

УДК 621.791.753.0

Ф. Г. Ловшенко, А. И. Хабибуллин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСТРУЗИИ НА СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

UDC 621.791.753.0

F. G. Lovshenko, A. I. Khabibulin

RESEARCH OF THE IMPACT OF EXTRUSION CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF THE DISPERSION-STRENGTHENED COPPER AND THE OPTIMIZATION OF ITS TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Аннотация

Рассмотрены особенности процесса экструзии заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной гранулированной композиции на основе меди. Определены величины радиальных зазоров между контейнером и пуансоном для различных схем экструзии. Приведены результаты исследований влияния коэффициента вытяжки, а также температур нагрева брикетов и контейнера на физико-механические свойства получаемых прутков.

Ключевые слова:

дисперсно-упрочненная медь, экструзия, режимы, схемы, оптимизация.

Abstract

The peculiarities of the process of extruding workpieces produced from dispersion-strengthened granulated Cu-based composition are considered. Magnitudes of radial clearances between the container and the ram are defined for different extrusion schemes. The paper presents the results of studying the impact of the elongation ratio and also of briquettes and container heating temperatures upon physical-mechanical properties of produced rods.

Key words:

dispersion-strengthened copper, extrusion, regime, schemes, optimization.

Введение

Дисперсно-упрочненная медь (ДУМ), получаемая по технологии, разработанной в Белорусско-Российском университете [1, 2], имеет следующие физико-механические свойства: электропроводность составляет 65...70 % от электропроводности меди; твердость – 190...220 НВ; предел прочности при растяжении – 700...900 МПа; длительная прочность $[\sigma] = 200...250$ МПа; температура рекристаллизации – 800...850 °С; относительное удлинение – 2 %.

Эти свойства позволяют использовать ее в качестве жаропрочного материала, обладающего высокими значениями электропроводности. Изделия электротехнической промышленности (скользящие и коммутирующие электроконтакты, электроды контактной точечной сварки, токоподводящие наконечники для сварки проволокой в среде защитных газов, сопла плазмотронов и пр.), изготовленные из этого материала, отличаются высокими эксплуатационными характеристиками.

Технология изготовления ДУМ относится к высоким технологиям, т. к. позволяет получать электротехнические материалы с уникальным комплексом свойств (высокими твердостью и прочностью, горячей твердостью и жаропрочностью, износо- и электроэрозионной стойкостью при низкой склонности к динамическому и статическому свариванию и сохранении высоких значений электро- и теплопроводности), используя недефицитные материалы. Важными преимуществами этого метода являются простота технологии получения материала, невысокие энергозатраты при достаточной производительности процесса. Основные технологические этапы изготовления дисперсно-упрочненных материалов на основе меди включают в себя реакционное механическое легирование; холодное пресование полученных дисперсно-упрочненных гранулированных композиций; термообработку гранулированных композиций; экструзию прутков требуемого профиля; формообразование заготовок методами горячей объемной штамповки и, наконец, получение изделий с помощью механообработки. Для достижения высоких значений всего комплекса физико-механических свойств порошковые композиции подвергают горячей экструзии с высокими степенями деформации, в результате которой обес-

печивается окончательное формирование структур с ультрадисперсным и равномерным распределением упрочняющих фаз.

В процессе экструзии дисперсно-упрочненной меди нагретый брикет с композиционным материалом помещается в контейнер и выдавливается через отверстие в матрице. Профиль получаемого изделия соответствует форме и размерам отверстия матрицы.

При схеме процесса с прямым истечением (рис. 1, а) порошковая композиция 2 выдавливается из контейнера 1 через отверстие матрицы 4 при воздействии на нее пуансона 3. В процессе экструзии пуансон перемещается относительно стенок контейнера в направлении истечения порошковой композиции, причем перемещаться в пространстве может как пуансон, так и контейнер.

При экструзии с обратным истечением (рис. 1, б) матрица 3 перемещается пуансоном 4 относительно стенок контейнера 2. При экструзии с обратным истечением порошковая композиция 1 относительно стенок контейнера почти не перемещается, за исключением небольшого объема вблизи матрицы. В связи с этим влияние трения на усилие экструзии и на процесс истечения материала композиции значительно меньше, чем при экструзии с прямым истечением.

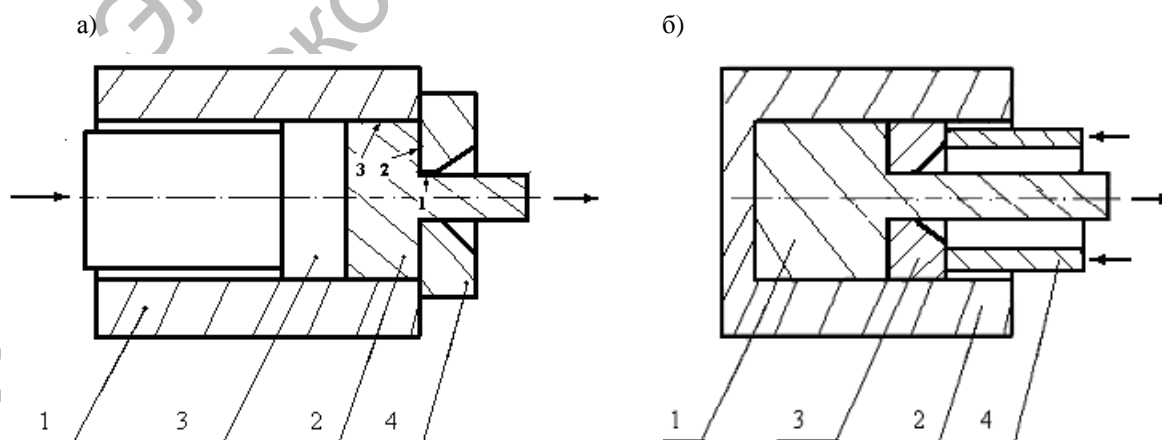


Рис. 1. Схема прямой (а) и обратной (б) экструзии

Целью данного исследования являлось установление влияния технологических факторов на процесс экструзии дисперсно-упрочненной медной композиции и физико-механические свойства получаемого материала.

Методика исследования

Оценка механических свойств производилась по результатам статических испытаний на растяжение на машине ИР 5143-200-11 при скорости 2,0 мм/мин. За показатель пластичности принималось относительное удлинение образцов.

Для изучения влияния технологических факторов на процесс экструзии изменяли температуры нагрева брикетов и контейнера, а также коэффициент вытяжки. Исследования проводили с материалом, полученным при обработке шихты в атмосфере N_2O с применением ПАВ. Условия получения материала: ускорение стенок помольной камеры – $120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$; заполнение помольной камеры мелющими телами – 75 %; отношение объемов мелющих тел и шихты – 9; продолжительность обработки шихты – 7 ч; температура в помольной камере – 70°C ; температура нагрева оснастки для экструзии – 450°C ; температура нагрева брикетов перед экструзией – 800°C ; коэффициент вытяжки – 17; продолжительность отжига – 0,5 ч.

Скорость истечения материала в зависимости от степени деформации изменялась в диапазоне 0,10...0,22 м/с, что приводило к повышению температуры прутка на 40...250 $^\circ\text{C}$. Нижнее значение температуры соответствует экструзии с коэффициентом вытяжки 5, верхнее – 64.

Результаты исследований и их обсуждение

Основная схема напряженного состояния при экструзии – всестороннее неравномерное сжатие. Экструдирование характеризуется значительной неравномерностью свойств по сечению и по дли-

не в результате неравномерности деформации. Степень неравномерности деформаций, а следовательно, и свойств изделия зависит от следующих основных факторов: разницы температур контейнера, матрицы, пуансона и порошковой композиции; степени и скорости деформации; формы канала матрицы; физико-механических свойств экструдруемой композиции; сил трения на поверхностях контакта инструмента и порошковой композиции; схемы экструзии; величины зазора между пуансоном и контейнером и пр. [3–6].

Проведенные исследования показали, что при обратной схеме экструзии зона пластической деформации расположена в непосредственной близости матрицы, в остальном объеме брикета напряженное состояние близко к всестороннему равномерному сжатию и эта основная часть брикета деформируется упруго. Локализация деформаций вблизи матрицы уменьшает неравномерность деформаций, особенно по длине прутка, т. к. все поперечные слои деформируются одинаково.

Локализация пластической деформации вблизи матрицы приводит к уменьшению объема упругой («мертвой») зоны с дефектами структуры. Упругая зона вблизи матрицы при обратной экструзии в несколько раз меньше по объему, чем при прямой. Поэтому поверхностные дефекты при обратной экструзии не могут накапливаться в «мертвой» зоне из-за ее малого объема и переходят на поверхность прутка, ухудшая ее.

Применив обратную экструзию с увеличенным зазором между контейнером и пуансоном, можно избавиться от данного дефекта поверхности, направив структурные несовершенства в образующуюся вокруг пуансона «рубашку».

Для обратной экструзии дисперсно-упрочненных композиций на основе меди при диаметрах канала контейнера 66 мм и канала матрицы 16 мм оптимальная величина радиального зазора

составила 0,085...0,11 мм.

При экструзии дисперсно-упрочненных сплавов на основе меди для повышения технологичности процесса применялись плоские матрицы с углом конусности 90°. В плоских матрицах обжатие материала происходит в воронкообразном канале, образованном границей упругой («мертвой») и пластической зон. Так как экструзия производится до упора пуансона в матрицу, то все поверхностные дефекты, сосредоточенные в мертвой зоне, на заключительной стадии экструзии попадают во внутренние слои прутка. Причем при прямой схеме экструзии объем дефектной зоны, характеризующейся резким снижением физико-механических свойств, в 3...5 раз больше, чем при обратной схеме экструзии. Таким образом, при прямой экструзии в отходы необходимо удалять конец прутка, составляющий 18...20 % от общей длины. При экструзии с «рубашкой» возможно сокращение объема дефектной зоны в 1,8...2,4 раза. Для прямой экструзии оптимальная величина радиального зазора составляет 0,11...0,13 мм, что позволяет снизить

потери материала в 1,5...1,7 раза.

Результаты исследований влияния технологических факторов процесса экструзии на свойства материала представлены на рис. 2...4. Из рис. 2 видно, что при нагреве брикета выше температуры 800 °С основные физико-механические свойства снижаются. Это явление связано с тем, что экструдированный прутки нагревается в зоне калибровочного пояса до температуры 870 °С и выше, что приводит к началу процесса рекристаллизации. Если температура брикетов составляет 740 °С и ниже, то наблюдается тенденция к снижению физико-механических свойств. Это обусловлено тем, что при указанных температурах оксидные пленки на поверхности гранул разрушаются не столь эффективно и увеличивается склонность к формированию волокнистой структуры, что снижает прочность связи между зернами. Кроме того, интенсивно возрастает давление, необходимое для экструзии. В связи с этим температура нагрева брикетов должна находиться в диапазоне 760...800 °С.

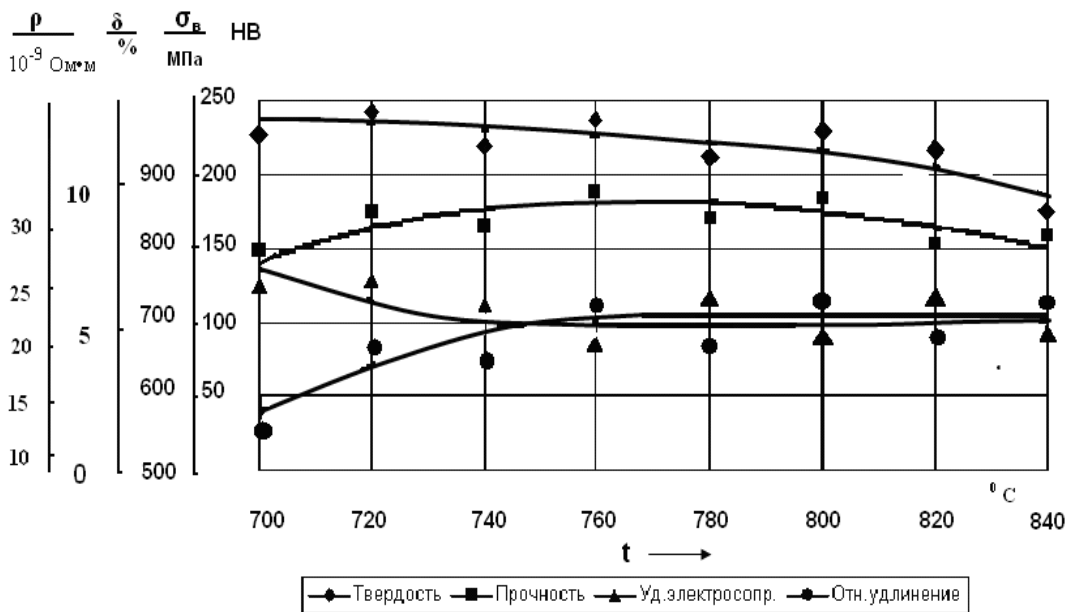


Рис. 2. Влияние температуры нагрева брикета на физико-механические свойства экструдированного прутка

Из рис. 3 видно, что при температуре контейнера 350 °С значительно снижается прочность получаемого прутка. Это явление объясняется тем, что из-за значительного переохлаждения материала брикета у периферии внутренние слои, имеющие более высокую

температуру, обладают меньшим сопротивлением деформации и выдавливаются раньше наружных, что приводит к неравномерности деформации по сечению и появлению дополнительных напряжений растяжения в наружных слоях прутка и сжатия – во внутренних.

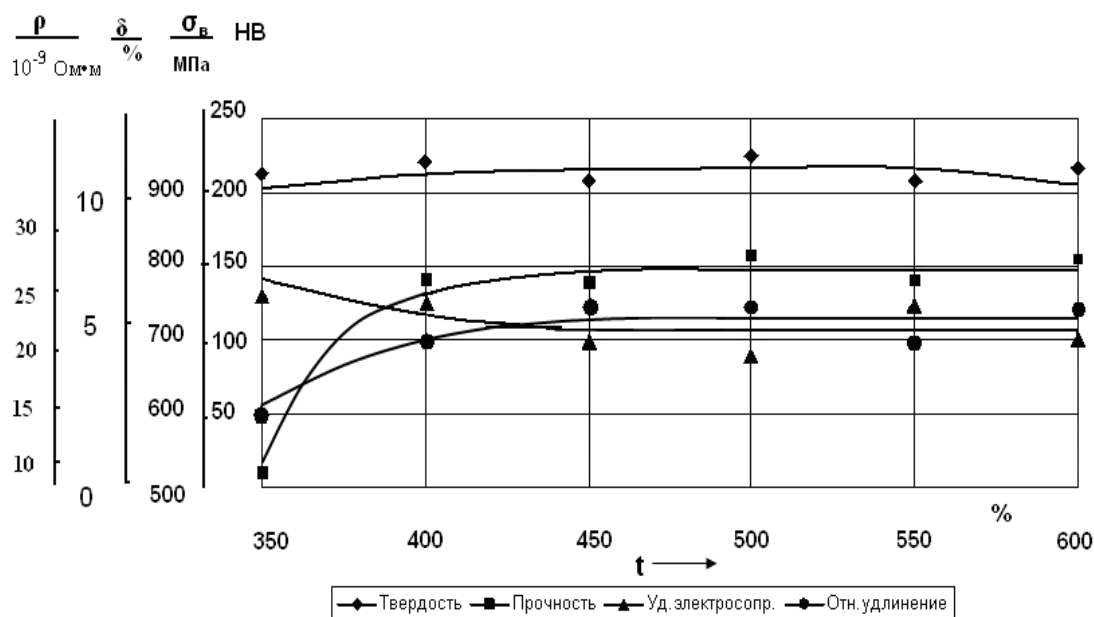


Рис. 3. Влияние температуры нагрева контейнера на физико-механические свойства экструдированного прутка

Из рис. 4 следует, что при коэффициенте вытяжки, меньшем 13, снижаются все физико-механические свойства материала экструдированного прутка. Это объясняется тем, что при малых степенях деформации, как и при низких температурах, оксидные пленки на поверхности гранул разрушаются не эффективно, что приводит к образованию грубой волокнистой структуры. При возрастании значений коэффициента вытяжки более 20 заметно снижается твердость в связи с тем, что происходит нагрев экструдированного материала в зоне входа в матрицу выше температуры начала рекристаллизации. Поэтому коэффициент вытяжки должен находиться в пределах 13...20 (при внутрен-

нем диаметре контейнера до 70 мм).

В случае изготовления контейнера из сталей типа 4X5MФС, 4X5B4ФСМ, 3X3M3Ф температура его нагрева должна составлять 450 °С, при применении стали 3X2B8Ф – 500 °С.

Таким образом, характерной особенностью дисперсно-упрочненных композиционных материалов, получаемых экструдированием, является волокнистая макроструктура прутков. Волокнистое строение после обработки давлением образуется в материале, имеющем нерастворимые включения, которые в процессе деформации вытягиваются вместе с зернами в направлении деформации.

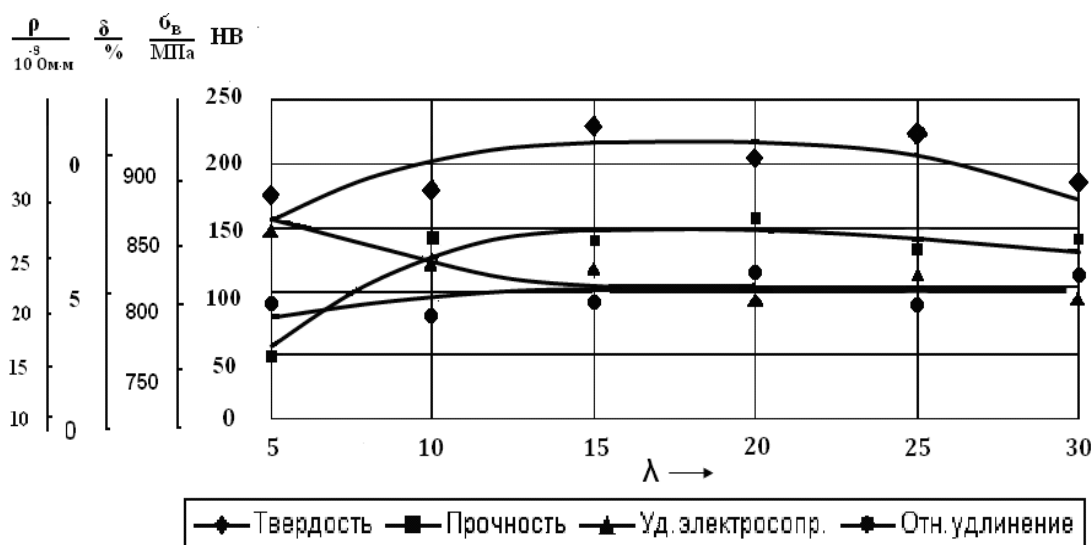


Рис. 4. Влияние коэффициента вытяжки на физико-механические свойства материала экструдированного прутка

Так как эти включения при нагревании не растворяются, они (или продукты их разрушения) сохраняют вытянутую форму и придают макроструктуре волокнистое строение, которое не устраняется даже при высоких температурах последующей термической обработки. Волокнистость макроструктуры приводит к анизотропии механических свойств, что необходимо учитывать при разработке технологии штамповки и обработки резанием, а также при эксплуатации изделий.

При охлаждении контейнера ниже 330 °С напряжения растяжения в наружных слоях прутка оказываются выше основных сжимающих напряжений и на поверхности прутка образуются поперечные кольцевые разрывы («ерш» (рис. 5)).

Анализ фраттограмм поверхностей разрушения показал, что механизмы разрушения в поперечном и продольном направлениях прутков различаются (рис. 6). В первом случае излом имеет ярко выраженный чашечный характер, который указывает на наличие вязкого механизма разрушения. Диаметр лунок находится в пределах 4...8 мкм. С большой долей

вероятности можно утверждать, что разрушение происходит по границам зерен и субзерен, являющихся местами выделения precipитатов упрочняющих фаз. На это косвенно указывают также различаемые на поверхности разрушения отдельные наиболее крупных частиц Al_2O_3 .

Из данных, представленных на рис. 2 и 4, видно, что максимальный предел прочности, составляющий 860 МПа, имеет материал, полученный при температуре нагрева брикетов 780 °С, при значении коэффициента вытяжки 17. При этом он обладает удельным электрическим сопротивлением $\rho = 2,15 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Проведена оптимизация процесса экструзии. При описании области оптимума параметрами являлись предел прочности материала σ_b и удельное электрическое сопротивление ρ ; факторами – температура нагрева брикетов x_1 , коэффициент вытяжки x_2 . Средние значения параметров оптимизации, приведенные в матрице планирования, получены по результатам двух параллельных опытов. Температура нагрева контейнера составляла 450 °С.



Рис. 5. Кольцевые разрывы на поверхности прутка диаметром 10 мм, образующиеся при переохладении контейнера

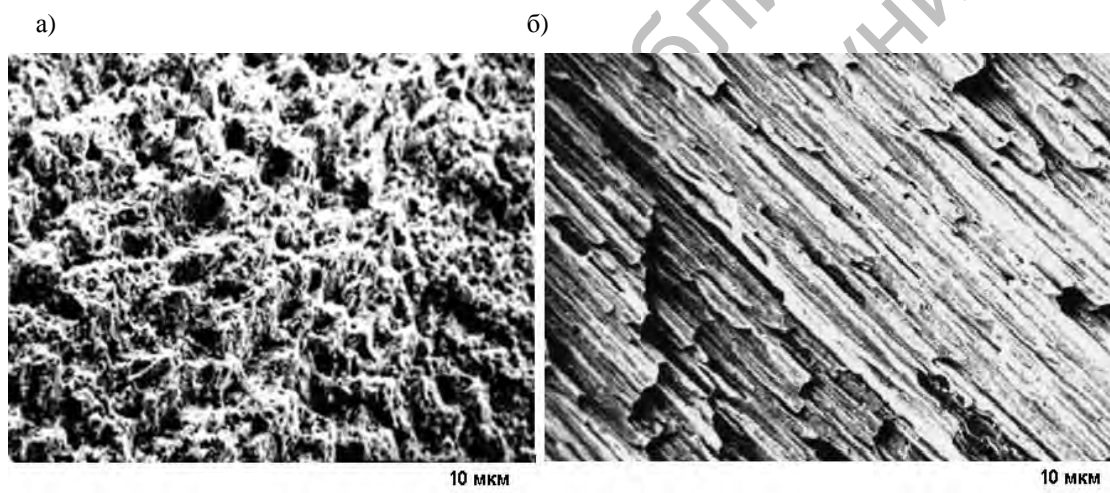


Рис. 6. Фрактограммы поперечного (а) и продольного (б) изломов

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, адекватно представляющие результаты эксперимента:

1) удельное электросопротивление ρ , $\times 10^{-8}$ Ом·м,

$$\rho = 2,21 - 0,133x_1 - 0,165x_2 + 0,042x_1x_2 + 0,12x_1^2 + 0,043x_2^2; \quad (1)$$

2) предел прочности σ_B , МПа,

$$\sigma_B = 877 + 20x_1 + 119x_2 - 94,5x_1^2 - 64,5x_2^2, \quad (2)$$

где x_1, x_2 – кодированные значения факторов, изменяющиеся в пределах от -1 до +1.

Перевод натуральных значений в кодированные осуществляется по выражениям

$$x_1 = \frac{X_1 - 760}{40}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 14}{6}, \quad (3)$$

где X_1 – температура нагрева брикетов, °С, $X_1 = 720...800$; X_2 – коэффициент вытяжки, $X_2 = 8...20$.

Графическая интерпретация этих

моделей, показывающая зависимость исследуемых параметров от двух факторов, представлена на рис. 7 и 8.

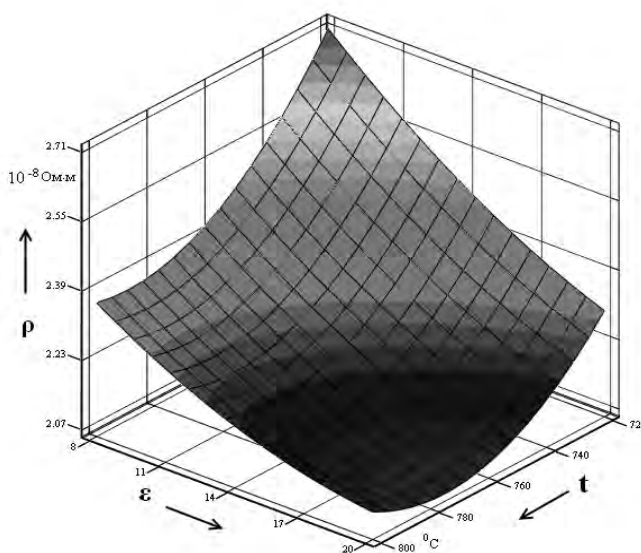


Рис. 7. Влияние температуры экструзии и коэффициента вытяжки на удельное электросопротивление ДУМ

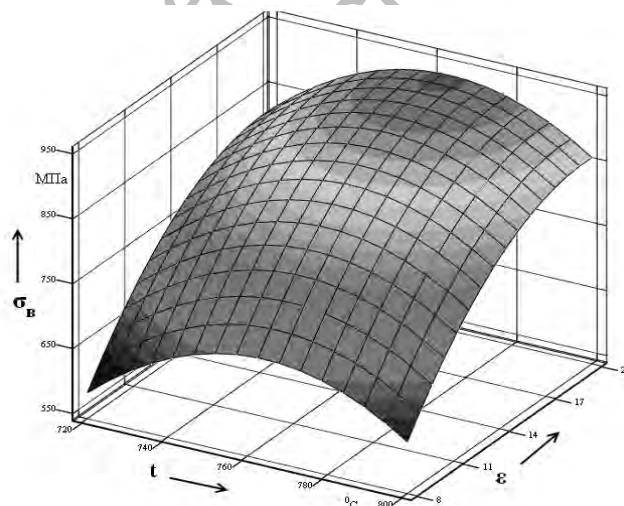


Рис. 8. Влияние температуры экструзии и коэффициента вытяжки на предел прочности ДУМ

Оптимальными условиями термомеханической обработки ДУМ (экструзии) являются: температура нагрева брикетов – 780 °С; коэффициент вытяжки – 17...19; температура нагрева оснастки для экструзии – 450...500 °С.

Заключение

1. Для схемы прямой экструзии оптимальная величина радиального зазора между стенами контейнера и пуансона составляет 0,11...0,13 мм (при диаметрах канала контейнера 64...70 мм), что по-

зволяет снизить потери материала в 1,5...1,7 раза вследствие уменьшения объема дефектной зоны внутри экструдированного прутка в 1,8...2,4 раза.

2. Установлено, что оптимальными режимами термомеханической обработки (экструзии) ДУМ являются: температура нагрева брикетов – 780 °С; коэффициент вытяжки – 17...19; температура нагрева оснастки – 450...500 °С.

3. Показано, что полученный по оптимальной технологии материал является композицией, состоящей из медной матрицы микрокристаллического типа с размером зерна до 0,3 мкм и с границами зерен, стабилизированными дисперсными частицами упрочняющих

фаз размером менее 20 нм. При относительной электропроводности, равной 80 % от меди, разработанный материал обладает твердостью более 210 НВ, пределом прочности $\sigma_b = 860$ МПа, $\sigma_b^{500} = 400$ МПа, относительным удлинением $\delta = 5$ % и температурой рекристаллизации не менее $0,85T_{пл}$ основы, т. е. не менее 850 °С.

Стендовые и производственные испытания показали, что стойкость изделий, изготовленных из разработанного материала, в 1,4...2,5 раза превышает стойкость аналогичных изделий из бронзы БрХЦр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т. – 2005. – 264 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т. – 2008. – 680 с.
3. **Громов, Н. П.** Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.
4. **Смирнов, В. С.** Сопротивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин. – М. : Металлургия, 1975. – 271 с.
5. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
6. **Губкин, С. И.** Пластическая деформация металлов : в 3 т. / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1960. – Т. 1. – 376 с.

Статья сдана в редакцию 28 февраля 2012 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-25-21-26.

Александр Исмаилович Хабибуллин, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-34-55-94.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc, Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-25-21-26.

Aleksandr Ismailovich Khabibulin, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-34-55-94.