

УДК 621.791:621.762

Гринь А. Г., Свиридов А. В., Шаповалов К. П.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
Порошковой проволоки для сварки меди**

В современном производстве все большее применение имеют методы автоматической сварки проволоками малых диаметров, в том числе изделий из меди и ее сплавов. Отсутствие промышленного изготовления порошковых проволок большого диаметра (4–6 мм) связано с отсутствием научно обоснованных процессов их производства и особенностями изготовления. Порошковые проволоки таких диаметров, изготовленные традиционной технологией – волочением, применения не нашли, в связи с тем, что увеличение сечения проволоки и величины сварочного тока вызывает повышение неравномерности плавления оболочки и наполнителя порошковой проволоки. Причем отставание плавления проявляется не зависимо от способа заполнения оболочки, (порошки, прессованные таблетки или спеченные гранулы) [1, 2]. В свою очередь это приводит к существенному ухудшению химической и механической однородности сварных швов, а, следовательно, их свойств. Особенно наглядно это проявляется при сварке конструкций из толстолистовой меди, например, формирующих секций кристаллизатора ЭШП. При сварке таких конструкций наряду с высокой химической и структурной однородностью металла сварного шва необходимо обеспечить его высокую электро- и теплопроводность.

Применение порошковых проволок более сложных конструкций [3, 4], в которых сердечник разделен на части несколькими токоведущими перегородками, позволяет уменьшить, но не исключить отставание плавления сердечника от металлической оболочки проволоки. Для таких проволок характерно уменьшение отношения толщины прослойки наполнителя и металлической основы проволоки.

Известно [1, 5, 6], что одной из основных проблем в процессе работы кристаллизаторов является недостаточная стойкость сварных соединений в условиях больших тепловых нагрузок, в результате чего сокращается срок эксплуатации конструкции, возникает дополнительный расход дефицитной меди и дорогостоящих сварочных материалов. Причиной снижения стойкости сварных соединений кристаллизаторов являются также образование пор, трещин в сварном шве или околошовной зоне.

Как отмечают авторы работ, посвященных сварке толстолистовой меди [5, 6], применение стандартных материалов и технологий не обеспечивает получения плотного качественного сварного соединения.

Целью настоящей работы является разработка конструкции порошковой проволоки, обеспечивающей химическую, структурную и механическую однородность сварных соединений меди.

Поставленная цель достигается применением прессованной порошковой проволоки (ППП). Ее изготовление основано на производстве металлической крупки из самозащитной порошковой проволоки для сварки меди и последующего прессования брикета, изготовленного из крупки [7, 9].

Самозащитную порошковую проволоку (СПП) трубчатой конструкции, состоящую из медной ленты  $0,5 \times 15$  мм и шихты, перетягивают до диаметра 3 мм, коэффициент заполнения составляет 16–18 %. Состав шихты [8], прессованной порошковой проволоки подбирали с учетом металлургических особенностей сварки меди. Проволока должна содержать компоненты, обеспечивающую хорошее раскисление и необходимую защиту сварочной ванны от взаимодействия с воздухом. Такими компонентами являются газо- и шлакообразующие (комплексные фторидные соединения) и активные раскислители (Zr, Ti, Al, Mn, Si) [1, 5]. Из СПП механическим способом изготавливали металлическую крупку, имеющую форму цилиндра, длина которого равна его диаметру. Такое соотношение обеспечивает сравнительно высокую начальную плотность заполнения заданного объема ( $\gamma_0 = 0,35 \dots 0,40$ ), определяемую волюметрическим методом [10]. Для исследования плотности заполнения от размеров

крупки использовали установку, сконструированную на основе волюметра модели STAV 2003 (фирма Engelsman AG, ФРГ), что позволяет производить замер с точностью  $0,01 \text{ г/см}^3$ . Необходимо отметить плотное закрывание торцов крупки при нарезании, что предотвращается просыпание шихты.

Полученную металлическую крупку размещали в контейнере (медный стакан), куда дополнительно могут вводиться боридные соединения, например  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , обеспечивающие химическую очистку поверхности крупки в процессе прессования. Стакан закрывается с двух сторон медными крышками. Температура нагрева заготовки не более  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура формирующей втулки  $360\text{--}380 \text{ }^\circ\text{C}$ . Прессование выполняли при следующих скоростях: в начале процесса  $5 \text{ мм/с}$ , в дальнейшем  $10\text{--}15 \text{ мм/с}$ . Прессование производили на горизонтально-гидравлическом прессе.

Уплотнение заготовки в процессе прессования происходит в три этапа. На первой стадии (рис. 1, кривая 1), уплотнение крупки происходит за счет бездеформационной перепакровки частиц. Межчастичное проскальзывание продолжается до состояния, когда частицы займут устойчивое положение и заканчивается, когда среда уплотнена до относительной плотности  $\rho_i = 0,45\text{--}0,50$  [9]. На данной стадии медная крупка образует весьма плотную упаковку, поскольку пустоты практически отсутствуют. На второй стадии (кривая 2) уплотнение происходит в основном за счет пластического деформирования и частично за счет проскальзывания частиц относительно друга.

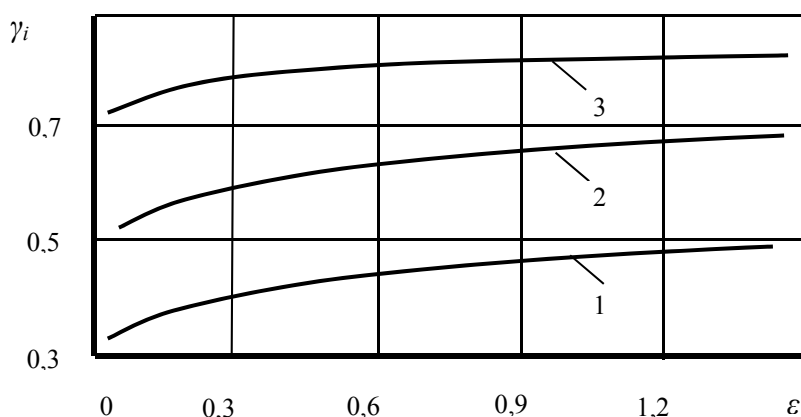


Рис. 1. Экспериментальное распределение относительной плотности  $\gamma_i$  порошковой крупки (наполнителя гильзы) на стадиях прессования

При этом пластическая деформация происходит только за счет деформации в местах контакта поверхностей. Данная стадия заканчивается при относительной плотности  $\rho_i = 0,60\text{--}0,70$ . На конечной стадии (кривая 3) при высоких давлениях имеет место деформация объема сердечника проволоки с пластическим истечением металла оболочки, при которой относительная плотность наполнителя гильзы близка к единице.  $\rho_i = 0,70\text{--}0,85$ . Последний этап соответствует завершению образования прессованной порошковой проволоки.

В результате прессования удалось получить проволоку диаметром 8 и 10 мм (рис. 2), без нарушения однородности по образующей. В некоторых местах на поверхности проволоки имеются выходы шихты в виде темных пятен, которые не влияют на прочностные свойства проволоки.

Включения расположены вдоль проволоки преимущественно в виде полос, наблюдается достаточно равномерное их распределение, при этом относительная плотность проволоки  $\gamma = 0,83$ , пористость  $\Pi = 17 \%$ . Качественное сцепление медной основы крупки при деформировании обеспечивает постоянную электро- и теплопроводность порошковой проволоки по сечению. Это свойство способствует равномерности плавления всех составляющих прессованной порошковой проволоки.

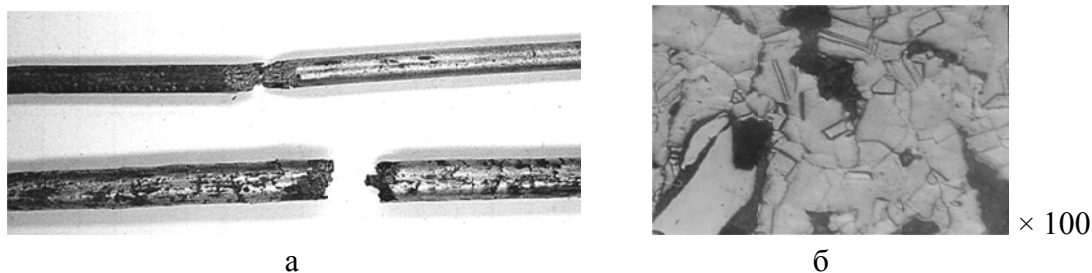


Рис. 2. Прессованная порошковая проволока:  
 а – внешний вид прессованной порошковой проволоки диаметром 8 мм и после дополнительного волочения – 6 мм; б – структура поперечного сечения проволоки диаметром 8 мм

Реализация процесса сварки в автоматическом режиме проволокой такого диаметра вызывает определенные технические сложности, связанные с подачей ее в зону сварки. Сварка мерными кусками проволоки 400–450 мм при ручной дуговой сварке (РДС) показала устойчивость дуги, хорошее формирование шва, отсутствие дефектов. С целью уменьшения диаметра проволоки была предпринята попытка ее волочения. При волочении возникают напряжения растяжения, превышающие допускаемые для прессованных материалов при шаге диаметра волок более 0,1 мм. Прессованную порошковую проволоку диаметром 8...10 мм возможно уменьшить до 4–6 мм методом прокатки, что реализовано на специальном мини-стане 100 × 100 ДГМА. В процессе прокатки в каждом калибре проводилось обжатие с различными относительными деформациями, которые изменялись в диапазоне  $\varepsilon = 0,15 - 0,75$ , без использования технологической смазки. После каждого прохода порошковой проволоки через последующий калибр измеряли геометрические характеристики: диаметр  $d_0$  ( $d_1$ ) в трех точках, и вытяжку  $l$ , а также значение относительной плотности прессованной порошковой проволоки с помощью гидростатического метода [8]. Структура прессованной порошковой проволоки диаметром 4–5 мм после прокатки представлена на рис. 3 (а, б).

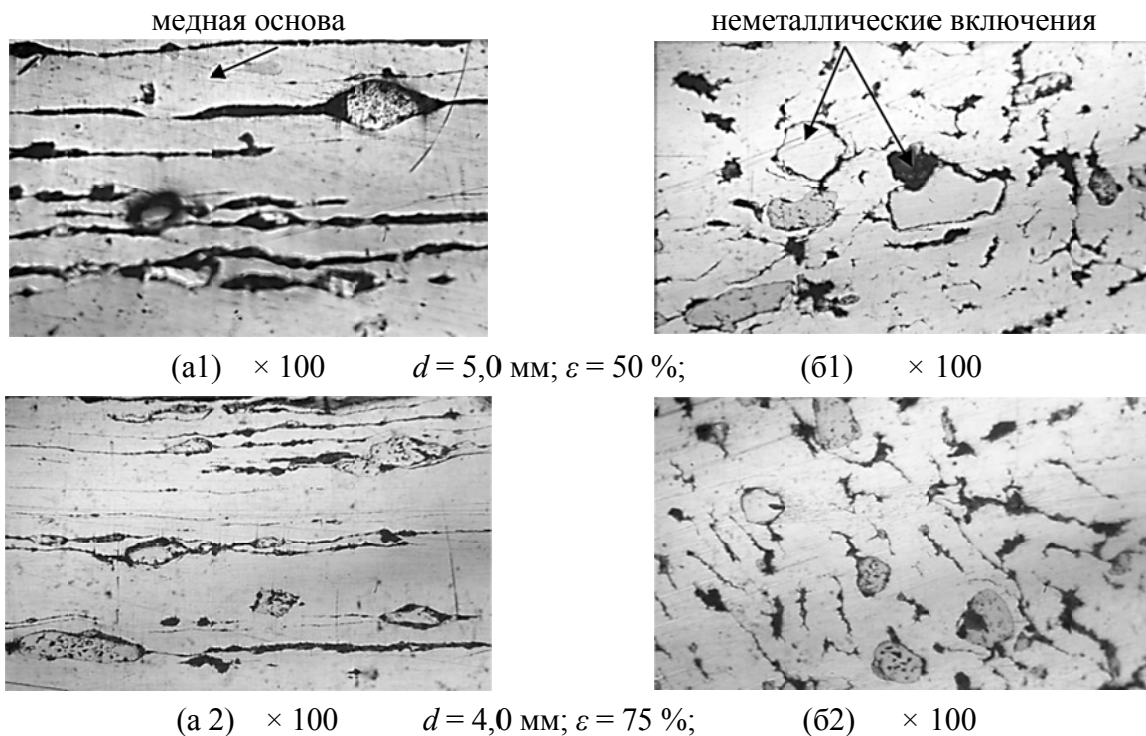


Рис. 3. Продольное (а) и поперечное (б) сечение прессованной порошковой проволоки до и после прокатки

Разработана численная одномерная математическая модель процесса прокатки прессованной порошковой проволоки, на основе рекуррентного решения конечно-разностной формы условия статического равновесия выделенного элементарного объема очага деформации. В этом случае применима расчетная схема (рис. 4) интегрального очага деформации, включающая зону уплотнения  $l_{пл}$ , а также зону последующего упругого восстановления  $l_{уп}$ . С точки зрения кинематических соотношений зона уплотнения, в свою очередь, была подразделена на зону отставания  $l_{ом}$  и зону опережения  $l_{оп}$ .

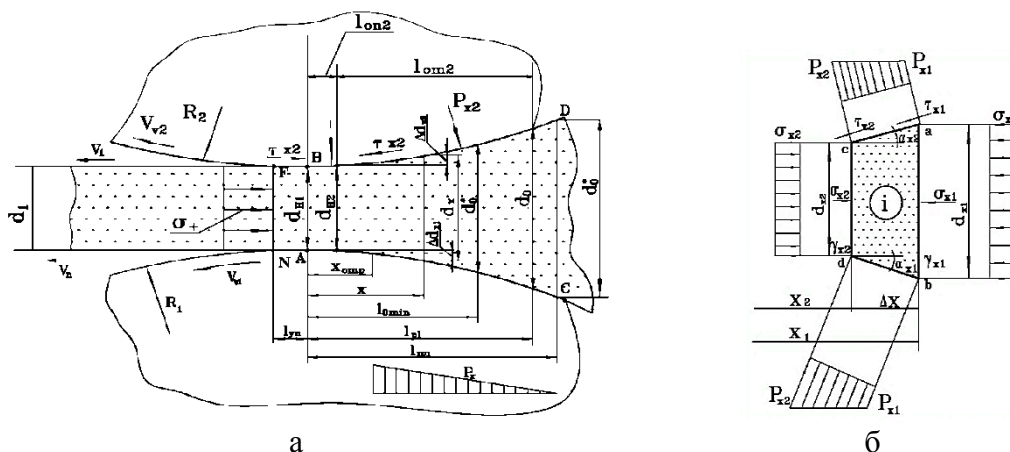


Рис. 4. Расчетная схема очага деформации (а) и выделенного элементарного объема (б) при реализации процесса прокатки прессованной порошковой проволоки

Осуществив с учетом изложенного выше разбиение зоны уплотнения очага деформации на конечное множество ( $K_R$ ) элементарных объемов  $abcd$  (рис. 4, б) и выразив, исходя из характера принятых допущений, геометрические характеристики, а также напряжения  $\sigma_x$ ,  $\tau_x$  и  $P_x$  в конечно-разностной форме, рассмотрим условие статического равновесия выделенного  $i$ -го элементарного объема, представив в виде :

$$\sum Fx = \alpha x_1 Fx_1 - \alpha x_2 Fx_2 - \int_{x_1}^{x_2} \pi \left[ Px_1 + (Px_2 - Px_1) \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \right] dx_1 + (dx_1 - dx_2) \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \tag{1}$$

$$tg \alpha dx + \int_{x_1}^{x_2} \pi \left[ \alpha x_1 + (\alpha x_2 - \alpha x_1) \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \right] dx_1 + (dx_1 - dx_2) \frac{x-x_1}{x_2-x_1} dx = 0.$$

Помимо условия статического равновесия (2) нормальные  $\sigma_x$  и нормальные контактные  $p_x$  напряжения функционально связаны между собой условием пластичности, аналитическое описание которого с учетом допущения об осесимметричном напряженно-деформированном состоянии порошковой среды имеет следующий вид [4]:

$$\alpha x^2 - 2\alpha x Px \frac{1-2\alpha x}{1+\alpha x} + Px^2 \frac{1+4\alpha x}{1+\alpha x} = \frac{1}{1+\alpha x} \beta x \alpha x^2. \tag{2}$$

Подставив в уравнение (1) условие пластичности (2), можно определить искомую компоненту – нормальные контактные напряжения  $Px_2$ :

$$Px_2 = \left[ \frac{(d_{x1} - d_{x2})(x_2^3 - x_1^3)}{3(x_2 - x_1)} + \frac{d_{x1}(x_2 + x_1)}{2} - (d_{x1} - d_{x2}) \frac{x_2 + x_1}{x_2 - x_1} - d_{x1}x_1 + d_{x1}x_1 + \frac{x_1^2(d_{x1} - d_{x2})}{x_2 - x_1} \right], \tag{3}$$

где  $x_1, x_2 = x_1 - \Delta x$  – геометрические координаты начального и конечного сечения каждого отдельного выделенного элементарного объема;

$d_{x1}, d_{x2}$  – толщина прокатываемой композиции в начальном и конечном сечениях, определяемая в зависимости от соответствующих значений геометрических координат  $x_1$  и  $x_2$ .

Графическая интерпретация результатов процесса прокатки представлена на рис. 5, где изображены распределения диаметров калибров, плотности порошковой проволоки, вытяжки и силы прокатки по проходам. Из анализа этих распределений видно, что в процессе уменьшения диаметра было достигнуто равномерное распределение вытяжки по проходам, что позволит провести процесс с равномерной интенсивностью деформации и понизит вероятность разрушения проволоки при изготовлении. С другой стороны, при таком процессе наблюдается снижение силы прокатки, что при недостаточной жесткости системы может привести к образованию дефектов по краям проволоки в первых проходах.

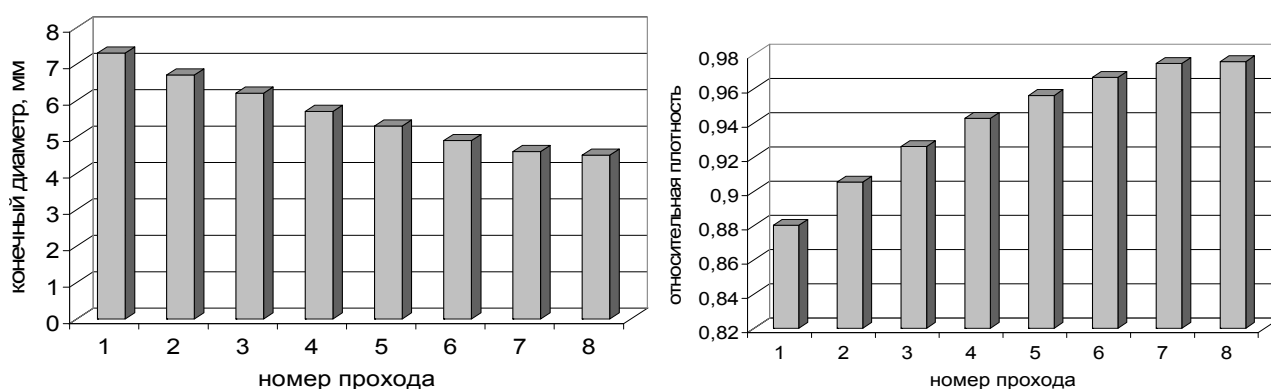


Рис. 5. Результаты процесса прокатки прессованной порошковой проволоки

Для оценки пригодности порошковой проволоки после прессования и прокатки в качестве электродного материала важным показателем является прочность при растяжении.

Исследования на разрыв прессованной порошковой проволоки (ППП) диаметром 4 и 8 мм показали, что поверхность разрыва имеет вид, характерный для хрупкого разрушения, но диаграмма растяжения имеет небольшую площадку текучести. Результаты механических испытаний в сравнении с порошковой проволокой трубчатой конструкции диаметром 3 мм (оболочка медная) показали, что с увеличением относительной плотности, прочность электродных материалов возрастает за счет изменения характера контакта между частицами проволоки и наклепа поверхностного слоя. Соединения между частицами образуются в условиях принудительного деформирования и малой длительности взаимодействия. При заданных условиях изготовления ППП образование соединения между частицами крупки заканчивается схватыванием контактирующих поверхностей и частичной релаксацией напряжений.

Исследование характеристик плавления ППП  $d = 8$  мм и полученных с последующим обжатием прокаткой до  $d = 4,0$  мм проводили методом наплавки на пластины из меди М1 толщиной 20 мм открытой дугой автоматом постоянным током обратной полярности. Режим наплавки: сварочный ток 600–650 А, напряжение дуги 32–36 В, скорость наплавки 16 м/ч, вылет электрода 30 мм.

Увеличение степени обжатия проволоки прокаткой приводит к повышению коэффициента расплавления и одновременно к уменьшению потерь расплавленного электродного металла, что является следствием изменения условий плавления. На характер плавления проволоки и качество наплавленного металла оказывает влияние изменение условий контактирования составляющих проволоки и их соотношение. Размер капель расплавленного металла уменьшается от 2–3 мм при плавлении электрода диаметром 8 мм до 1–1,5 мм в случае плавления прессованной порошковой проволоки диаметром 4 мм. Снижается количество

разбрызгиваемого металла, наблюдается равномерное плавление проволоки, чему способствует увеличение тепло- и электропроводности, повышение равномерности расположения по сечению шихтовых материалов.

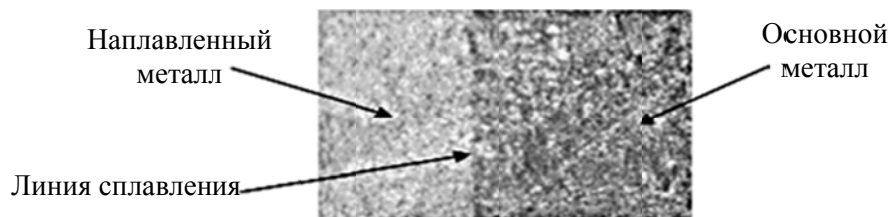


Рис. 6. Сварное соединение толстолистовой (20 мм) меди М1, выполненное прессованной порошковой проволокой ( $\times 100$ )

Анализ микроструктур сварных швов (рис. 6), выполненных прессованной порошковой проволокой, показал наличие плотного металла шва, его химическую и механическую однородность.

### ВЫВОДЫ

Разработана новая конструкция порошковой проволоки с расположением шихты наполнителя в заготовке, позволяющая получить электродный материал (ППП) стабильный по составу и свойствам, что обеспечивает ее равномерное плавление по всему сечению, уменьшение химической и структурной неоднородности сварного шва, снижение количества неметаллических включений в шве.

Разработанная математическая модель уменьшения диаметра проволоки методом прокатки позволяет оптимизировать силовые параметры процесса изготовления прессованной порошковой проволоки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков А. И. Исследование и разработка самозащитной порошковой проволоки для сварки теплообменных конструкций металлургического оборудования : автореф. дис. канд. техн. наук / А. И. Цветков. – Краматорск : КИИ, 1981.
2. Шлепаков В. Н. Порошковые проволоки с металлическим сердечником для сварки в среде защитных газов / В. Н. Шлепаков, А. В. Биленец // Автоматическая сварка. – 2003. – № 3. – С. 53–54.
3. Рак П. И. Порошковые проволоки нового поколения для сварки в среде защитных газов / П. И. Рак, П. А. Косенко // Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже 21 в. : сб. докладов 2 Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ. – Орел, 2001. – С. 57–59.
4. Шлепаков В. Н. Самозащитные порошковые проволоки / В. Н. Шлепаков, С. М. Наумейко // Сварочные материалы. Разработка. Технология : сб. докладов 3 Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ. – Днепропетровск, 2004. – С. 123–131.
5. Сварка под флюсом медных изложниц кристаллизаторов / С. М. Гуревич, В. М. Илюшенко, Л. К. Босак, К. Г. Зобнина, Г. А. Ионин // Автоматическая сварка. – 1975. – № 8. – С. 12–14.
6. Илюшенко В. М. Прогрессивные методы сварки меди и ее низколегированных сплавов / В. М. Илюшенко, В. А. Аношин // Автоматическая сварка. – 1994. – № 5–6. – С. 38–40.
7. Патент № 27572 Україна, МПК В23 К 35/02. Спосіб виготовлення поліметалевого порошкового дроту / Гринь О. Г., Сатонін О. В., Свиридов О. В., Грибков Е. П. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u200706022 ; заявл. 31.05.2007 ; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18.
8. Патент № 32073 Україна, МПК В23 К 35/40, В23 К 35/365. Склад порошкового дроту для зварювання міді / Гринь О. Г., Свиридов О. В. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u200704177 ; заявл. 16.04.2007 ; опубл. 12.05.2008, Бюл. 9.
9. Grin A. G. The pressed powder wire for copper welding/ A. G. Grin, A. V. Sviridov // 9<sup>th</sup> International conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI. – Serbiy, 2009. – P. 212–217.
10. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование [Текст] : монография / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков и др. ; под общ. ред. А. М. Дмитриева, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.

Статья поступила в редакцию 01.10.2012 г.