УДК 621.791.753.0

А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ДАВЛЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННОЙ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

UDC 621.791.753.0

A. I. Khabibullin, F. G. Lovshenko

THE RESEARCH INTO FABRICABILITY OF MECHANICALLY ALLOYED DISPERSION-STRENGTHENED COPPER

Аннотация

Исследованы технологические особенности обработки давлением дисперсно-упрочненного медного сплава. Установлено, что разработанный материал обладает постоянной пластичностью в интервале температур от 20 до 800 ºС, а также низким деформационным упрочнением по сравнению с другими медными сплавами. Выявлен механизм пластической деформации разработанного материала в условиях неравномерного всестороннего сжатия.

Ключевые слова:

дисперсно-упрочненная медь, обрабатываемость, показатели пластичности, технология, рекристаллизационные процессы, механическое легирование.

Abstract

Technological features of pressure forming of a dispersion-strengthened copper alloy have been studied. The developed material is found to have constant plasticity in the temperature range from 20 to 800 ºC, and low deformation strengthening compared to other copper alloys. The mechanism of plastic deformation of the material developed during non-uniform compression is shown up.

Key words:

dispersion-strengthened copper, fabricability, plasticity indices, technology, re-crystallization processes, mechanical alloying.

Введение

Для изделий электротехнического назначения все более широкое применение получают дисперсно-упрочненные материалы на основе меди. При этом наиболее перспективным способом получения этих материалов является метод реакционного механического легирования. Механически легированная дисперсно-упрочненная медь (ДУМ), теория и технология производства которой разработаны и освоены в Белорусско-Российском университете [1, 2], представляет собой композиционный материал, состоящий из медной матрицы, в которой равномерно распределено до 5 % по объему наноразмерных частиц упрочняющей фазы, синтезированных при его производстве в результате протекания между компонентами шихты механически и термически активированных окислительно-восстановительных реакций. В качестве последней эффективны термодинамически стабильные соединения с высоким значением модуля сдвига, наиболее перспективными из которых являются оксиды, например, Al_2O_3.

Основа материала – низкоконцентрированный твердый раствор алюминия

© Хабибуллин А. И., Ловшенко Ф. Г., 2013

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

(Al ≤ 0,1 %) в меди имеет микрокристаллический тип структуры с размерами зерен ≤ 0,5 мкм, блоков ≤ 50 нм. Высокоразвитая поверхность границ зерен и субзерен стабилизирована наноразмерными включениями термодинамически стабильной фазы Al_2O_3 величиной менее 20 нм. Материал имеет комплексное упрочнение, сочетающее зернограничное, дисперсное и дисперсионное, и является наноструктурным. Приведенное строение обеспечивает низкую скорость протекания рекристаллизационных процессов, что определяет высокие значения твердости и прочности в широком интервале температур, верхнее значение которых достигает 850 ºС. При относительной электропроводности, равной 75 % от меди, дисперсно-упрочненная медь обладает следующими механическими свойствами: твердость НВ 200…220, предел прочности при растяжении $\sigma_В$ = 860…900 МПа, $\sigma_В^{500}$ = 400 МПа, относительное удлинение 2… 3 %, температура рекристаллизации 850 ºС. Материал по комплексу физико-механических свойств превосходит лучший классический электродный материал, которым является бронза БрХЦр, а также внутренне окисленную медь и дисперсно-упрочненный композиционный материал объединения «Уралэлектромедь», широко применяемые в сварочном производстве для изготовления электродов контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников, используемых для сварки плавлением в среде защитных газов.

Перспективность предлагаемого материала по сравнению с бронзой БрХЦр в следующем: 1) высокие значения твердости и горячей твердости обусловливают снижение абразивного износа и адгезионных процессов; 2) в процессе сварки рекристаллизация и разупрочнение материала на контактных поверхностях происходят при температурах, превышающих аналог на 350 ºС; 3) при близких значениях основных теплофизических характеристик горячая прочность дисперсно-упрочненной меди значительно выше, что сдерживает процесс разрушения поверхности контакта из-за растрескивания и отторжения частиц материала в твердом состоянии под воздействием термоударов; 4) благодаря существенному измельчению зерна и торможению диффузионных процессов на рабочих поверхностях снижаются количество переносимого в дуге материала и потери вещества при испарении и разбрызгивании; 5) в связи с распределением катодных пятен на большей поверхности (они концентрируются на границах раздела фаз) затрудняется образование единой расплавленной области и значительно уменьшается эрозия контактов; 6) наличие 5 % по объему дисперсных частиц оксида алюминия приводит к существенному ухудшению условий смачивания и снижению эффекта прилипания брызг и сплавления с электродной проволокой.

Процесс изготовления ДУМ методом реакционного механического легирования относится к высоким технологиям, позволяющим получать изделия с уникальным комплексом свойств из недефицитных материалов при относительно простой технологии. Основные технологические этапы изготовления изделий из ДУМ включают в себя реакционное механическое легирование; холодное прессование и термообработку полученных дисперсно-упрочненных гранулированных композиций; экструзию прутков требуемого профиля; формообразование заготовок методами горячей объемной штамповки и, наконец, получение изделий с помощью механообработки.

Для крупносерийного и массового производства изделий электротехнического назначения из разработанного материала большое значение имеет его способность подвергаться обработке давлением. В связи с тем, что разработанная ДУМ обладает специфической структурой и особыми физико-механическими свойствами, ее технологиче-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ские свойства и методы обработки давлением должны иметь существенные отличия от традиционных.

Целью работы являлось определение показателей обрабатываемости давлением ДУМ и установление технологических особенностей этого процесса.

Методика исследования

Температурный режим деформации устанавливался на основании кривых, характеризующих зависимость пластичности от температуры, и при заданной скорости деформации. Диаграммы пластичности строились по результатам испытаний образцов на растяжение. Оценка механических свойств производилась по результатам высокотемпературных статических испытаний на растяжение на машине ИР 5143-200-11, при скорости 2,0 мм/мин. За показатели пластичности принимались сужение шейки и относительное удлинение образцов. Для построения диаграмм растяжения в диапазоне температур 20…800 ºС применялись пропорциональные цилиндрические образцы диаметром d_0 = 10 мм. Для определения температуры конца обработки давлением производилось прессование прутков диаметром 8 мм из экструдированных заготовок диаметром 25 мм, температура предварительного нагрева заготовок изменялась в диапазоне 350…800 ºС. Температура подогрева технологической оснастки составляла 500…600 ºС, скорость деформирования – 0,016 м/с. Из полученных прессованием прутков изготавливались пропорциональные разрывные образцы диаметром d_0 = 5 мм и определялись их физико-механические свойства.

Характеристики пластичности материала при свободной осадке определялись на цилиндрических заготовках диаметром 16 мм высотой 35 мм. Для установления зависимости пластичности от скорости деформирования проводилась операция свободной осадки вдоль оси заготовок, нагретых до 800 ºС, со скоростями деформирования 0,005…0,05 м/с в технологической оснастке, нагретой до 400 ºС. Пластичность оценивалась по появлению первой трещины в образце. Обратным выдавливанием получали глухое отверстие диаметром 10 мм. Исходными заготовками служили прутки круглого сечения диаметром 16 мм различной длины, нагретые до 800 ºС в трубной электрической печи. Операцию прошивки производили в штампе, нагретом до 400 ºС, в качестве смазки использовалась смазка «Литол-24».

Результаты исследования и их обсуждение

Пластичность материала и сопротивление деформации являются основными характеристиками, обусловливающими возможность обработки давлением и его технологичность. Пластичность, в отличие от сопротивления деформации, зависит от схемы напряженного состояния, поэтому предельные степени деформации значительно отличаются при разных схемах нагружения. Вследствие этого имеется множество показателей и методов характеристики пластичности [3–8]. Так как не существует единых общепризнанных методов оценки и определения пластичности и процессы ОМД имеют бесчисленные сочетания типоразмеров заготовок и оснастки, скоростей деформации и пр., в исследовании использовались показатели, устанавливаемые при простых схемах нагружения (сужение шейки и относительное удлинение) и технологические (критическое обжатие при прокатке, глубина выдавливания и т. п.). Кроме того, в указанных методах оценки пластичности металлов [3–8] учитывается только основная схема напряженного состояния и не принимается во внимание реальное напряженное состояние в зоне очага деформации, а мерой пластичности являются деформации, средние для всего деформируемого объема. Простые показатели, несмотря на то, что не выражаются в соответственных величинах и определяются при

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

схемах напряженного состояния, которые не встречаются в реальных процессах ОМД, позволяют установить температурный интервал максимальной пластичности и дают качественную оценку предельных степеней деформации при ОМД.

Как правило, для установления температурного режима обработки давлением используют диаграмму состояния сплава. Она позволяет определять максимальную температуру нагрева, не допускающую пережога, а также область однофазного состояния сплава, обеспечивающую максимальную пластичность. В случае с ДУМ для сохранения ранее достигнутого высокого комплекса физико-механических свойств максимальная температура нагрева ограничивается температурой начала рекристаллизации и, кроме того, материал должен оставаться в двухфазной области. Исходя из этих соображений, качественная оценка пластичности ДУМ производилась в области температур неполной холодной обработки давлением, т. к. в этом случае имелась возможность проводить пластическую деформацию при снижении сопротивления деформированию и в то же время без рекристаллизации сплава. Оценка механических свойств была сделана по результатам высокотемпературных статических испытаний [9] на растяжение, за показатели пластичности принимали сужение шейки и относительное удлинение образцов.

Результаты высокотемпературных статических испытаний на растяжение (рис. 1) позволяют заключить, что исследуемый материал обладает одинаковой пластичностью в рабочем интервале температур: относительное удлинение составляет 2,09…2,25 %, сужение поперечного сечения – 4,35…4,65 %. Сопротивление деформированию у разработанного материала значительно выше, чем у меди и типовых медных сплавов при любых температурах.

Диаграммы растяжения ДУМ в диапазоне температур 20…800 ºС имеют вид, характерный для хрупких материалов, не имеющих площадки текучести. Сравнив полученные кривые упрочнения ДУМ и типовые промышленные сплавы на основе меди (рис. 2…4) [10], можно сделать следующие выводы.

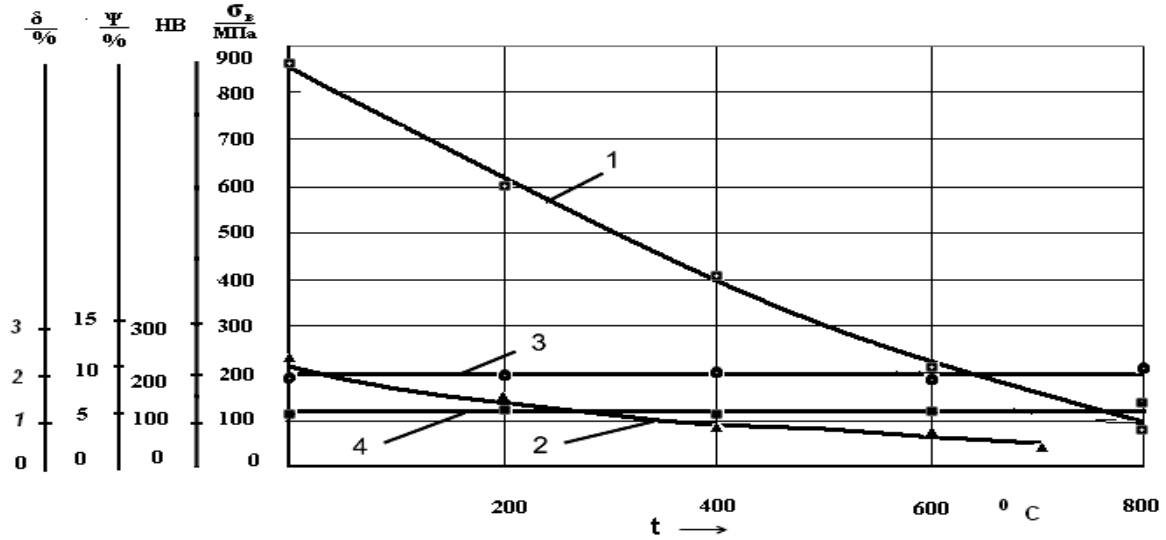

Рис. 1. Механические свойства ДУМ в зависимости от температуры испытаний: 1 – предел прочности; 2 – твердость; 3 – относительное удлинение; 4 – относительное сужение

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

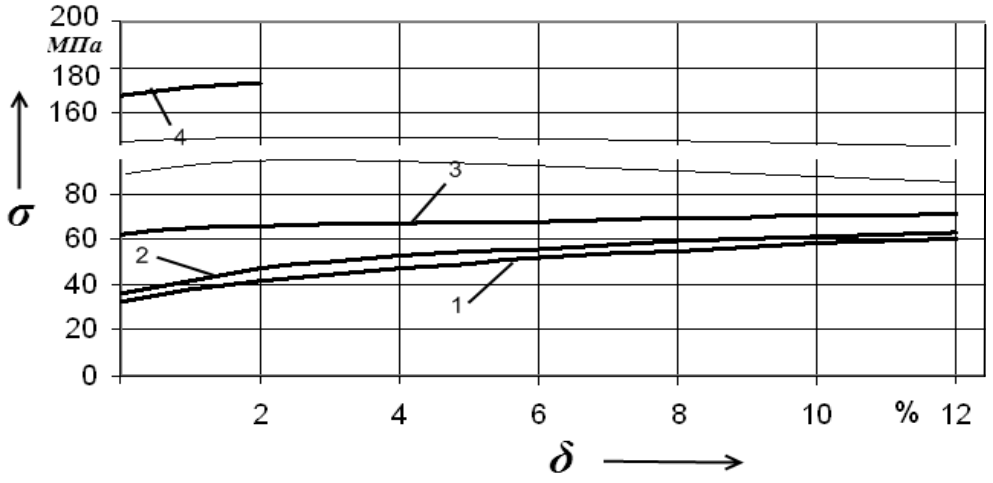

Рис. 2. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении (температура 600 ºС): 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь

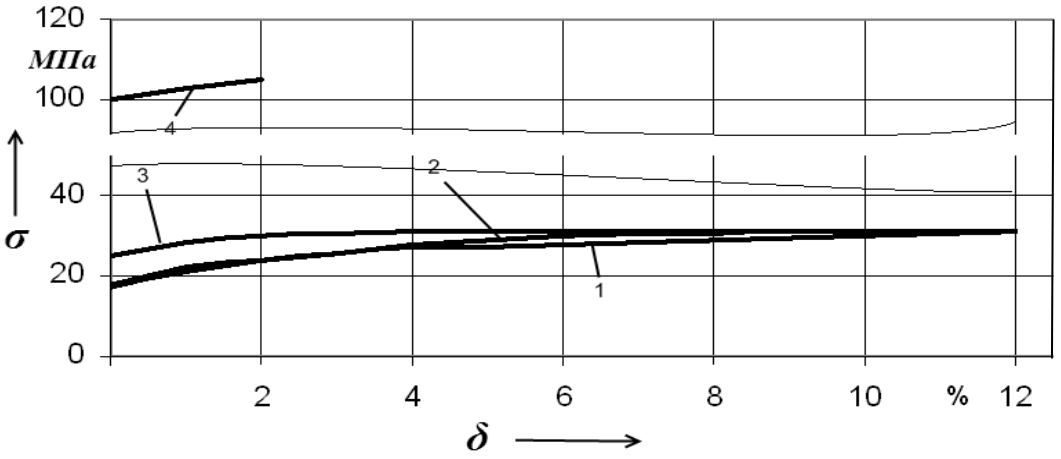

Рис. 3. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении (температура 700 ºС): 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь

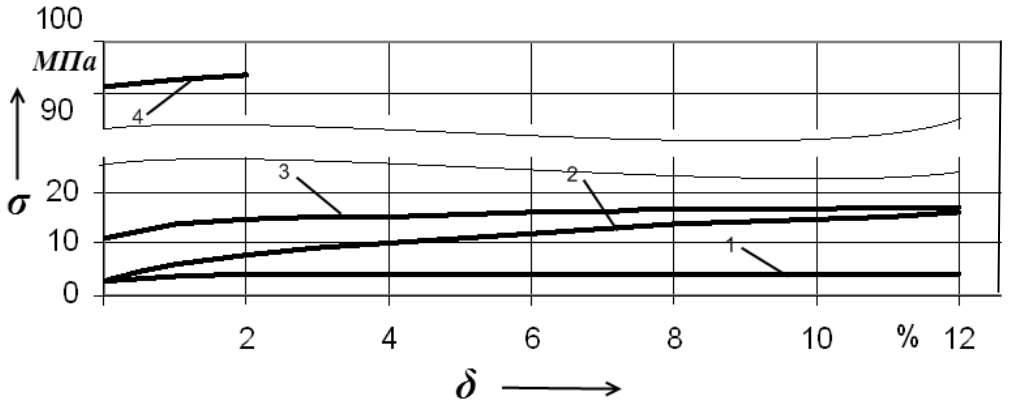

Рис. 4. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении (температура 800 ºС): 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь

Относительное сопротивление деформации у ДУМ по сравнению с рассматриваемой группой сплавов возрастает по мере роста температуры. Высокая прочность, так же как и пониженная пластичность ДУМ, объясняется, с одной стороны, наклепом, приобретенным на стадии механического легирования, с другой – микрокристаллическим типом структуры матрицы с развитой поверхностью границ зерен и субзерен. Границы представляют собой существенное препятствие для перемещения дислокаций, причем дисперсные включения стабилизируют их до температур, достигающих 0,95 $T_{пл}$, что приводит к значительному повышению горячей прочности и препятствует развитию диффузионных процессов [1, 2]. Степень деформационного упрочнения разработанного материала при температурах испытания 600…800 ºС остается на одном уровне (около 1,05). Это явление объясняется высокой степенью наклепа, приобретенного в процессе механического легирования композиции, и отсутствием упрочнения при дальнейшей пластической деформации.

Эта особенность ДУМ обусловлена тем, что накопление дислокаций у препятствий (развитых границ зерен и наноразмерных частиц Al_2O_3) подавляет деятельность источников дислокаций, в том числе и механизм размножения Франка-Рида [7, с. 33].

Следующим этапом исследований являлось установление температурного интервала обработки давлением. В связи с тем, что признаки начала рекристаллизации ДУМ отмечаются при температурах нагрева свыше 800 ºС [1, 2], это значение было принято за температуру начала обработки давлением. Для определения температуры конца обработки устанавливалась зависимость физико-механических свойств материала от температуры обработки давлением. Для решения этой задачи производилась операция прессования прутков при различных температурах.

Полученные данные (рис. 5) позволяют сделать вывод, что при обработке давлением заготовок при температурах ниже 550 ºС наблюдается тенденция к монотонному снижению пластичности и прочности.

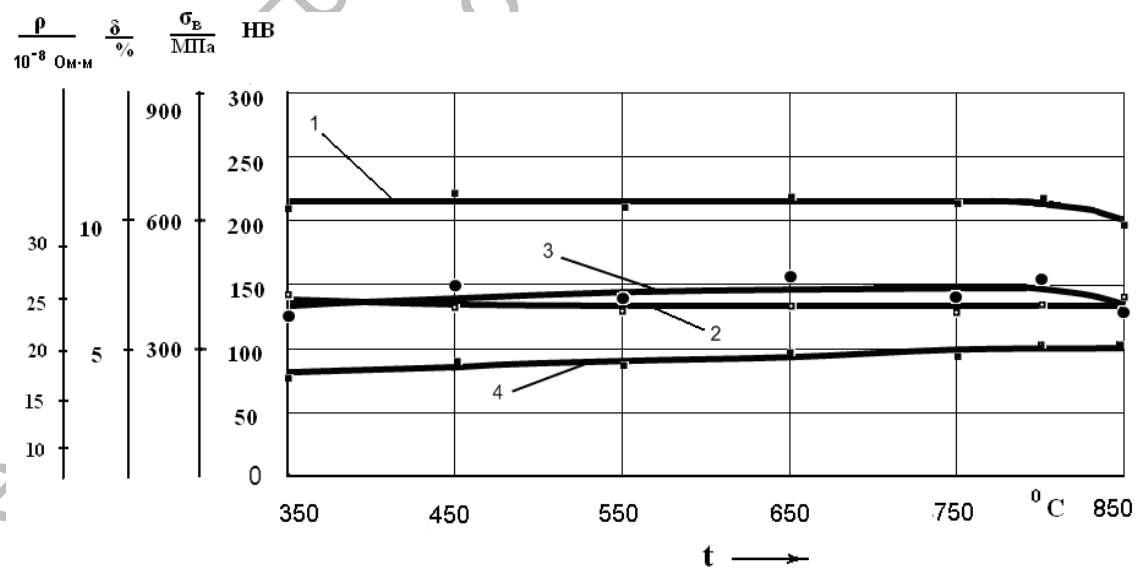

Рис. 5. Зависимость физико-механических свойств прутков от температуры прессования: 1 – твердость; 2 – удельное электросопротивление; 3 – предел прочности; 4 – относительное удлинение

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

При температуре ниже 350 ºС значительно возрастало усилие прессования и начинались поломки инструмента. При прессовании заготовок с температурой выше 800 ºС уменьшались прочность и твердость. В данном случае это обусловлено тем, что выдавливаемый материал нагревается в зоне деформации (калибровочного пояска матрицы) до температуры 870 ºС и выше, что приводит к развитию процесса рекристаллизации. Таким образом, температура начала обработки давлением ограничивается началом процесса рекристаллизации (850 ºС), а температура конца обработки – условиями прочности инструментальной оснастки.

В процессе испытаний установлены и другие простые показатели пластичности: допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси – до 56 %, угол гиба – 22…27º при радиусе гиба, равном диаметру прутка, угол закрутки – 15° при диаметре прутка 16 мм.

При оценке предельных деформационных возможностей новых материалов в конкретных процессах ОМД в [11] предлагается следующая схема оценки пластичности материалов:

– производят качественную оценку пластичности исследуемого материала в соответствующем интервале температур по результатам простых или технологических испытаний на пластичность;

– по результатам этих испытаний определяют возможность подвергать материал обработке давлением;

– при необходимости путем приближенного моделирования конкретного процесса ОМД определяют участок начала разрушения в очаге деформации и факторы, влияющие на него;

– непосредственным моделированием заданного процесса ОМД, соблюдая условия подобия по факторам, оказывающим влияние на пластичность, и расположение опасной зоны, определяют предельные по пластичности режимы деформации.

Для крупносерийного производства электродов контактной точечной сварки наиболее необходимой операцией обработки давлением является выдавливание каналов охлаждения. Обычно обрабатываемость материала пластической деформацией при объемной штамповке оценивается применительно к определенной операции группой показателей [3–8] и является понятием относительным. Как правило, испытания на штампуемость сводятся к проведению технологической пробы.

Показатели технологической пластичности, полученные моделированием основной схемы напряженного состояния без учета условий геометрического и физического подобия, могут быть использованы для качественной оценки предельных деформационных возможностей материала в соответственном процессе ОМД.

Для определения возможности получения отверстий, необходимых при изготовлении электродов контактной точечной сварки методами горячей объемной штамповки, были проведены технологические пробы операции прошивки (обратное выдавливание).

Для установления предельной глубины выдавливаемых каналов в полых изделиях, получаемых обратным выдавливанием, использовалась методика, разработанная авторами на основе положений теории конечных деформаций [12–14] с учетом технологических особенностей разработанного материала. Согласно проведенным расчетам [15] предельная глубина выдавливания канала диаметром 10,0 мм в заготовках диаметром 16,0 мм, полученных из ДУМ, составляет 175 мм. В процессе экспериментального выдавливания отверстий указанной глубины при отсутствии нарушений температурного режима на наружной и внутренней поверхностях заготовок трещин не наблюдалось, деформационное упрочнение не отмечалось.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Такая, необычно высокая, пластичность при наличии схемы всестороннего неравномерного сжатия в совокупности с отсутствием деформационного упрочнения в условиях неполной холодной штамповки, согласно А. А. Бочвару, объясняется механизмом межзеренного скольжения, характерным для материала с микрокристаллической структурой, находящегося в состоянии высокой степени наклепа. Характерной структурной особенностью дисперсно-упрочненной меди является то, что микроструктура материала (размер и форма зерен) практически не изменяется в течение всего времени деформирования [16]. Постоянной остается плотность дислокаций в объеме зерен, не образуются полосы скольжения, не создаются сложные дислокационные структуры внутри зерен (диполи, петли, дислокационные стенки), не отмечается деформационное упрочнение [16]. Это указывает на то, что не происходит пересечения дислокаций в объеме зерен и внутри зерен не работают источники Франка-Рида. Эти структурные свойства обусловлены специфическим механизмом деформации – зернограничным проскальзыванием.

Подтверждением этой важной технологической особенности исследуемого материала является то, что он проявляет более высокие пластические свойства, чем другие медные сплавы при реализации схемы всестороннего сжатия.

Для определения усилий, необходимых для прошивки заготовок, использовалась методика [16], разработанная авторами на основе положений теории пластического течения [14] с учетом технологических особенностей разработанного материала. Максимальное расчетное усилие, действующее на пуансон с коническим торцом при выдавливании отверстия диаметром d = 10 мм в заготовке при температуре конца обработки давлением 700 ºС, составило 29 кН. Сопоставление результатов расчета усилий деформирования пуансоном с коническим торцом с экспериментальными данными, полученными при скорости деформирования 0,017 м/с, показало высокую сходимость (P = 31 кН). На рис. 6 представлен график зависимости усилия пресса от времени деформирования при выдавливании отверстия в заготовке из ДУМ, имеющей температуру начала обработки давлением 800 ºС и температуру конца обработки 650 ºС.

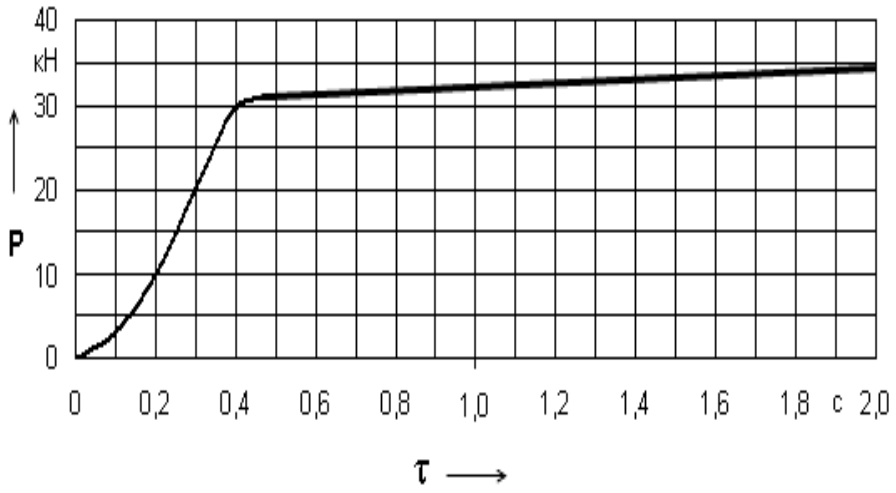

Рис. 6. Зависимость усилия пресса от времени деформирования

Белорусско-Российского университета

Проведенные расчеты позволили разработать технологический процесс обратного выдавливания глубоких полостей при изготовлении электродов для контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников из дисперсно-упрочненной меди, повысить качество изделий, снизить на 20…30 % потери металла в стружку, значительно повысить производительность процесса и эксплуатационные свойства изделий.

Выводы

1. Исследованы технологические свойства ДУМ, характеризующие её обрабатываемость давлением в интервале температур от 20 до 800 °С. Установлено, что из-за микрокристаллической структуры матрицы с границами зерен, стабилизированными дисперсными включениями, пластическое деформирование ДУМ имеет ряд особенностей, заключающихся в следующем:

– сопротивление при деформировании дисперсно-упрочненной меди значительно выше, чем при деформировании других сплавов на основе меди;

– разработанный материал обладает следующими показателями пластичности: относительное удлинение — 2,09…2,25 %, сужение поперечного сечения – 4,35…4,65 %, допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси – до 56 %, угол гиба – 22…27° при радиусе гиба, равном диаметру прутка, угол закрутки – 15° при диаметре прутка 16 мм;

– показатели пластичности ДУМ при растяжении практически постоянны во всем исследованном интервале температур;

– в широком интервале степеней деформации ДУМ испытывает незначительное деформационное упрочнение, не превышающее 5 %.

2. Показано, что в соответствии с принятой классификацией обработка ДУМ давлением происходит в условиях неполной холодной деформации. Установлено, что нижний предел температурного интервала обработки ДУМ давлением ограничивается прочностью и стойкостью штампового инструмента и равен 450 °С, а верхний предел не должен превышать температуру начала рекристаллизации композиционного материала, которая равна 850 °С.

3. Выявлен механизм пластической деформации ДУМ в условиях неравномерного всестороннего сжатия и неполной холодной деформации, заключающийся в преимущественном зернограничном проскальзывании при деформировании ДУМ, что практически не изменяет степень упрочнения деформированного материала, размеры и форму зерен, позволяет производить в изделиях из ДУМ выдавливание глубоких отверстий без дополнительных переходов и промежуточных рекристаллизационных отжигов. Для указанных условий предельная глубина выдавливаемой полости за один переход составляет 17 диаметров пуансона.

4. Подтверждается универсальность положения А. А. Бочвара о возможности реализации межзеренного механизма пластической деформации при обработке давлением металлов и сплавов, обладающих микрокристаллической структурой, в том числе и дисперсно-упрочненных конструкционных материалов.

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. – 679 с.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

3. **Громов, Н. П.** Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.

4. **Губкин, С. И.** Пластическая деформация металлов : в 3 т. / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1960. – Т. 1. – 376 с.

5. **Смирнов, В. С.** Сопротивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин. – М. : Металлургия, 1975. – 271 с.

6. **Северденко, В. П.** Теория обработки металлов давлением / В. П. Северденко. – Минск : Выш. шк., 1966. – 485 с.

7. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 424 с.

8. **Куйбышев, О. А.** Пластичность и сверхпластичность металлов / О. А. Куйбышев. – М. : Металлургия, 1975. – 279 с.

9. **Хабибуллин, А. И.** Термомеханические параметры объемной штамповки дисперсно-упрочненных медных сплавов / А. И. Хабибуллин, В. Ф. Пацей // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2006 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т. – 2006. – Ч. 1. – С. 246.

10. **Полухин, П. И.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

11. **Смирнов, В. С.** Сопротивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин. – М. : Металлургия, 1975. – 271 с.

12. **Воронцов, А. Л.** Анализ начальной стадии обратного выдавливания / А. Л. Воронцов // Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций : межвуз. сб. науч. тр. – М. : ВЗМИ, 1986. – С. 100–104.

13. **Воронцов, А. Л.** Деформированное состояние заготовки при обратном выдавливании / А. Л. Воронцов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 3. – С. 113–117.

14. **Дмитриев, А. М.** Определение технологических параметров выдавливания полых цилиндрических изделий / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справочник. Инженерный журнал. – 2002. – № 2. – С. 10–17.

15. **Хабибуллин, А. И.** Расчет предельной глубины выдавливания в заготовках из дисперсно-упрочненной меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т. – 2010. – № 1. – С. 95–103.

16. **Хабибуллин, А. И.** Особенности процесса обратного выдавливания заготовок, полученных из дисперсно-упрочненной меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 84–91.

Статья сдана в редакцию 28 декабря 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 (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-296-25-21-26.

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

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета