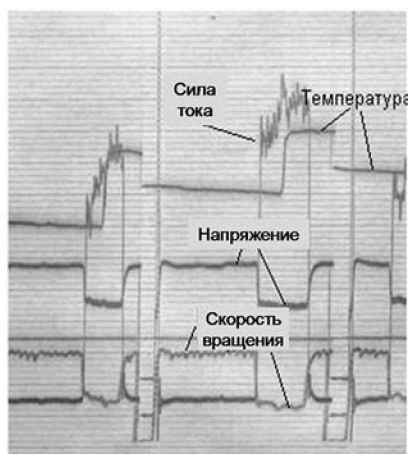
На рис. 2, а представлены данные замера параметров при процессе прокатки по разным режимам. Видно, что в процессе захвата и прокатки образца происходит снижение скорости вращения валков и спад напряжения. При прокатке по режиму № 1 сила тока изменяется скачкообразно, но при этом возрастает. Также с определенным запаздыванием наблюдается повышение температуры, составляющее около 20 °С.

При прокатке по режиму № 4, также как и для режима № 1, происходит снижение скорости вращения валков и спад напряжения. Сила тока изменяется неоднозначно: сначала она резко возрастает, а потом снижается до исходного значения. Что касается температуры, то как и для предыдущего способа прокатки наблюдается инерционность системы: повышение температуры происходит с запаздыванием. Однако для данного вида прокатки оно составляет около 50 °С, т. е. в 2,5 раза больше, чем для прокатки по режиму № 1.

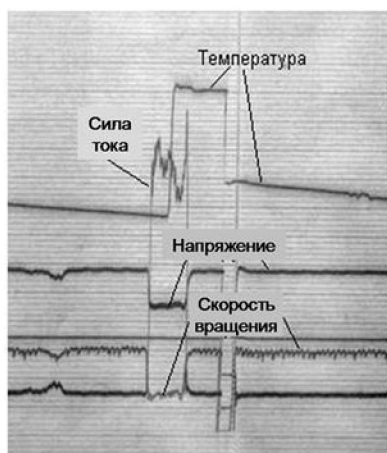
Такое значение повышения температуры говорит о том, что при комбинированной прокатке материала

было введено значительно больше энергии, чем при традиционной, и подведенная механическая энергия превратилась в тепловую, что обусловило повышение температуры материала из-за интенсивности деформации. Можно предположить, что такое сильное повышение температуры в результате комбинированной прокатки создадут условия для формирования специфической структуры и свойств меди. Поэтому целью первой части исследований было изучение влияния пластической деформации со сдвигом на структуру меди М1.

Для этого на подготовленных образцах был проведен микроструктурный анализ. Для оценки однородности деформации и выявления различий в структуре и свойствах разных объемов полосы она была разделена на части. Схема вырезки образцов приведена на рис. 3. На рис. 4 представлен график зависимости размера фрагмента для разных видов прокатки от места вырезки образца, полученный с применением оптической микроскопии.



а



б

Рис. 2. Данные самописца, полученные при прокатке:

а – на гладкой бочке, режим № 1,
б – при комбинированной прокатке, режим № 4

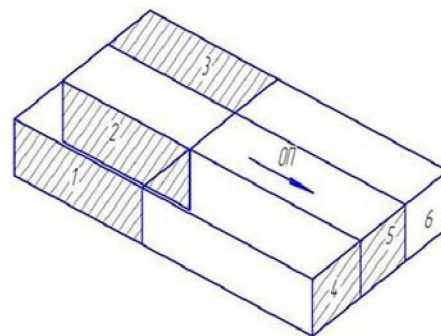


Рис. 3. Схема вырезки образцов:

области № 1, 2, 3 – продольное сечение, области № 4, 5 – поперечное сечение

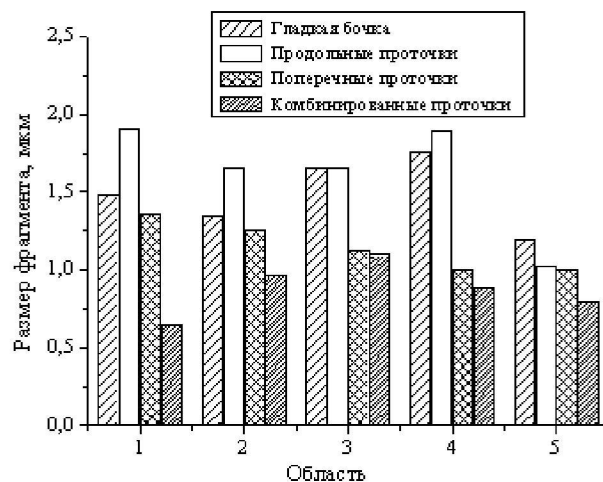


Рис. 4. Зависимость размера фрагмента от места вырезки образца для разных видов прокатки

Исследования исходных отожженных образцов показали, что их размер зерна составляет 250 мкм. Показано, что самый большой размер зерен ($d_{cp} = 1500$ нм) получается в результате прокатки по режиму № 2. Самой дисперсной ($d_{cp} = 750$ нм) является структура, полученная после прокатки по режиму № 4. На рис. 5 представлены данные просвечивающей электронной микроскопии, подтверждающие, что минимальный размер зерен в этом случае составляет около 300 нм.

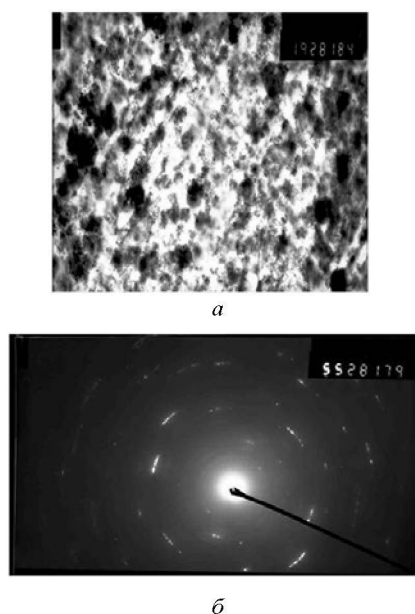


Рис. 5. Микроструктура меди после прокатки со сдвигом по режиму № 4:

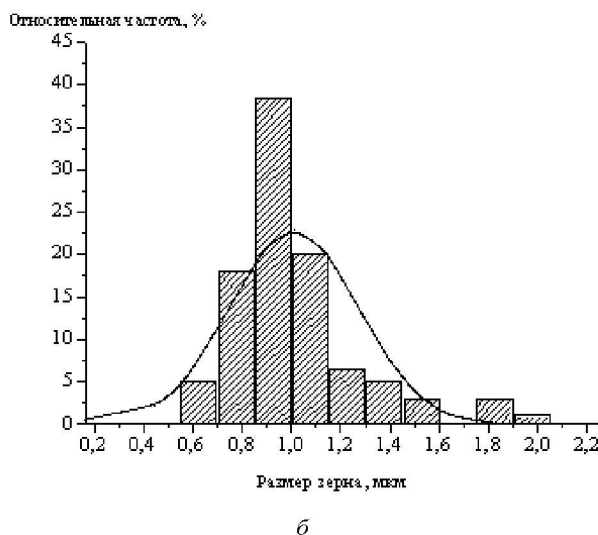
a – продольное сечение; *б* – поперечное сечение.
Данные ПЭМ, размер метки 0,3 мкм

Рассмотрим микроструктуру меди после комбинированной прокатки (режим № 4), полученную при увеличении Ч500 (рис. 6) на оптическом микроскопе. Структура состоит из участков с разной травимостью зерен. Каждый участок представляет собой совокупность равноосных и деформированных зерен разной формы. Формирование зерен разного типа объясняется тем, что в процессе прокатки осуществляется деформирование зерен, но когда степень деформации становится выше критической, то в ходе деформации развивается динамическая рекристаллизация. Вследствие этих процессов мы получаем структуру смешанного типа, состоящую из равноосных и деформированных зерен. Процессы фрагментации и рекристаллизации чередуются, что и приводит к поэтапному измельчению структуры, аналогично тому, как это наблюдали авторы [9–11].

С целью оценки влияния режима прокатки на размер зерен выполнен количественный микроструктурный анализ. На рис. 6 *б* представлена гистограмма распределения размеров субзерен в зависимости от способа обработки и области вырезки образцов.



a



б

Рис. 6. Типичное изображение структуры, полученной после прокатки по режиму № 4 (*a*) и ее частотное распределение по размерам зерен (*б*), *a* – оптическая микроскопия, $\times 500$

Видно, что максимальную частоту появления имеют зерна порядка 1 мкм. Аналогичные измерения были проведены для всех четырех способов прокатки во всех сечениях.

Из рис. 4 видно, что наибольший размер зерна получается в результате прокатки на валках с продольными проточками. Этому утверждению противоречат данные, полученные только для области 5. Там наибольшими являются зерна, полученные после прокатки на гладкой бочке. Для всех других областей размеры зерна, полученных после прокатки на гладкой бочке, немного меньше, чем после прокатки на валках с продольными проточками. Еще мельче зерна, полученные после прокатки на валках с поперечными проточками. Самой дисперсной является структура, полученная после комбинированной прокатки. Количественные характеристики размера зерен представлены в таблице 2.

Анализируя средний размер зерна, видим, что минимальный фрагмент наблюдается в результате прокатки по режиму № 4 – 0,88 мкм, чуть крупнее – после прокатки № 3 – 1,15 мкм, еще крупнее – после прокатки № 1 – 1,40 мкм, а наибольший – после прокатки на валках по режиму № 2 – 1,63 мкм.

На рис. 7 представлены образцы, вырезанные из плоскости полосы, расположенной под валком (№ 3 на рис. 3). Из фотографии видно, что изменение схемы

Таблиця 2 – Размер зерен в зависимости от вида обработки и области вырезки образца

Вид обработки	Средний размер зерна для областей №, мкм					Средний размер зерна для режимов прокатки, мкм
	1	2	3	4	5	
№ 1, гладкая бочка	1,49	1,35	1,67	1,76	1,20	1,49
№ 2, продольные проточки	1,91	1,66	1,66	1,90	1,01	1,63
№ 3, поперечные проточки	1,36	1,25	1,13	1,00	1,00	1,15
№ 4, комбинированная прокатка	0,65	0,97	1,09	0,89	0,80	0,88

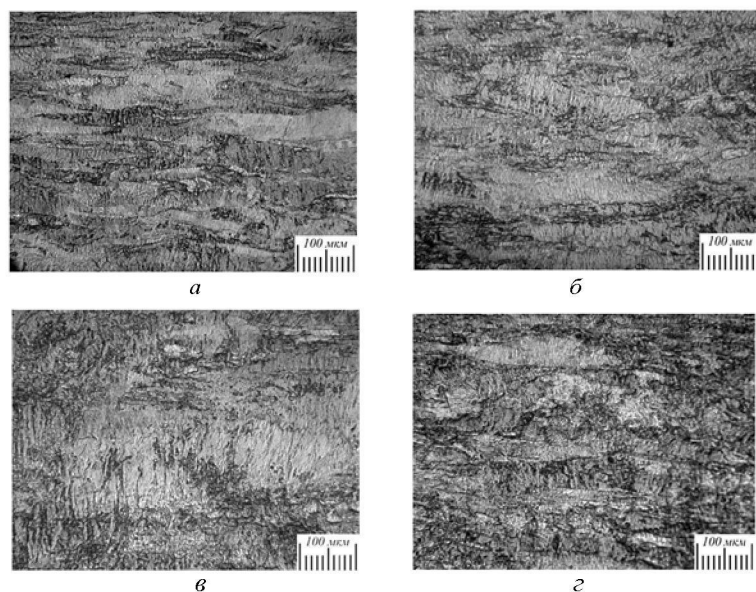
деформации приводит к усложнению «узора», оставшегося от валька. На рис. 7, *а* деформационные полосы слабо выражены. На рис. 7, *б* и 7, *в* полосы – тонкие, почти параллельные и четко выражены. На рис. 7, *г* представлены деформационные полосы сложной формы. Такое же явление наблюдается и в области № 1 и № 2. Исследование образцов, вырезанных из области № 4, перпендикулярно оси и плоскости прокатки, показало, что после традиционной прокатки зерна имеют нечеткие, слабо выраженные границы. После прокатки на вальках с продольными проточками наблюдаются зерна разных размеров, преимущественно короткие. После прокатки на вальках с поперечными проточками зерна преимущественно вытянутые. После комбинированной прокатки зерна вытянутые, волнообразные, проходят через весь объем подобно сетке. Микроструктура образцов, вырезанных из областей № 4 и 5, подобна. Но заметно, что для всех обработок, кроме комбинированной прокатки, в центре зерна менее деформированные, чем на краю. К краю зерна измельчаются и становятся более четко очерченными.

Можно сделать вывод, что прокатка на вальках с проточками вызывает перемешивание металла и обеспе-

чивает течение металла в разных направлениях. Прокатка на вальках с проточками способствует измельчению структуры. Также происходит формирование более сложной и рельефной структуры, более четкое очерчивание ее структурных элементов при режиме прокатки № 4 в сравнении с режимами № 1–3.

Для анализа наличия анизотропии микроструктуры необходимо сравнить продольные и поперечные срезы, для чего и было проведено сравнение областей № 2 и 5. Видно, что для всех видов обработки прослеживается наличие анизотропии микроструктуры. Сильнее всего она выражена на образцах, полученных после прокатки № 2, слабее – в результате прокатки № 1 и № 3. Наименее анизотропным является образец, полученный после комбинированной прокатки по режиму № 4.

Приведенные выше структуры являются мелкодисперсными. Известно, что материалы с малыми размерами зерен имеют особые свойства. Поэтому вторым этапом изучения подготовленных образцов стало исследование изменения. Результаты измерения микротвердости в зависимости от способа прокатки представлены на рис. 8.

**Рис. 7.** Фотографии микроструктур образцов, вырезанных из области № 3 после:

а – традиционной прокатки, *б* – прокатки на вальках с продольными проточками, *в* – прокатки на вальках с поперечными проточками, *г* – комбинированной прокатки

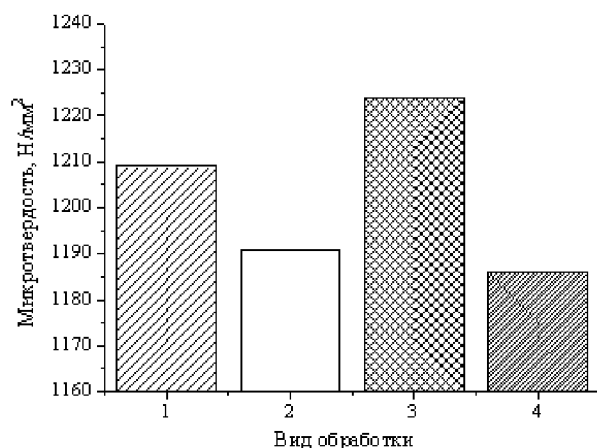


Рис. 8. Изменение микротвердости образца в зависимости от способа прокатки:

№ 1 – гладкая бочка, № 2 – продольные проточки, № 3 – поперечные проточки, № 4 – комбинированные проточки

Анализируя гистограмму, можно сказать, что максимальному увеличению микротвердости способствует прокатка меди по режиму № 3, меньшему – по режиму № 2, а минимальному – комбинированная прокатка № 4. Это говорит о том, что прокатка на валках с продольными проточками и комбинированная прокатка стимулируют процессы динамической рекристаллизации, благодаря чему материал можно деформировать с большими степенями. В подтверждение этой идеи в табл. 3 приведены данные о механических свойствах образцов. Видно, что прокатка со сдвигом позволяет повысить предел прочности, по сравнению с традиционной прокаткой. После прокатки по режиму № 3 и 4 также повышается и пластичность, особенно ярко это видно для режима № 4.

Анализируя данные, можно сказать, что комбинированная прокатка способствует как упрочнению материала, так и повышению его пластичности в максимальной степени. При этом заметно увеличивается только предел прочности, а предел текучести остается достаточно низким (как при традиционной прокатке). Это говорит о повышении запаса пластичности, то есть при деформировании материала таким образом можно затрачивать меньше энергии на деформацию и обжимать его с большими степенями.

Таблица 3 – Характеристики прочности и пластичности меди М1 после разных видов

Вид обработки	Начальная площадь F_0 , мм ²	Максимальная нагрузка P_{max} , кН	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_m , МПа	Относительное удлинение δ , %	Запас пластичности
Гладкая бочка	12,24	3,58	292	195	7,53	1,5
Продольные проточки	9,99	3,72	372	275	7,22	1,4
Поперечные проточки	10,64	4,14	389	296	7,78	1,3
Комбинированные проточки	13,50	5,00	371	211	8,62	1,8

Выводы

1. Развита метод прокатки со сдвигом для полосы в калибрах с гребенчатой поверхностью, что позволяет создать условия интенсивной деформации в обрабатываемом материале.

2. Метод прокатки со сдвигом обеспечивает формирование структурного состояния с регулируемой частью наноструктуры.

3. Комбинированная прокатка (сочетание продольных и поперечных проточек) позволяет сформировать наиболее дисперсную и однородную структуру, по сравнению со стандартной технологией.

4. Показано, что обработка приводит к росту прочности на 30 % одновременно с ростом пластических свойств на 15 %, в сравнении со стандартной технологией.

В заключение автор приносит благодарность Толпе А.А., Тищенко И.И., Ткаченко В.М. за помощь в проведении экспериментов и обсуждении полученных результатов.

Список литературы

1. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И.В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 98 с.
2. Мышляев М. М. Создание наноструктурного сверхпластичного состояния в сплавах на основе алюминия / М. М. Мышляев, М. М. Кулак, Е. Г. Пашинская // Наноструктурное материаловедение. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 217–222.
3. Изменение структуры и закономерности упрочнения меди при винтовой экструзии / [В.Н. Варюхин, Е.Г. Пашинская, В.М. Ткаченко, М.М. Мышляев] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – Т. 35, № 2. – С. 233–239.
4. Pashinska E. Mechanisms of structure formation in low-carbon steel at warm twist extrusion / E. Pashinska, V. Varykhin, S. Dobatkin // Emerging Materials Research. – 2013. – Vol. 2, issue EMR3. – P. 121–126.
5. Влияние винтовой экструзии на атомный порядок строительной стали / [З. А. Самойленко, Н. Н. Ивахненко, Е. А. Пушенко и др.] // Журнал технической физики. 2013. – Т. 83. – Вып. 7. – С. 82–86.
6. Пашинская Е. Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации / Е. Г. Пашинская. – Донецк : Вебер. – 2009. – 352 с.

7. Effect of rolling with shear technology on structure, properties and plasticity of low-carbon steel / E. Pashinska, V. Varyukhin, A. Zavdoveev, V. Stolyarov // Emerging Materials Research. – 2012. – Vol. 1. – P. 121–126.
8. Влияние прокатки со сдвигом на свойства катанки и проволоки из стали 08Г2С / [Е. Г. Пашинская, А. А. Толпа, М. М. Мышляев и др.] // Металлы. – 2011. – № 6. – С. 25–31.
9. Иванова В. С. Нелинейная динамика самоорганизации наноструктур при интенсивной пластической деформации металлов / В. С. Иванова, А. А. Корзников // Металлы. – 2002. – № 1. – С. 103–111.
10. Метод дифракции обратноотраженных электронов в анализе структур деформированной стали / [Е. Г. Пашинская, В. Н. Варюхин, А. В. Завдовеев и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 6. – С. 35–41.
11. Деформационное упрочнение и разупрочнение меди вследствие структурных перестроек меди при сложном нагружении / [Е. Г. Пашинская, В. Ю. Таренков, В. Н. Варюхин и др.]. – Деформация и разрушение. – 2007. – № 5. – С. 27–33.

Одержано 12.11.2013

Пашинська О. Г. Структурна модифікація міді методом холодної прокатки зі зсувом

Розвинуто метод прокатки зі зсувом у калібрах з гребінчатою поверхнею для смуги, що дозволяє створити умови інтенсивної деформації в оброблюваній міді. Метод забезпечує формування структурного стану з регульованою часткою наноструктури. Показано, що прокатка зі зсувом приводить до зростання міцності на 30 % одночасно зі зростанням пластичних властивостей на 15 % порівняно зі стандартною технологією.

Ключові слова: прокатка зі зсувом, міцність, пластичність, мідь, наноструктура.

Pashinska E. Modification of copper structure by the cold rolling with shear

The method of strip rolling with shear in grooves with comb-shaped surface is developed. It permits to create the conditions of intensive plastic deformation in processed copper. Method provides the formation of structure state with controlled fracture of nanostructure. It is shown that rolling with shear leads to strength increasing for 30 % simultaneously with growth of plastic properties for 15 % comparing to standard technology.

Key words: rolling with shear, strength, plasticity, copper, nanostructure.