

ЦХП-3 в пользу ЦГП-1 (при неизменном объеме сбыта продукции ЦХП-3) – 7,6 млн руб.;

– снижения прибыли за счет перераспределения потока товарного горячего проката в пользу стана горячей прокатки ЦГП-2 (при неизменном объеме сбыта горячего проката) – 2,3 млн руб.;

– прироста прибыли за счет выпуска дополнительного объема товарного горячего проката – 2,9 млн руб.

Для реализации разработанного оптимизационного алгоритма производственного планирования с учетом альтернативных технологических маршрутов был создан модуль, предназначенный для формирования планов загрузки ЦГП-1 и ЦГП-2, оптимальных по критерию потока прибыли (см. рисунок).

Функциональные возможности программы:

- составление плана производства, оптимального по критерию потока прибыли;
- составление таблиц приоритетности ме-

таллопродукции;

- расчет загрузки «узких мест» в автоматическом и ручном режиме.

Исходными данными для работы программы являются данные из корпоративной информационной системы ОАО «ММК»:

- список заказов на товарную продукцию;
- формулы производства с расходными коэффициентами и технологические маршруты;
- таблица производительности агрегатов.

Достигнутые практические результаты апробации теоретических разработок в сфере оптимального производственного планирования подтверждают эффективность предложенной методологии и дают основание для дальнейшего совершенствования методов и инструментов производственного планирования с учетом ограничений материального потока.

Библиографический список

1. Реализация концепции производственного планирования на основе эффективного использования ограничений / Салганик В.М., Шмаков В.И., Песин А.М. и др. М.: Экономика, 2006. 212 с.
2. Проблемы оптимизации структуры разветвляющегося технологического потока горячекатаного проката ОАО «ММК» / Шмаков В.И., Песин А.М., Жлудов В.В. и др. // Вестн. МГТУ. 2007. № 1. С.58–59.

УДК 621.777:669.231.7

Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Биронт В.С., Рудницкий Э.А., Ходюков Б.П., Столяров А.В.*

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЮВЕЛИРНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПАЛЛАДИЯ

Драгоценные изделия из платиноидов – новая тенденция на консервативном российском рынке ювелирных украшений. До сих пор основным предназначением палладия было использование в автомобильных катализаторах. Спрос ювелирных изделий из платины и палладия в России пока очень ограничен, при этом она является одним из самых крупных производителей платиноидов в мире. По данным информационного агентства РБК в настоящее время на долю России приходится около 70% мирового производства палладия, однако доля нашей страны в мировом производстве ювелирных украшений составляет всего 4%, а основным и производителями ювелирных изделий из палладия являются США и Япония. Проблема скорейшего развития новых для российской ювелирной промышленности проектов – платиновой

линии и ювелирных изделий из палладия сформулирована крупнейшими производителями ювелирных изделий ОАО «АДАМАС» (г. Москва), ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова», ЗАО «Кыштымский медеэлектролитный завод», ОАО «Ювелиры Урала» (г. Екатеринбург) и др.

В работе решены задачи по разработке новых составов сплавов на основе благородных металлов платиновой группы, выбора оборудования и проектирования высокоэффективных технологий производства из новых сплавов слитков, полуфабрикатов и ювелирных изделий высокого качества, конкурентоспособных на мировом рынке.

Разработаны новые составы сплавов на основе палладия с легирующими элементами, которые улучшают его свойства и в качестве которых использовали золото, серебро, медь, родий, молибден, а также небольшие добавки (примеси) неблагородных металлов, включая кремний, оло-

* В работе принимали участие И.В. Усков, Н.А. Грищенко, И.С. Гоголь, Е.С. Лопатина, О.В. Бабушкин.

во, цинк и некоторые другие металлы.

Установлено, что модифицирование молибденом и родием измельчает структуру, при этом устойчивость химической неоднородности в таком тройном сплаве оказывается выше, чем в двухкомпонентном сплаве, при этом прочностные свойства увеличиваются на 15–20%, а пластические на 50%.

Выявлено также положительное влияние меди на повышение прочностных и пластических свойств полуфабрикатов из сплавов палладия. Как показали исследования, предложенные сплавы могут быть успешно использованы для получения ювелирных изделий с помощью операций микролитья, прокатки, листовой штамповки и волочения.

В соответствии с технологической схемой для обработки этих сплавов применяли следующие операции:

– литье в вакуумной печи, совмещенной с плавильным устройством центробежного вращения и вертикальным устройством заливки слитков диаметром 9,8 мм, и в вакуумной печи с последующей разливкой в медную изложницу слитков конической формы средним диаметром 105 мм (температура плавки составляла 1550–1570°C);

– горячую деформацию (ковку) больших слитков на пневматическом молоте с массой падающих частей 160 кг;

– холодную деформацию (прокатку и волочение) с целью получения проволоки для ювелирных изделий.

Анализ структуры литых заготовок показал, что почти все выплавленные сплавы после кристаллизации характеризуются наличием химической неоднородности по сечению дендритных кристаллов (дендритной ликвацией). Особенно сильно этот эффект проявляется с увеличением содержания серебра в составе сплавов. Аналогичный эффект проявляется при использовании комплексного легирования, кроме серебра, золотом, родием, молибденом. Наряду с этим, в некоторых сплавах, легированных медью и золотом, в литом состоянии дендритная ликвация почти не проявляется, что говорит о достаточно высокой диффузионной подвижности атомов меди, золота в твердом растворе на основе палладия.

Режимы горячей деформации в значительной мере определяют эффективность последующей обработки, поэтому в ходе работы оценивали влияние параметров ковки на структурное состояние и механические свойства полуфаб-

рикатов в сопоставлении с технологической схемой при отсутствии операций ковки (слитки диаметром 9,8 мм).

Исследованы закономерности влияния режимов холодной деформации на свойства изделий из палладиевых сплавов с различным содержанием легирующих элементов. При этом показано, что палладий обладает самыми низкими и упругими характеристиками в ряду платиновых металлов, сравнительно низким пределом прочности, большими значениями поперечного сужения и относительного удлинения. Установлено, что величина относительного удлинения резко падает с увеличением степени холодной деформации, причем характерна экспоненциальная зависимость изменения характеристик сопротивляемости деформации с понижением температуры. Скорость деформирования также оказывает существенное влияние на прочностные характеристики сплавов палладия, при этом с ее увеличением значительно повышается сопротивление деформации. В результате исследований установлено, что с увеличением степени пластической деформации при волочении заготовки диаметром 1,05 мм до диаметра 0,3 мм структура от зеренной постепенно превращается в волокнистую. При этом на проволоках промежуточных размеров сохраняется частично зеренное строение, а на конечных переделах в структуре проявляется исключительно волокнистое строение. Отжиг деформированных полуфабрикатов и проволок конечных размеров в результате развития рекристаллизационных процессов восстанавливает зеренное строение сплавов. Причем характер формирующихся структур существенно отличается при применении различных технологических параметров предварительного и окончательного отжига.

Наряду с другими исследовали сплав палладия (~85%), содержащий в качестве легирующих элементов медь, серебро, родий и молибден (25%) и примеси (0,026%).

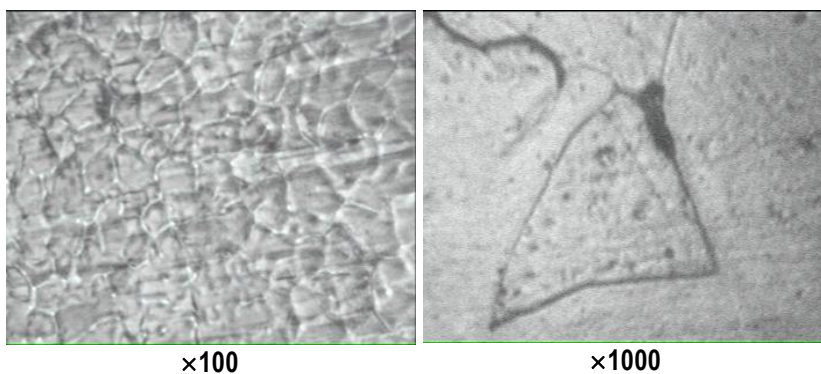


Рис. 1. Микроструктура литой заготовки исследуемого сплава

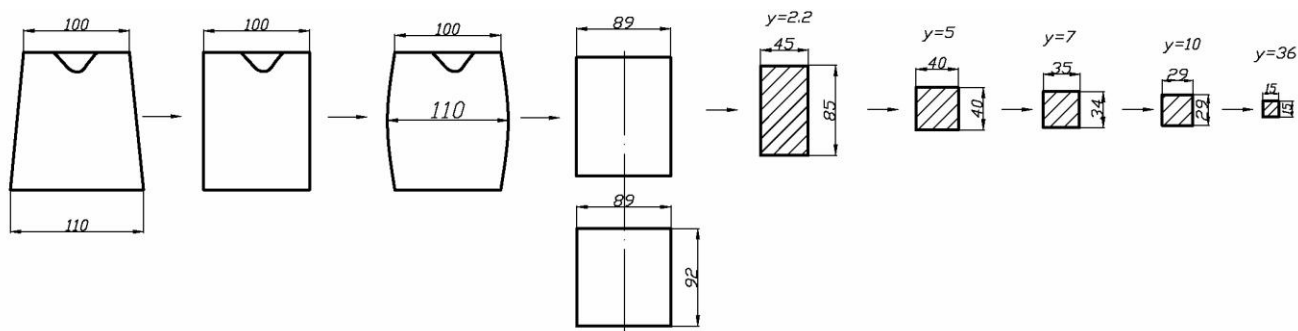


Рис. 2. Схема обработки слитков с использованием операций ковки

Литая структура этого сплава (рис. 1) представляет собой химически неоднородный твердый раствор дендритного типа.

Основным компонентом, образующим устойчивую дендритную форму химической неоднородности в сплаве, является серебро, что затрудняет прохождение процессов гомогенизации. Серебро, имеющее более низкую температуру плавления по сравнению с палладием, при неравновесной кристаллизации концентрируется в междендритных пространствах, затвердевающих в последнюю очередь. В таких участках часто проявляются высокодисперсные включения, которые можно связать со способностью поглощения серебром большого количества кислорода.

Ковку слитков, имеющих после обточки диаметр 100 мм, осуществляли при температуре 1000–1100°C по схеме, приведенной на рис. 2, с максимальной степенью укова $y=36$. Перед ковкой проводили гомогенизационный отжиг при температуре 900°C и времени выдержки 2 ч в защитной среде.

Известно, что при горячей пластической деформации в структуре происходят как деформационные, так и динамически развивающиеся рекристаллизационные процессы. При этом характер структурных изменений в условиях постоянства температурно-временных режимов зависит преимущественно от степени пластической деформации. Установлено, что при ковке ветви дендритных кристаллов вытягиваются вместе с междендритными пространствами (рис. 3), а химическая неоднородность при этом не устраняется. В заготовках сохранялось неоднородное распределение серебра и связанного с ним кислорода.

Увеличение степени горячей деформации усиливает эффект рекристаллизационного изменения структуры. Кроме того, не исключено, что развитие рекристаллизации происходит непосредственно в течение деформационного цикла

обработки, а возникающие рекристаллизованные зерна вновь деформируются, приобретая дополнительное деформационное упрочнение, поэтому твердость сохраняется на высоком уровне.

При степени укова, равной 7, рекристаллизацию претерпевают не только исходно деформированная структура, но и рекристаллизованные зерна, подвергшиеся деформации, которые снова рекристаллизуются, что сопровождается почти полной рекристаллизацией всего объема металла.

Дальнейшее увеличение степени горячей деформации (степени укова до 10 и 36) может приводить к деформационному воздействию на уже рекристаллизованную структуру, что сопровождается формированием волокнистых структур, связанных с вытягиванием ранее рекристаллизованных зерен и новой рекристаллизации в этих полуфабрикатах. Существенного влияния на твердость эти процессы уже не оказывают, а микротвердость остается на уровне 120 единиц НV. Временное сопротивление разрыву составило $\sigma_b = 548,5$ МПа, а относительное удлинение – $\delta = 24,6\%$.

Прокатку заготовок проводили в холодном состоянии на сортопрокатном стане с размера 15×15 мм до размера 1,05 мм. Промежуточные



Рис. 3. Структура заготовки при степени укова $y=36$, $\times 650$

заготовки размером 1,05 мм после сортовой прокатки и отжига при 850°C в течение 30 мин (рис. 4, а) проявляют весьма крупное рекристаллизованное зерно (порядка 20–40 мкм) и низкую твердость (80–115 НV), что свидетельствует об интенсивно развивающихся рекристаллизационных процессах, поскольку степень накопленной холодной деформации при прокатке составляла более 98%. Механические свойства отожженной заготовки после прокатки составили: $\sigma_b=333,8$ МПа; $\delta=24,1\%$.

Волочение проволоки проводили на стане барабанного типа по маршруту 1,05–1,0–0,9–0,8–0,6–0,5–0,45–0,4–0,35–0,3 мм. Структура проволоки характеризуется частично зерненным строением, а на конечных переделах в структуре проявляется исключительно волокнистое строение (рис. 4, б). Отжиг деформированных полуфабрикатов и проволок конечных размеров в результа-

те развития рекристаллизационных процессов восстанавливает зеренное строение сплавов. Причем характер формирующихся структур и свойств существенно различен при применении различных технологических параметров отжига. Так, например, после отжига в вакууме проволоки диаметром 0,3 мм механические свойства составили: $\sigma_b=339,7$ МПа; $\delta=27,2\%$.

Исследование механических свойств полученных полуфабрикатов проводили на разрывной машине с компьютерной обработкой данных испытаний. Зависимости сопротивления деформации от относительной деформации заготовки диаметром 1,05 мм, отожженной при $T=850^\circ\text{C}$ и времени выдержки $\tau=30$ мин, приведены на рис. 5. Существенное влияние на прочностные характеристики исследуемого сплава палладия оказывает скорость деформирования, при этом с ее увеличением значительно повышается сопротивление деформации.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод, что предложенные сплавы характеризуются достаточно высокими механическими свойствами, что позволяет проводить их пластическую деформацию без применения специальных технологий. При этом пластические характеристики позволяют получать проволоку достаточно малых диаметров с использованием традиционного оборудования.

Вместе с тем последующее использование полученной проволоки для цепаивания, несмотря на достижение требуемого уровня пластических и прочностных свойств, выявил некоторые особенности, связанные со спецификой аргонодуговой сварки, характеризующейся высокими температурами нагрева металла в очаге сварки.

На рис. 6 представлен вид дефектов, образующихся при сварке. Из рисунка видно наличие большого количества пор, а также раскрытие сварного шва, что

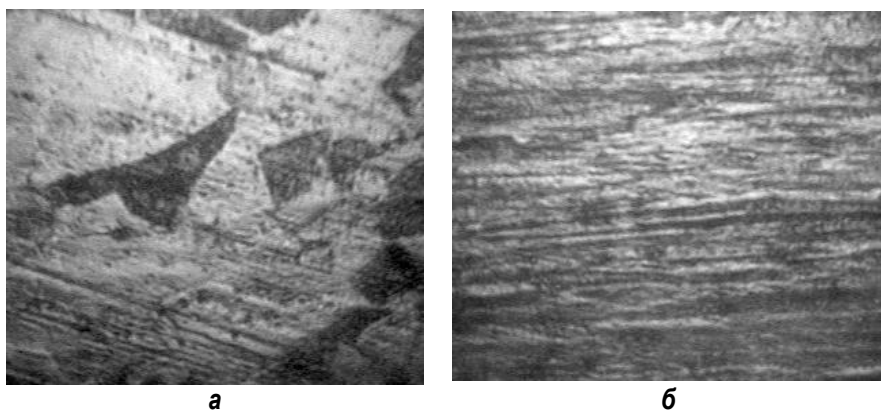


Рис. 4. Микроструктура деформированных полуфабрикатов, $\times 1000$:
а – отожженная заготовка после прокатки диаметром 1,05 мм;
б – нагартованная проволока диаметром 0,3 мм (степень деформации 92%)

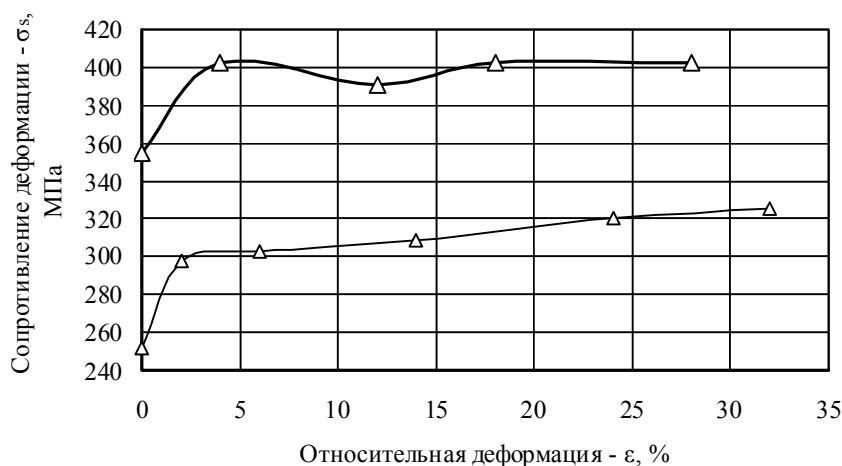


Рис. 5. Кривые деформационного упрочнения отожженной заготовки после прокатки диаметром 1,05 мм при скорости деформирования 500 мм/мин (верхняя кривая) и 200 мм/мин (нижняя кривая)

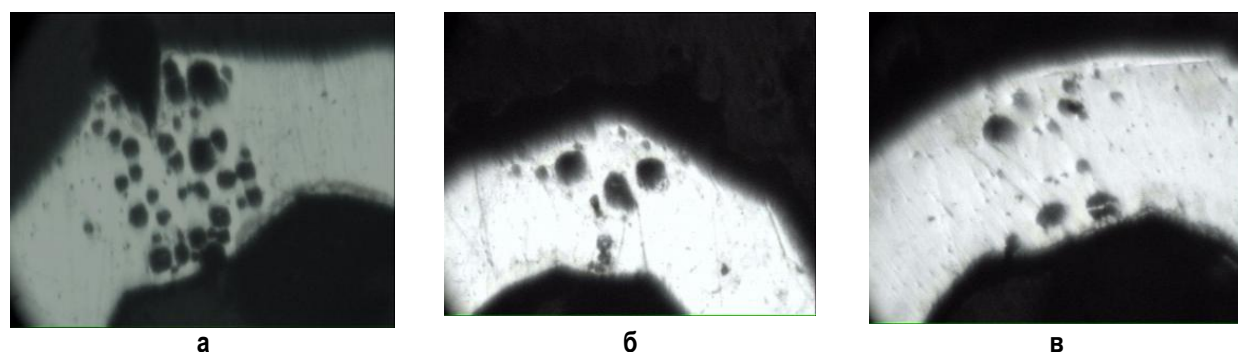


Рис. 6. Внешний вид сварного соединения проволоки, отожженной с применением различных защитных сред (а – аргон, б – вакуум), и из сплава палладия (в), модифицированного титаном, $\times 120$

ведет к разрушению цепочки (рис. 6, а).

Эффект интенсивного высокоскоростного парообразования в сплавах палладия с серебром, обнаруженный в процессе исследований, можно связать с химическим взаимодействием кислородных атомов, концентрирующихся в областях, обогащенных серебром, с атомами водорода, насыщающими области на основе палладия. Одновременное расплавление обоих твердых растворов при плазменном нагреве в зоне сварки обеспечивает концентрацию обоих газов в расплаве и их химическое взаимодействие с образованием паров воды. Это явление нами названо «внутренним горением водорода».

Высокой газонасыщенности сплавов на основе палладия могут способствовать различные технологические операции обработки, выполняемые в открытой атмосфере без изоляции от внешней среды. Для снижения газонасыщения сплавов на завершающем этапе изготовления проволоки введена вакуумная обработка, создающая градиентное распределение газовых атомов в твердом растворе от поверхности до сердцевины, что приводит к диффузионному перераспределению их из центральных объемов к поверхности, и к дальнейшему переходу во внешнюю среду в молекулярном виде в связи с образованием ковалентных связей между атомами, выходящими на поверхность. Опытные промышленные испытания изделий при отжиге проволоки в вакууме (рис. 6, б) показали качественное снижение порообразования по сравнению с применением при отжиге в качестве защитной атмосферы аргона (см. рис. 6, а).

Другая возможность снижения эффекта газовой выделения при сварке – это связывание части газовых примесей некоторыми дополнительными легирующими элементами. В известных

сплавах такую роль играют кобальт и никель, образующие с газовыми примесями устойчивые химические соединения, что уменьшает интенсивность газовой выделения при быстром сварочном нагреве и таком же быстром охлаждении. При создании новых сплавов такую роль могут играть такие компоненты, как титан, хром, цирконий и некоторые другие. Поэтому в ранее разработанные экспериментальные сплавы в количестве от 0,3 до 0,5 массовых долей вводились следующие модификаторы: хром, титан, родий, молибден. Полученные цепочки из этих сплавов имели сварной шов (рис. 6, в), аналогичный представленному выше, при этом количество пор в сварном шве оказалось меньше, чем в аналогичных сплавах без модификаторов. Уменьшение содержания газовых примесей, таким образом, снижает эффект «внутреннего горения водорода».

Кардинальным решением в получении качественных готовых сварных цепей из палладиевых сплавов остается путь изменения химического состава сплавов за счет исключения серебра как легирующего компонента, уменьшая при этом насыщение сплава кислородом и исключая парообразование.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложены новые сплавы палладия 850 пробы, характеризующиеся высокими прочностными и пластическими свойствами, проведены исследования и установлены закономерности влияния технологических параметров деформации и термообработки на структуру и свойства полуфабрикатов из этих сплавов, а также рекомендованы в производство те литейные и деформируемые сплавы, которые имеют комплекс характеристик, необходимых для изготовления ювелирных изделий.