



The main technological characteristics of dispersion-strengthened copper, applied for production of articles of electro-technical purpose, are given. Technological peculiarities of the main operation of hot volume punching (broaching and bending) and edge cutting machining are stated in detail.

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, Г. Ф. ЛОВШЕНКО, А. И. ХАБИБУЛЛИН,
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

УДК 621.791.753.0

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ МЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РЕАКЦИОННОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Введение

В современных условиях для промышленности Республики Беларусь актуален вопрос поиска новых электротехнических материалов на основе меди, способных заменить экспортируемые хромоциркониевые бронзы, широко применяющиеся для изготовления электродов контактной точечной сварки, токоподводящих наконечников для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, электрических контактов и др. Долговечность и надежность электротехнических изделий в сварочном производстве может быть многократно повышена применением для их изготовления композиционного материала – дисперсно-упрочненной меди, теория и технология производства которой разработаны и освоены в Белорусско-Российском университете [1].

Технология изготовления дисперсно-упрочненной меди относится к высоким технологиям, позволяющим получать электротехнические материалы с уникальным комплексом свойств, используя недефицитные материалы. Важными преимуществами этого метода являются его простота, универсальность, хорошая воспроизводимость, экологическая безопасность.

Структура основы полуфабрикатов относится к нанокристаллическому типу и характеризуется следующими параметрами: размер зерен – 0,3–0,5 мкм, субзерен – менее 0,1 мкм. Высокоразвитая поверхность границ зерен и субзерен стабилизирована наноразмерными включениями, термодинамически стабильными включениями размером менее 20 нм фазы Al_2O_3 , имеющей высокое значение модуля сдвига, синтезированной в про-

цессе реализации технологии. В зависимости от состава дисперсно-упрочненные медные материалы электротехнического назначения обладают следующими свойствами: относительная электропроводность (ρ) – 60–75% от электропроводности меди, твердость – 180–240 НВ, предел прочности при растяжении (σ_B) – 700–1000 МПа, предел прочности при растяжении при 500 °С (σ_B^{500}) – 350–450 МПа, относительное удлинение (ρ) – 3–5%, температура начала рекристаллизации – не ниже 850 °С. Разработанные материалы по комплексу физико-механических свойств значительно превосходят лучший классический литой материал электротехнического назначения, применяемый для изготовления электродов контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников для сварки в среде защитных газов, которым является бронза БрХЦр.

Широкое использование электротехнических изделий, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди по технологии, основанной на реакционном механическом легировании, сдерживается нерешенностью ряда задач, обусловленных новизной и сложностью проблемы: не изучены технологические особенности данных материалов при их горячей обработке давлением и резанием, имеющих место при переработке полуфабрикатов в изделия, не разработаны принципы проектирования штампового инструмента и оборудования, учитывающие особенности формообразования данного типа материалов.

Целью настоящей работы являлось определение основных технологических свойств, характеризующих обрабатываемость давлением и резанием, механически легированной дисперсно-упрочненной меди.

Методика исследования

Технология получения полуфабрикатов из механически легированной дисперсно-упрочненной меди включала следующие этапы: реакционное механическое легирование, холодное прессование брикетов, термическую обработку брикетов, горячую экструзию брикетов.

Реакционное механическое легирование заключалось в обработке порошковой композиции в механореакторе по следующим режимам: степень заполнения помольной камеры рабочими телами – 75%, отношение объемов рабочих тел и шихты – 7 и ускорение рабочих тел – $130 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Исходными компонентами шихты служили порошки меди (ПМС-1), алюминия (ПА-4), оксида меди CuO , поверхностно-активного вещества (ПАВ). В исследовании использовали материалы, полученные из композиции $\text{Cu} - 0,8\% \text{ Al} - 3,53\% \text{ CuO} - 0,2\% \text{ ПАВ}$. Продуктом механического легирования являлась дисперсно-упрочненная гранулированная композиция с размером гранул $0,3\text{--}0,5 \text{ мм}$.

Гранулированную композицию подвергали холодному прессованию до плотности 70% от теоретической. Отжиг холоднопрессованных брикетов проводили в атмосфере аргона в течение 5 ч при температуре 780°C . Получение полуфабрикатов (калиброванный прутки заданного диаметра) осуществляли горячей экструзией при температуре нагрева брикетов 780°C со степенью обжатия более 15. Температура нагрева прессового инструмента из теплостойких штамповых сталей составляла 550°C .

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе приведены результаты исследований процессов прокатки,ковки, горячей объемной штамповки, а также точения и сверления.

Для крупносерийного и массового производства особое значение имеет способность материала подвергаться обработке давлением. Известно, что по сравнению с обработкой резанием применение этого метода позволяет примерно в 2 раза сократить расход материала, на порядок повысить производительность, улучшить эксплуатационные свойства изделия и значительно снизить себестоимость [2, 3].

В связи с широкой номенклатурой изделий электротехнической промышленности, характеризующейся разнообразием форм и сложностью изготовления профилей с большой площадью поперечного сечения, особое значение приобретает выбор рациональных методов формообразования заготовок.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе меди отличаются от других

конструкционных сплавов следующими технологическими особенностями: меньшей допустимой скоростью нагрева (не более $110^\circ\text{C}/\text{мин}$ при диаметре прутка до 18 мм), ограниченными степенями деформаций, более узкими температурными интервалами обработки давлением ($650\text{--}830^\circ\text{C}$), большим сопротивлением деформации, выраженной анизотропией физико-механических свойств. Эти особенности физико-механических свойств разработанных композиционных материалов обусловлены их структурой, замедленной диффузией и рекристаллизацией.

Деформируемость в горячем состоянии характеризуется следующими параметрами: допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси – до 50–56%; уголгиба – до $22\text{--}27^\circ$ (при радиусегиба, равном диаметру прутка); угол закрутки – до $42\text{--}48^\circ$ (на длине 100 мм при диаметре прутка 16 мм). Эти свойства обуславливают невозможность обработки давлением дисперсно-упрочненных материалов в холодном состоянии и посредственную деформируемость при горячей обработке давлением.

При проектировании штампового инструмента необходимо учитывать различие в коэффициентах линейного расширения материалов заготовки и инструмента (соответственно $16,8 \cdot 10^{-6}$ и $12,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и разницу их температур.

Верхняя граница температурного интервала горячей объемной штамповки для дисперсно-упрочненных материалов на основе меди не должна превышать 850°C , так как нагрев на более высокие температуры приводит к снижению эксплуатационных свойств изделий. Нижняя граница температур должна быть не менее 700°C в связи со снижением характеристик пластичности материала.

В идеальном случае оснастка должна иметь температуру нагретой заготовки, но высокая стоимость и дефицитность штамповых сталей, работающих при высоких температурах, обуславливают их замену полутеплостойкими штамповыми сталями типа 5ХНМ, работающими при температурах до 450°C .

При обработке давлением изделий, обладающих малой массой, во избежание снижения температуры в процессе штамповки возможна замена штамповых сталей быстрорежущими, позволяющими производить нагрев штампового инструмента до температур 600°C .

Наилучшей обрабатываемостью давлением материалы обладают в интервале $750\text{--}830^\circ\text{C}$. При этих температурах они хорошо поддаются ковке, прессованию и штамповке. Так как обработка проводится ниже температуры рекристаллизации ма-

териала, снижения механических свойств не наблюдается.

При прокатке максимальная степень пластической деформации за один проход составляет 25–30%. При большем значении на боковых поверхностях полосы появляются трещины. При прямом прессовании коэффициент вытяжки может достигать 50, при обратном – 60.

К основным операциямковки относятся осадка, протяжка, прошивка, отрубка и гибка. При осадке максимальный коэффициент уковки достигает 2. При протяжке на молоте с использованием плоских бойков коэффициент уковки составил 1,25, вырезных бойков – 1,35; на гидравлическом прессе с плоскими бойками – 1,35, с вырезными – 1,50.

Обрабатываемость материала пластической деформацией при объемной штамповке (штампуемость) оценивается применительно к определенной операции группой показателей [2, 3] и является понятием относительным. Обычно испытания на штампуемость сводятся к проведению технологической пробы. С целью определения возможности получения горячей объемной штамповкой из разработанных материалов электродов контактной точечной сварки проведены технологические пробы на основных операциях, включающих прошивку (обратное выдавливание), высадку и гибку.

Обратным выдавливанием получали глухое отверстие диаметром 11 мм и глубиной 55 мм, обжимом – коническую поверхность. Исходная заготовка представляла собой цилиндр диаметром 17 мм и высотой 34 мм. Заготовку нагревали до 850 °С. Операции производили за один проход в штампе, нагретом до 350 °С. Обе технологические пробы подтвердили возможность получения изделий методом горячей объемной штамповки. Эксплуатационные свойства штампованных электродов по сравнению с электродами, полученными обработкой резанием, увеличились на 15–20%.

Прошивка отверстия в заготовке с раздачей материала в стороны вызывает образование продольных трещин из-за пониженной пластичности материала поперек волокон. Вследствие этого разность диаметров исходной заготовки и канала матрицы при комнатной температуре не должна превышать 2,5% для ограничения процесса раздачи. Разность диаметров менее 0,8% приводит к образованию поперечных рванин в прошиваемых заготовках. Это явление связано с заклиниванием средней части заготовки в конической части канала матрицы, нарушением условий смазки и последующей подачей передней части заготовки прошивнем вдоль ее оси.

Конусность канала матрицы должна быть в пределах 0°40'–1°20'. При увеличении конусности снижаются силы трения заготовки о стенки канала матрицы и заготовка остается на прошивне из-за усадки при охлаждении, что затрудняет ее съем. При уменьшении конусности значительно возрастают усилия выталкивания заготовки.

Поперечные рванины, вызываемые теми же причинами, могут наблюдаться и при штамповке в несколько переходов. Для предотвращения этого матрица каждого последующего перехода должна иметь увеличенные размеры рабочих полостей. Расчет размеров производится с учетом коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и оснастки, а также разницы их температур.

При прошивке глухих отверстий в заготовках, имеющих наружный конус (что характерно для рабочей части электродов для контактной точечной сварки), прошивень не должен входить в коническую зону канала матрицы. Несоблюдение этого условия приводит к отрыву материала от стенок канала матрицы и съему заготовки на прошивне.

Получение тонкостенных поковок с глубоким отверстием сопровождается выраженной разностенностью. Это объясняется разностью диаметров заготовки и канала матрицы, что вызывает эксцентричное расположение отверстия в начале прошивки. Эксцентричность, кроме нарушения геометрических размеров изделия, приводит к образованию трещин в тонкостенной части юбки электрода. Их появление связано с охрупчиванием переохлажденного тонкостенного участка и максимальной раздачей материала в начале процесса прошивки. Наличие центровочного отверстия на торце заготовки позволяет избавиться от данного вида дефектов.

Разностенность в конце прошивки связана с формой рабочей части прошивня и зависит от кинематики течения материала, сил трения, степени несимметричности течения материала. Наиболее благоприятна, с точки зрения кинематики течения материала, сферическая форма головки прошивня. Однако при выдавливании с высокими степенями деформации и большой относительной глубиной полости создаются условия, приводящие к повышенной адгезии и нестационарности процесса течения материала. Вследствие этого возникает тенденция к радиальному смещению прошивня. Профиль рабочей части в виде усеченного конуса уступает сферическому по кинематике течения материала, но повышает устойчивость смазочного слоя, снижает адгезию, способствует стационар-

ности процесса и обеспечивает наименьшую разностенность.

При прошивке электродов точечной сварки с наружными диаметрами до 25 мм и внутренними каналами диаметрами до 16 мм оптимальные значения углов при вершине конической части составляют 140–160°, а диаметры площадок – 0,4–0,5 от диаметра рабочей части прошивня.

На условия работы прошивня, матрицы, течения материала большое влияние оказывают условия смазки. Применение рекомендуемых в литературе масляно-графитовых суспензий приводит к накоплению в канале матрицы графита и нарушению формы и размеров изделия. Лучшие результаты дает применение высокотемпературных синтетических смазок.

Потребность в расширении ассортимента изделий, имеющих большую площадь поперечного сечения и отсутствие необходимого прессового оборудования, вызывает необходимость применения операций осадки и высадки для заготовок из дисперсно-упрочненной меди. Низкая пластичность и выраженная анизотропия физико-механических свойств обуславливают невозможность обработки давлением в холодном состоянии и посредственную деформируемость при горячей обработке давлением. Допускаемая степень деформации при свободной осадке прутков диаметром 16 мм, нагретых до 800 °С вдоль оси, не превышает 56%. Для повышения пластичности материала необходимо производить осадку в закрытых штампах.

Высадка головки электрода диаметром 25 мм и высотой 16 мм из прутка диаметром 16 мм возможна за один переход без потери устойчивости при соотношении H/D , равном 2,4. Дальнейшее увеличение высоты головки приводит к потере устойчивости и требует применения дополнительного наборного перехода. Этот переход производится в наборном пуансоне с рабочей полостью в форме усеченного конуса с основаниями диаметром 25 и 16 мм. Таким образом, можно высаживать головки с площадью поперечного сечения до 500 мм² и высотой 24 мм из прутка диаметром 16 мм без заметного снижения физико-механических свойств. Дальнейшее увеличение высоты высаживаемой головки требует увеличения числа наборных переходов.

Для заполнения рабочей полости штампа давление осадки должно быть не менее 500 МПа при температуре оснастки 450 °С и температуре нагрева заготовки 800 °С. Так как рабочей поверхностью электрода является центральная часть головки, то разрыхление сердцевины за счет раздачи материала при осадке значительно снижает его

эксплуатационные свойства. Наименьшее разрыхление сердцевины при наборном переходе достигается расположением большего диаметра усеченного конуса у ножки электрода. При такой схеме раздача материала в центре электрода минимальна. При высадке головок с большим сечением избежать разрыхления центральной части электрода не удастся. Сочетание высадки с обратным прессованием рабочей части головки позволяет сохранить структуру рабочей поверхности электрода. В этом случае осуществляется вариант открытой штамповки с выдавливанием части материала со стороны рабочей поверхности электрода внутрь пуансона. Течение слоев материала при обратном прессовании противоположно течению при раздаче заготовки во время высадки и является преобладающим процессом. Характер истечения и глубина деформируемых слоев материала при обратном прессовании зависят от соотношения диаметров высаживаемой головки и отверстия матрицы. Уменьшение выходного отверстия матрицы увеличивает давление высадки и позволяет заполнить рабочую полость штампа, но снижает глубину деформирования слоев материала головки. Оптимальное соотношение площадей сечения высаживаемой головки и выдавливаемого прутка 15:1.

Основные типы применяемых электродов имеют простую геометрическую форму и представляют собой колпачок или цилиндр и могут быть изготовлены выдавливанием.

Но для сварки крыши кабины автомобиля МАЗ применяют электроды сложной конфигурации. Они представляют собой изделие, состоящее из двух усеченных конусов. Причем рабочий конус (диаметром 11 мм у основания) сдвинут относительно посадочного конуса (диаметром 16 мм у основания) на 9 мм. Изготовление такого электрода механической обработкой из прутка приводит к значительным потерям материала в стружку, затратам времени и снижению эксплуатационных свойств изделий. Формообразование заготовки методами обработки давлением позволяет избавиться от этих недостатков.

Посредственная деформируемость в горячем состоянии проявляется, в частности, в ограничении допускаемого углагиба до 22–27° при радиусегиба, равном диаметру прутка. Такие технологические свойства не позволяют получить требуемое изделие свободной гибкой.

Известно, что пластичность материала можно повысить при реализации рациональной схемы напряженного состояния. Повышение пластичности в данном случае достигается созданием сжимаю-

щих напряжений вдоль оси заготовки в процессе гибки.

Нами разработана конструкция штампа, позволяющая производить осадку заготовки одновременно с ее гибкой, что дает возможность изготавливать требуемые изделия из дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе меди.

В результате исследований можно сделать вывод, что обрабатываемость давлением высокопрочных дисперсно-упрочненных медных сплавов может быть приравнена к обрабатываемости среднеуглеродистых сталей.

Проведена оценка обрабатываемости материалов резанием. Единой универсальной характеристики обрабатываемости резанием нет, так как материал, обладающий хорошей обрабатываемостью, с точки зрения уровня рациональных скоростей, может не обеспечивать требуемый уровень шероховатости поверхности или требует больших усилий резания.

Таким образом, понятие обрабатываемости резанием является комплексным и включает ряд параметров [4, 5]. В связи с тем что заготовки для механической обработки получают методами экструзии или горячей объемной штамповки и припуски на механическую обработку не превышают 0,6 мм, то практический интерес представляют технологические свойства при чистовой обработке заготовок.

Исходя из свойств и технологии получения, за основной критерий обрабатываемости исследуемого материала следует принять шероховатость поверхности при чистовой обработке резанием [5]. В связи с этим оптимизацию процесса обработки резанием проводили для заданных значений шероховатости поверхности. Оптимальным режимом резания при точении резцами, оснащенными пластинками из ВК8 для достижения значений шероховатости поверхности $Ra = 1,6$, является скорость резания 90 м/мин, подача 0,1 мм/об при глубине резания 0,6 мм.

Установлено, что при чистовом точении в практически используемом диапазоне скоростей резания отсутствуют явления нароста и наклепа. В целом обрабатываемость определяется температурой в зоне резания и истирающей способностью материала и может быть приравнена к обрабатываемости деформируемых жаропрочных бронз типа БрАЖН10-4-4, БрАЖ9-4. В качестве технологических сред при обработке рекомендуется использовать жидкости на водной основе Аквол-12, СОЖ МР-29, НГЛ-205 или масла В-31, МР-8, ИС-12, Mobil 10W-30.

Для изготовления изделий типа токоподводящих наконечников для сварки плавящимся элект-

родом в среде защитных газов в заготовках необходимо получить отверстие диаметром 0,8–2,0 мм, глубиной 18–30 мм. При сверлении дисперсно-упрочненных материалов на основе меди важнейшими являются проблемы увода инструмента, его быстрого изнашивания и поломки.

В результате проведенных нами исследований было установлено, что уводы часто зависят от случайных причин, не всегда проявляющихся, либо не постоянно существующих. Для достижения наибольшей производительности и снижения величины увода при сверлении глубоких отверстий без принудительной подачи СОЖ необходима обработка на высоких скоростях резания с небольшими подачами. Одним из наиболее результативных способов повышения эффективности процесса глубокого сверления является применение вибрации. В этом случае обеспечивается кинематическое дробление сливной стружки за счет применения переменной по величине подачи. Для реализации этого метода на осевое движение подачи накладывается дополнительное осциллирующее движение. Для беспрепятственного перемещения стружки стараются использовать сверла с прямыми канавками. В связи с дефицитностью такого инструмента нам пришлось применять спиральные сверла с минимальным углом наклона винтовой канавки $\omega = 19^\circ$.

Для сверления глубоких отверстий малого диаметра в токоподводящих наконечниках из дисперсно-упрочненной меди нами был разработан станок токарного типа с электродинамическим вибратором, передающим инструменту осевые колебания необходимой частоты и амплитуды.

Подбором частоты и амплитуды вибраций, накладываемых на подачу инструмента, создается прерывистое резание, при котором обеспечивается дробление стружки и создаются благоприятные условия для работы режущих лезвий. Это содействует увеличению стойкости инструмента, что позволяет повышать режимы резания и производительность.

Режимы резания и вибраций при вибросверлении устанавливаются в зависимости от прочности и вязкости обрабатываемого материала, требуемой точности и шероховатости поверхности и диаметра отверстия. Режим вибраций при глубоком сверлении характеризуется двумя параметрами: частотой $(k + i)$ и амплитудой A , где k – число полных периодов колебаний, укладываемых за время одного оборота заготовки; i – отношение остатка периода колебаний к периоду колебаний; $k + i = 60f/n$, где f – частота вибраций, Гц; n – частота вращения заготовки, об/мин. Величина i ха-

рактирует сдвиг фаз между следами последующего и предыдущего проходов инструмента. Для оптимизации процесса дробления и удаления стружки, а также с целью повышения стойкости инструмента рекомендуется следующий режим вибраций [6]: значения i – в пределах 0,25–0,75; $(k + i)$ – до 4,5; амплитуда колебаний $A = (1 - 2)S_0$.

В результате исследований был установлен оптимальный режим обработки отверстий токоподводящих наконечников диаметром 0,9–1,1 мм: $n = 2800$ об/мин; $S_0 = 0,020$ мм/об; $f = 140$ Гц (три колебания за один оборот инструмента); $A = 0,03$ – $0,04$ мм. Разработанная установка дает возможность получать отверстия малого диаметра глубиной до 20–30 мм с удовлетворительными производительностью, стойкостью инструмента и допустимым уводом сверла, составляющим 0,05–0,2 мм.

Выводы

1. Деформируемость дисперсно-упрочненных наноструктурных механически легированных медных материалов для изделий электротехнического назначения в горячем состоянии характеризуется следующими параметрами: допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси до 50–56%; уголгиба до 22–27° (при радиусегиба, равном диаметру прутка); угол закрутки до 42–48° (на длине 100 мм при диаметре прутка 16 мм).

2. Прошивка отверстия в заготовке с раздечей материала в стороны вызывает образование продольных трещин из-за пониженной пластичности материала поперек волокон. Вследствие этого разность диаметров исходной заготовки и канала матрицы при комнатной температуре не должна превышать 2,5% для ограничения процесса раздачи. Разность диаметров менее 0,8% приводит к образованию поперечных рванин в прошиваемых заготовках.

3. Конусность канала матрицы должна быть в пределах 0°40'–1°20'. При увеличении конусности снижаются силы трения заготовки о стенки канала матрицы и заготовка остается на прошивне из-за усадки при охлаждении, что затрудняет ее съём. При уменьшении конусности значительно возрастают усилия выталкивания заготовки.

4. Для получения тонкостенных поковок с глубоким отверстием без выраженной разностенно-

сти необходимо изготавливать центровочное отверстие на торце заготовки.

5. При прошивке электродов точечной сварки с наружными диаметрами до 25 мм и внутренними каналами диаметрами до 16 мм оптимальные значения углов при вершине конической части составляют 140–160°, а диаметры площадок – 0,4–0,5 от диаметра рабочей части прошивня.

6. Для заполнения рабочей полости штампа давление осадки должно быть не менее 500 МПа при температуре оснастки 450 °С и температуре нагрева заготовки 800 °С.

7. Для получения углагиба свыше 22–27° (при радиусегиба, равном диаметру заготовки) необходимо создавать сжимающие напряжения вдоль оси заготовки в процессе гибки.

8. За основной критерий обрабатываемости резанием следует принять шероховатость поверхности при чистовой обработке. Оптимальным режимом резания при точении резцами, оснащенными пластинками из ВК8 для достижения значений шероховатости поверхности $Ra = 1,6$, является скорость резания 90 м/мин, подача 0,1 мм/об при глубине резания 0,6 мм.

9. Для сверления глубоких отверстий малого диаметра в заготовках, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди, необходимо применять вибрации, накладываемые на подачу инструмента. Оптимальный режим обработки отверстий диаметром 0,9–1,1 мм: $n = 2800$ об/мин, $S_0 = 0,020$ мм/об; частота колебаний – 140 Гц (три колебания за один оборот инструмента); амплитуда колебаний – 0,03–0,04 мм. Применение сверления с рекомендуемым режимом существенно повышает производительность процесса и стойкость инструмента из быстрорежущей стали, значительно сокращает брак из-за увода и поломки инструмента, что невозможно при обычном сверлении.

В целом обрабатываемость резанием разработанного материала может быть приравнена к обрабатываемости деформируемых жаропрочных бронз типа БрАЖН10-4-4, БрАЖ9-4. В качестве технологических сред при обработке рекомендуется использовать жидкости на водной основе Аквол-12, СОЖ МР-29, НГЛ-205 или масла В-31, МР-8, ИС-12, Mobil 10W-30.

Литература

1. Ловшенко Г. Ф. Ловшенко Ф. Г. Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2005.
2. Ковка и штамповка цветных металлов: справ. М.: Машиностроение, 1977.
3. Ковка и объемная штамповка: справ. / Под ред. Н. Н. Сторожева. М.: Машиностроение, 1967.
4. Вульф А. М. Теория резания. Л.: Машиностроение, 1983.
5. Ящерицын П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Мн.: Выш. шк., 1990.
6. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970.