

РАЗДЕЛ VII

**ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
МЕТАЛЛОВ**

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И МОДЕРНИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ЗАВОДАХ РФ

Ю.А. Горбунов

ООО «Инженерно-технологический центр «СИАЛ», г. Красноярск, Россия

В последние два десятилетия в РФ сложилась парадоксальная ситуация – страна, занимающая одно из лидирующих мест в мире по производству алюминия, по его потреблению на душу населения значительно отстает от развитых стран, уступая в 3 раза Германии, в 5 раз – Японии, в 6 раз – США.

Такое положение является следствием резкого падения в 90-х годах прошлого века объемов производства оборонного машиностроения и не развитости отраслей промышленности, ориентированных на удовлетворение широко круга потребностей населения страны. В мировой практике наиболее емкими областями потребления алюминия традиционно являются транспорт, строительство, электротехника, упаковка и потребительские товары. При этом в отличие от СССР, кроме авиации и ракетной техники в транспортном секторе наиболее значительная часть полуфабрикатов из алюминиевых сплавов (АС) потребляется такими отраслями машиностроения как автомобилестроение, производство железнодорожного подвижного состава, городских видов транспорта и судостроение.

Автомобилестроение. Еще в 1924 г. на предприятии «Швабские металлургические заводы» разработали легковой автомобиль с использованием самонесущих алюминиевых конструкций, затем появились легкие спортивные автомобили, а в конце 20-х годов и первые автобусы с алюминиевыми кузовами (прежде всего в Швейцарии).

Уменьшение собственной массы автомобиля за счет применения АС привело к увеличению грузоподъемности, снижению расхода топлива, износа шин и эксплуатационных расходов. Высокая коррозионная стойкость АС увеличила ресурс работы узлов и деталей автомобилей, работающих в условиях агрессивного воздействия внешней среды. Поэтому алюминиевый прокат в мировом автомобилестроении получил достаточно широкое применение для изготовления кузовов, гасителей ударов, элементов ходовой части и значительной номенклатуры навесных деталей – панелей дверей, крышек капота и багажника и т. п. Большой шаг в этом направлении был сделан компанией «Audi AG» при создании автомобиля «Audi A8», кузов которого полностью состоит из АС. Эти работы концерном продолжают непрерывно. По сравнению с прежней версией, жесткость кузова Audi A8, выпуск которой начат в 2011 г., выросла на 25% при снижении веса на 20%. Разработчики утверждают, что замена стали алюминием позволяет добиться экономии топлива на 5–7% при снижении массы автомобиля на 10%. Кроме того, применение алюминия позволяет уменьшить выбросы углекислого газа в атмосферу.

В отечественном автомобилестроении в советское время массовое применение АС ограничивалось, в основном, производством деталей двигателей (корпусов, литых и штампованных поршней), а также экструдированных профилей для бамперов.

Заметным вкладом в увеличении доли АС в отечественных автомобилях стало освоение производства литых колес красноярскими компаниями «К и К» и «СКАД». Оба предприятия реализовали передовые технологии литья колес под низким давлением с последующей механической обработкой и нанесением покрытий порошковыми красками с применением современного оборудования, закупленного в Германии, Италии, Южной Корее и других странах. В результате не только гигант отечественного автопрома «АвтоВАЗ», «ГАЗ», «УАЗ», но и российские заводы по выпуску автомобилей марок «Форд», «Рено», «Хундай», «Киа», «Ссанг Йонг» и другие отказались от за-

рубежных поставок колес из АС и перешли к применению продукции красноярских предприятий. По такому же сценарию развиваются в настоящее время взаимоотношения и с другими компаниями, создающими свои производства в России. Однако для этого от отечественных производителей потребовалось не только постоянное совершенствование технологических процессов и оборудования, но и непрерывное развитие системы менеджмента качества для удовлетворения постоянно возрастающих требований потребителей, определяемых жесткой рыночной конкуренцией, с чем оба предприятия успешно справляются по настоящее время.

Ковано-штампованные колеса из АС так же сыграли свою роль в увеличении доли АС в конструкциях отечественных автомобилей. Однако по объему потребления они значительно уступают аналогичным литым изделиям. В то же время в период конверсии оборонных производств они стали наиболее массовым продуктом практически для всех кузнечно-прессовых цехов металлургических заводов бывшей авиационной отрасли РФ. При этом достаточно совершенная технология производства изделий, превосходившая в конце прошлого века по технико-экономическим показателям многие известные зарубежные аналоги, разработана и реализована специалистами научно-технического центра и технических служб Красноярского металлургического завода.

Разработанная на КраМЗе технологическая схема включала (патенты №№ 12055, 16649, 20266, 22760, 26982, 2217523 и др.):

- полунепрерывное литье в низкий кристаллизатор с применением высокоэффективных модифицирующих лигатур (что исключило необходимость механической обработки поверхности слитков);
- экономичный индукционный нагрев заготовок перед штамповкой;
- высокотемпературную деформацию заготовки в разъемном штампе специальной конструкции с получением готовой заготовки колеса за одну операцию;
- закалку штамповок в специализированной установке с использованием тепла деформации;
- механическую обработку ковано-штампованных заготовок и их порошковую покраску.

Обеспечивая ряд ценных эксплуатационных преимуществ перед аналогами из литейных АС, ковано-штампованные изделия, тем не менее, зачастую проигрывают им по совокупности таких потребительских характеристик как дизайн и цена. Поэтому применение этих изделий в настоящее время ограничивается специфическими областями, в которых востребованы их специфические характеристики (гоночные мотоциклы и автомобили, например, такие как «КАМАЗ» – неоднократный победитель ралли «Париж-Дакар») или вкусами потребителей, количество которых весьма ограничено. У отечественных автозаводов продукция массовым спросом не пользуется.

Несмотря на высокие эксплуатационные характеристики изделий, мало вероятно, что технология производства ковано-штампованных колес в реализованном виде имеет будущее даже в размерном секторе более 20–22 дюймов. Связано это с тем, что производительность процесса, включающего литье – штамповку – закалку – механическую обработку заготовок, уступает многим современным технологиям, выход годового несопоставимо мал, затраты на производство велики.

Более перспективными для производства колес из деформируемых алюминиевых сплавов для высоко нагруженной техники представляются, например, процессы раскатки. Один из таких вариантов – мало отходная высоко скоростная раскатка литых заготовок в осевом штампе закрытого типа на вертикальном гидравлическом прессе (ACDR-процесс), с последующими операциями прессования стилизованной заготовки на гидравлическом штампованном и дыропробивном прессах, обкатки внутренней боковой поверхности обода колеса на трехвалковой формующей машине и термической обработки готовых колес. Процесс реализован в поточной технологической линии фирмой SMS Eumuco GmbH (Wagner Banning Ring Rolling Division). По данным разработчиков эта технология обеспечивает самый низкий вес колеса, снижение затрат на 20%, получение оптимизированной структуры диска в соответствии с напряженными состояниями под нагрузкой, высочайший глянец поверхности.

Другой пример – это производство колес по технологии, включающей сварку колец из алюминиевых полосовых заготовок, их последующие отбортовку и деформацию с использованием прессового и раскатного оборудования, разработанного и изготов-

ленного по заказу компании «Volvo» фирмой «WF Maschinenbau und Blechformtechnik GmbH & Co». Проектная производительность такой линии 4 млн. штук колес в год. К этой же группе относятся процессы, созданные компаниями «Leifeld Autospin», «Bohner + Kohle» и рядом других производителей оборудования. В нашей стране такие производства в настоящее время отсутствуют.

Производство других элементов конструкции автомобилей для первичного рынка (например, деталей кузова, элементов подвески и т. д.) не получило в нашей стране развития как из-за менталитета отечественных автопроизводителей, так и вследствие не готовности рынка к потреблению продукции с повышенной ценой из-за достаточно низкой покупательной способности населения.

Еще одной причиной послужило отсутствие в парке оборудования основных отечественных заводов по углубленной переработке АС прессов для получения мелких штамповок весом до 3 кг, которые наиболее широко применяются в конструктивных узлах автомобилей. На Западе более 30 крупных фирм выпускают винтовые прессы номинальной силой до 310 МН. Они проще, дешевле в эксплуатации, чем КГШП и гидравлические прессы и позволяют получать более точные поковки. В РФ винтовые прессы не выпускают. Единственный завод остался в Казахстане (г. Чимкент). Наряду с этим для заводов РФ необходимо проведение работ по компьютеризации кузнечно-прессового оборудования и совершенствованию технологии КШП на этой основе.

Железнодорожный транспорт. В 1934 г. американская компания «Baltimore+Ohio Railroad» впервые изготовила 8 цельно алюминиевых пассажирских вагонов (клепка + дуговая сварка), которые весили всего 350 т по сравнению с 650 т стальными аналогами.

К настоящему времени в связи с все возрастающими требованиями к эксплуатации подвижного состава – повышением скорости движения поездов и нагрузки на ось, созданием большегрузных составов и увеличением объемов перевозок применение АС в качестве основного конструкционного материала для конструкций грузовых и пассажирских вагонов за рубежом давно стало повседневной реальностью. После внедрения процессов изготовления крупногабаритных профилей и сварки их по всей длине вагона общие затраты на изготовление алюминиевой кузовной конструкции вагона стали примерно на 30% ниже, чем стоимость стальной конструкции.

Попытки реализации аналогичных проектов в СССР по ряду организационных и технических проблем широкого практического применения не нашли (Уральский ВСЗ – грузовые полувагоны, Алтайский ВСЗ – крытые грузовые вагоны, Калининский ВСЗ – скоростной поезд «Русская тройка» и более поздние проекты, Рижский ВСЗ – поезда ЭР-200, ЭР-23 и др.).

Вследствие существенного отставания отечественного железнодорожного машиностроения от уровня развитых зарубежных производителей и длительным периодом времени, необходимого для самостоятельного развития таких производств, Правительством РФ и ОАО «РЖД» заключен ряд соглашений с мировыми лидерами отрасли, такими как Bombardier, Alstom Transport, Siemens и другими. Эти соглашения реализуются в настоящее время в рамках различных проектов, связанных с приобретением подвижного состава за рубежом, с модернизацией действующих производств, с созданием новых современных предприятий на территории РФ. Наиболее значимыми проектами являются приобретение скоростных поездов типа «Сапсан», организация выпуска современных локомотивов, вагонов международного класса типа «RIC», производства электропоездов типа «Desiro» и других видов техники.

Реализация практически всех перечисленных проектов сконцентрирована на машиностроительных заводах европейской части России и Урала. Это создаёт благоприятные возможности участия в проектах локализации производства отдельных компонентов близко расположенных металлургических заводов и машиностроительных предприятий, производящих компоненты железнодорожной техники с использованием АС. Среди металлургических предприятий это в первую очередь КУМЗ, который на протяжении многих лет проводит целенаправленную политику модернизации прессового производства для обеспечения требований производителей железнодорожной техники, «ВСМПО – Ависма» и «СМЗ Алкоа», которые так же обладают мощным прессовым оборудованием. Среди машиностроительных компаний – ОАО «Тверской ВСЗ», предприятия группы «Синара» и другие заводы.

Для Сибири создание аналогичных кластеров по производству подвижного состава из АС в настоящее время представляется мало вероятным по следующим причинам:

- отсутствует заинтересованность в организации производства подвижного состава в Сибири у головного заказчика – ОАО «РЖД», сконцентрировавшего свои ресурсы на реализации выше перечисленных проектов в европейской части страны;
- нет проектной документации на подвижной состав и финансовых ресурсов, необходимых для создания производств и сертификации продукции;
- на металлургических предприятиях Сибири по глубокой переработке алюминия нет мощного прессового и прокатного оборудования, позволяющего производить крупногабаритные полуфабрикаты из АС (прессованные панели, листы), без чего невозможно изготовление современных конкурентоспособных вагонов.

В связи с этим в настоящее время для предприятий Сибири, ориентирующихся на производство компонентов железнодорожной техники из АС, более целесообразным подходом представляется сотрудничество с вагоно-ремонтными заводами (ВРЗ) в части модернизации существующих транспортных единиц, интерьер которых морально и физически устарел, а несущие конструкции вполне могут эксплуатироваться еще достаточно долгое время.

Подтверждением результативности такого подхода может являться успешный опыт красноярских компаний «ДАК-инжиниринг» (ныне «Инженерно-технологический центр «СИАЛ») и «ДАК», входящих в холдинг «СИАЛ», которыми реализована серия проектов, позволяющих при выполнении ремонтных работ создать с применением изделий из деформируемых алюминиевых сплавов вполне современный дизайн и приемлемый уровень комфорта в вагонах различного типа. Этот подход реализован ими практически со всеми ВРЗ страны при ремонте купейных и плацкартных вагонов пассажирских поездов дальнего следования, вагонов – ресторанов, вагонов электропоездов, а так же спецвагонов различного назначения.

Опыт эксплуатации этих вагонов подтвердил, что условия комфортности в них могут быть значительно улучшены за счет применения при проведении ремонта оконных блоков, выполненных в виде двух рам из алюминиевого профиля, соединенных между собой пластиковой термоизоляцией, одно- или двухкамерных стеклопакетов, в которых разделение стекол осуществляется с помощью TPS-рамок и резиновых или силиконовых элементов, обеспечивающих уплотнение стеклопакета относительно рамы и рамы относительно кузова вагона (рис. 1).



Рис. 1. Алюмопластиковый оконный блок пассажирского вагона
а – в закрытом положении; в – с открытой форточкой

Преимуществом конструкции является то, что интегрированный коэффициент теплопередачи окон составляет менее $2,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что позволяет значительно снизить теплопотери. Конструкция окон исключает обмерзание их внутренних поверхностей и собирание конденсата при относительной влажности воздуха внутри вагона до 30% и наружной температуре до -50°C . Гарантийный срок эксплуатации окон со-

ставляет не менее 6 лет при назначенном сроке службы или хранения 28 лет. Поэтому применение оконных блоков такой конструкции в короткий срок стало обыденным как при строительстве новых, так и при ремонте старых вагонов.

Широкая номенклатура окон, разработанная и выпускаемая компанией ООО «ДАК», нашла широкое применение не только на Красноярском ЭВРЗ, территориально близком к ней, но и практически на всех других ремонтных предприятиях, расположенных в разных регионах страны. Наряду с отечественными предприятиями в число потребителей продукции вошли заводы многих стран СНГ и ближнего зарубежья, например, Монголии.

Другим алюминиевым продуктом в вагонах являются дверные конструкции, которые могут использоваться как в тамбурной группе, так и во внутри вагонном интерьере. Например, при выполнении ООО «ДАК-инжиниринг» работ по оснащению вагона – ресторана модели 61–536.1, разработанного ЗАО «Вагонмаш», спроектировано и изготовлено 9 типоразмеров дверей (в том числе и огнестойкого исполнения), выполненных из алюминиевых профилей различного вида. Аналогичный подход использован и при выполнении заказа компании «Твема» по оснащению вагонов – лабораторий, предназначенных для контроля состояния дорожного полотна. Для оснащения купе пассажирских вагонов так же предлагаются сдвижные двери, которые имеют каркасы из профилей алюминиевых сплавов.

Кроме оконных блоков и дверей алюминиевые сплавы начинают находить применение при ремонте пассажирских вагонов для изготовления потолочных панелей, межкупейных перегородок, каркасов спальных полок, встроенных туалетных модулей и многих других более мелких элементов интерьера.

Кроме эстетичного внешнего вида и высокой стойкости элементов интерьера (в том числе и покрытых порошковыми красками) применение АС в значительной степени позволяет снизить вес вагона и увеличить полезную нагрузку на конструкцию. Например, только замена стальных каркасов спальных полок на алюминиевый аналог обеспечила снижение веса плацкартного вагона более, чем на 600 кг. По данным эксплуатационных служб в целом применение АС в конструкции вагона позволяет повысить грузоподъемность и скорость движения, снизить износ рельсов и расход электроэнергии или топлива на тягу в среднем на 10%, сократить затраты на текущий и капитальный ремонт вагонов до 18%.

Выше отмечалось, что в отечественной практике было реализовано несколько попыток создания цельно алюминиевых электропоездов. Но, в конечном счете, эти поезда в серийную эксплуатацию по разным причинам не вышли. Более удачным представляется опыт модернизации вагонов, прошедших определенный период эксплуатации (рис. 2).



Рис. 2. Дизайн-проект интерьера вагона электропоезда, представленного на Международной выставке «Экспо-1520»

Например, на Международной выставке «Экспо-1520» в 2009 г. были представлены демонстрационные образцы двух вагонов электропоезда, интерьер которых был спроектирован конструкторскими службами ОАО «Московский локомотиво-вагоноремонтный завод» (МЛРЗ), ООО «ДАК-инжиниринг», НПО «Вояж» и ряда других компаний.

В этих вагонах компании ООО «ДАК-инжиниринг» и «ДАК» представили автоматические входные двери, межтамбурные двери, салонные двери, потолочные панели, вентиляционные каналы, полки багажные, оконные блоки и другие элементы интерьера, выполненные из алюминиевых профилей и листового алюминиевого проката, покрытых порошковыми красками. Конструктивное исполнение этих изделий наряду с ранее отмеченными преимуществами, достигнутыми за счет применения АС, отличается высокой вандалостойкостью, что немало важно для поездов пригородного сообщения.

В интерьере вагона электропоезда впервые была представлена конструкция притворно-сдвижного окна – ПСО (патент № 91039), в котором за счет оригинального решения ряда механизмов, опускание форточка из закрытого положения происходит внутрь салона параллельно основному стеклопакету, рис. 3.

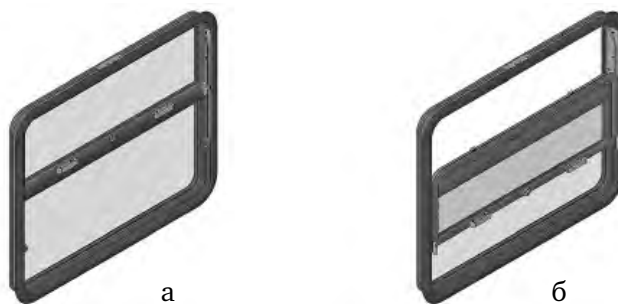


Рис. 3. Притворно-сдвижное окно электропоезда
а – в закрытом положении; б – в открытом положении

В открытом положении форточка не выходит за габариты окна, поэтому минимален риск травмирования пассажиров. Как и другие разработки, выполненные для условий российской эксплуатации, эта конструкция обеспечивает хорошую теплоизоляцию салона и исключает промерзание окна. С учетом обозначенных преимуществ элементов интерьера из алюминиевых сплавов выполненные разработки в разном сочетании приняты ОАО «РЖД» для комплектации вагонов 1, 2, и 3-го классов на ведущих вагоноремонтных предприятиях страны.

В 2010 г. по решению ЦЛПр ОАО «РЖД» такими окнами было укомплектовано несколько вагонов одного из московских электропоездов. ПСО успешно прошли испытания в условиях опытной эксплуатации, поэтому принято решение на производство установочных промышленных партий.

Наряду с продвижением алюминиевых конструкций в ремонте электропоездов наметилось и расширение объемов их применения при создании новых единиц моторвагонного подвижного состава. Так, например, по заказу Санкт-Петербургского ЗАО «НИИ «ТрансЭлектроПрибор» компанией «ДАК-инжиниринг» разработано 17 типоразмеров конструкций, которые применены на Торжокском ВСЗ в составе новых моделей дизель – и электропоездов, переданных в эксплуатацию в 2009 г.

Опыт проектирования и изготовления компонентов подвижного состава, накопленный предприятиями холдинга «СИАЛ» в работе с ВРЗ, и сформированная при этом система менеджмента качества были высоко оценены специалистами различных заводов компании «Siemens, неоднократно в течение 2010 г. проводивших их аудиты. В результате холдинг был рекомендован ОАО «РЖД» как надежный партнер при реализации перспективных проектов, что уже сыграло положительную роль в динамике роста объемов производства.

Городской транспорт. Опыт зарубежных разработчиков и эксплуатационников показывает, что вагоны метрополитена, изготавливаемые из алюминиевых сплавов практически на 2–3 тонны легче стальных, а повышенные затраты на их изготовление окупаются через 3–4 года за счет экономии расхода электроэнергии на тягу и сокращение текущих затрат на ремонт вагонов и содержание путей. Поэтому во многих странах мира перешли к активному применению АС в подвижном составе метро. Однако отечественный опыт пробной эксплуатации вагонов метро из АС оказался негативным вследствие коррозионного поражения поверхности опытных конструкций и их применение было ограничено несколькими элементами интерьера.

В настоящее время ООО «ДАК» поставляет для ремонтных работ только сварные створки дверей вагонов метро. ООО «ИТЦ «СИАЛ» разработаны и проходят испытания на ЗАО «Вагонмаш» клеесварные створки с каркасом из профилей сплава АД31 и облицовочными листами из сплава АМг2, а так же концевые двери вагонов новой конструкции. Выполнены проектные разработки форточек для вагонов метро и алюмопластиковых окон, которые испытываются на Мытищинском машиностроительном заводе.

Другим видом городского транспорта, активно пробивающим дорогу в российскую жизнь, являются монорельсовые системы, эксплуатация которых началась несколько лет тому назад в г. Москве, рис. 4. Преимуществом этого вида транспорта является то, что для строительства монорельсовой дороги практически не требуется полоса отчуждения, так как опоры, на которые опирается эстакада, занимают минимум места. Транспорт экологически чист и практически бесшумен. Позволяет довольно просто организовать транспортные развязки с автодорогами, например, с МКАД.

В рамках совместных проектов ООО «ИТЦ «СИАЛ», «ДАК» и ОАО «Московская монорельсовая дорога» проводят работы по расширению применения АС в этом виде транспорта. В качестве первых изделий нашли применение колеса из АС, стабилизирующие фиксацию вагона, и створки дверей, выполненные по передовой клеесварной технологии. Проработаны конструкции профилей силового каркаса вагона. В рамках планов дальнейшего развития работ планируется проектирование и организация производства вагонов цельно алюминиевой конструкции.

Аналоги всех выше перечисленные видов изделий могут быть с успехом применены при производстве и ремонте городского транспорта – троллейбусов, трамваев и автобусов. Первые шаги в этом направлении также уже сделаны совместно предприятиями РФ и СНГ.



Рис. 4. Подвижной состав монорельсовой транспортной системы с дверными створками из алюминиевых сплавов

Речной транспорт. Многие десятилетия отечественное судостроение было ориентировано на разработку и производство военной техники. Пассажирские суда для речного флота (за исключением судов на подводных крыльях) закупались за рубежом. В результате имеющийся пассажирский флот страны к настоящему времени изношен более, чем на 90%, а собственное производство речных судов до сих пор не организовано.

Можно предполагать, что после решений, принятых Правительством РФ, восстановления инфраструктуры судоходных путей и начала разработки месторождений Сибири появится устойчивый спрос на речные суда. Пока большинство речных верфей выживает случайными заказами. Спрос на продукцию речников низок по двум причинам. Во-первых, речные пароходства не инвестируют в постройку судов из-за высоких рисков, связанных с ухудшением в последние годы состояния гидротехнических сооружений и судоходных путей. Во-вторых, российские банки и лизинговые компании избегают участвовать в реновации речного флота, так как сроки окупаемости таких вложений достаточно велики (10–15 лет).

В рамках программ по продвижению деформируемых АС в ремонтные проекты судпрома ООО «ИТЦ «СИАЛ» по заказу «Красноярского судоремонтного центра»

и ряда частных заказчиков разработал более 50 типоразмеров изделий, предназначенных для установки на суда следующих типов:

- маломерные речные суда;
- теплоходы пригородного сообщения;
- круизные теплоходы;
- речные толкачи, нефтеналивные танкеры и другие суда.

Конструкторская документация согласована с Енисейским Речным регистром и допущена к применению на судах, эксплуатируемых во всех регионах страны.

Одновременно по заказу ОАО «Инженерный центр судостроения» (г. Санкт-Петербург) разработано несколько серий оконных систем для судов нового типа – скоростных речных катамаранов (проект 2852.1), спроектированных для эксплуатации на крупных и мелких реках, рис. 5.



Рис. 5. Скоростной катамаран разработки ОАО «Инженерный центр судостроения» для эксплуатации на р. Енисей и ее притоках.

В результате выполненных разработок значительно расширены области применения профильной продукции из деформируемых алюминиевых сплавов, производимой в компании ООО «СИАЛ» и созданы дополнительные рабочие места, что немаловажно в условиях после кризисной ситуации в промышленности. Одновременно полученный опыт разработок и эксплуатации изделий создает базу для наращивания применимости алюминиевых сплавов в выше упомянутых отраслях машиностроения в рамках последующей реализации государственных программ их развития.

ОПТИМИЗАЦИЯ СНЯТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ЛИСТОВ СПЛАВА 7175 ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКЕ

Дж. Добра, И. Сава, А. Гуура

VIMETCO ALRO, Румыния

Краткий обзор

Измеренные продольное и поперечное остаточные напряжения являются сжимающими напряжениями на поверхности и растягивающими в середине листов. В листах толщиной 30 мм сплава 7175 с минимальным снятием напряжений (остаточная деформация 0,4%) максимальное значение – 71 МПа было обнаружено в продольном и – 91 МПа в поперечном направлении. Применяя различную пластическую деформацию (остаточная деформация до 3,5%), снятие напряжений уменьшало средние значения до ± 10 МПа.

Механические свойства были ослаблены как результат снятия напряжений: предел текучести понижен до 40 МПа. Это следствие небольшой пластической деформации в металле, которая увеличивает плотность дислокаций. Поскольку дислокации являются хорошим местом для гетерогенного зародышеобразования фаз закалки, фазы закалки будут крупнозернистыми осадками с негативным влиянием на механические свойства.

На основе статистических моделей, которые были установлены как для остаточных напряжений, так и для механических свойств, оптимальное растяжение было определено при остаточной деформации $2,74 \pm 0,64\%$, что обеспечивает остаточное напряжение между –15 и +15 МПа, механические свойства сверх минимального стандарта на 7% и хороший характер пластической деформации листов.

Ключевые слова

Остаточное напряжение, снятие напряжений, растяжение, способ снятия слоя, датчики деформации.

Введение

Листы серии 7xxx марки Tx5y используются обычно для применений в авиации и космонавтике, поскольку выявляют хорошее сочетание свойств (прочность, вес, ударную вязкость, коррозионное растрескивание и т.д.). Во время закалки, после термической обработки на твёрдый раствор, вследствие высокой скорости охлаждения, неизбежны остаточные термические напряжения, и, даже если используется специальная закалочная среда (полимеры или горячая вода), уровень остаточных напряжений всё ещё остаётся высоким и влияет на стабильность размеров обработанных деталей. В технологическом процессе критическим этапом является снятие напряжений, который выполняется одноосным растяжением (марка Tx51), обычно в направлении прокатки, или сжатием (марка Tx52), обычно в поперечном направлении. Стабильность размеров сильно зависит от степени пластической деформации во время растяжения или сжатия.

Непосредственное измерение остаточных напряжений невозможно, поэтому были разработаны косвенные методы. Эти методы используют измерения пластической деформации, которая создаётся модификацией равновесия распределения напряжений в результате съёма материала.

Сферой рассмотрения данной статьи является оптимизация растяжения путём установления наиболее рекомендуемого значения пластической деформации, которое должно применяться на листах сплава 7175 для применений в авиации и космонавтике. Экспериментальное проектирование процесса рассматривало реальные условия и предпосылки, существующие на заводе АЛРО, Слатина, а результаты применялись для оптимизации процесса и продукции на этом заводе.

Экспериментальные исследования и данные

Семь листов размером 30×1600×6900 мм сплава 7175 были подвергнуты горячей прокатке из одной и той же плоской заготовки. Химический состав показан в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав листов сплава 7175 (% веса)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ti
0,050	0,140	1,420	0,008	2,570	0,190	5,780	0,004	0,028

Листы были подвергнуты термической обработке на твёрдый раствор в промышленной печи с роликовым подом (выдержка 120 минут при температуре $475 \pm 5^\circ\text{C}$), и было проведено резкое охлаждение струёй холодной воды (25°C). Сразу же после закалки листы были подвергнуты растяжению с различными остаточными удлинениями между 0,4 и 3,5%, в производственной среде, используя правильно-растяжную машину для толстых листов усилием 5000 тонн. От каждого листа был взят и подвергнут механической обработке образец для определения остаточного напряжения. Методы, используемые для расчёта остаточного напряжения, основаны на снятии слоя [1] сверхбыстрым фрезерованием и тензометрией датчиком деформации. Методы, расчёт и оборудование – по стандарту ASTM E 837–08 [2]. Испытательное оборудование для микроизмерений состоит из установок сверхбыстрого фрезерования RS-200 (50,000 вращений в минуту), тензодатчика P3, регистрирующего прибора (Vishay Bridge) и тензодатчиков остаточного напряжения. Программное обеспечение, используемое для расчёта, было H-DRILL 3.20. Листы после правки растяжением были состарены до состояния T6 в промышленной печи (время выдержки 24 часа при температуре 120°C) и проверены на механические свойства, используя машину для испытания на растяжение ZWICK 250.

Результаты испытаний на остаточное напряжение представлены на рисунках с 1 по 3. Напряжения измерялись съёмом слоя с приращением 0,05 мм по всей глубине 1 мм с поверхности.

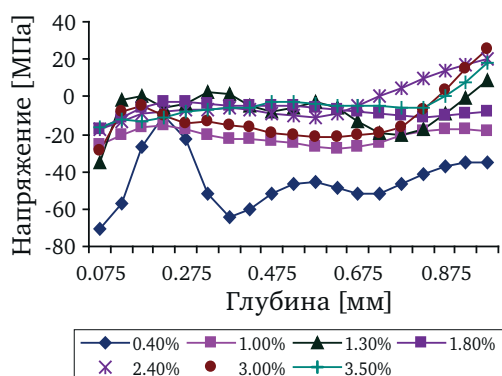


Рис. 1. Остаточные напряжения в продольном направлении

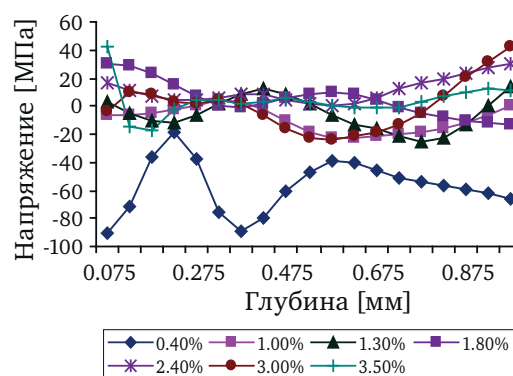


Рис. 2. Остаточные напряжения в поперечном направлении

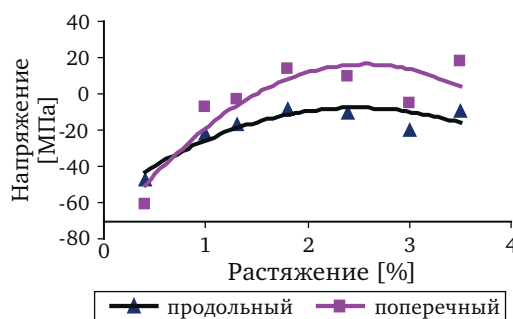


Рис. 3. Средние остаточные напряжения

На механические свойства были исследованы 3 образца по каждой испытательной позиции. Результаты, показанные на рисунках с 4 по 8, представляют среднее значение из 3 измерений.

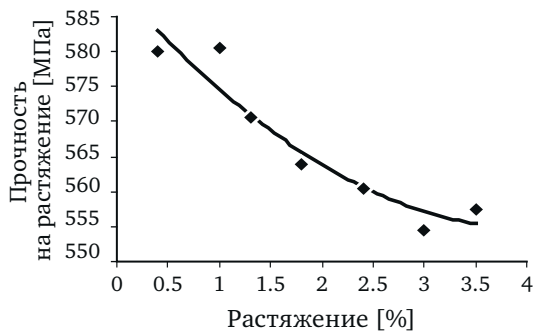


Рис. 4. Изменение предела прочности на растяжение



Рис. 5. Изменение предела текучести

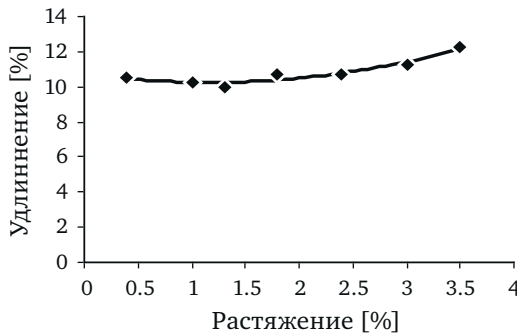


Рис. 6. Изменение удлинения

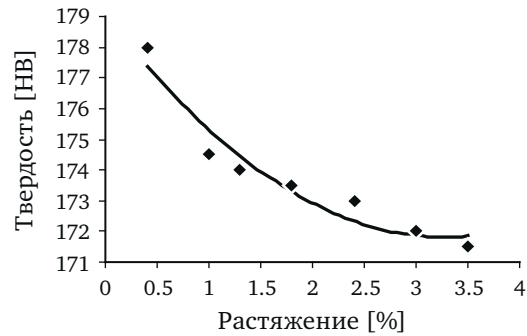


Рис. 7. Изменение твердости

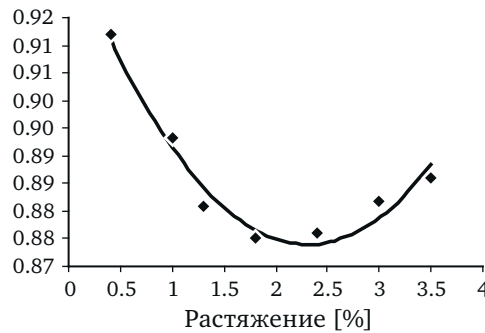


Рис. 8. Изменение отношения $R_{p0.2}/R_m$

Дискуссия

АЛРО, Слатина раньше определял значения и распределение остаточных напряжений на поперечном разрезе листов серии 7xxx во внешней лаборатории [3]. Типичный результат был тот, что показан на рисунке 9, очень схож с результатами, полученными другими авторами (например, рисунки 10 и 11, в соответствии с [4]). Как и в настоящей статье, важным является максимальное значение остаточного напряжения, а не распределение по толщине, измерялось максимальное значение сжимающего напряжения, близко к поверхности листа поэтапными измерениями (20 измерений с приращением по 0,05 мм).

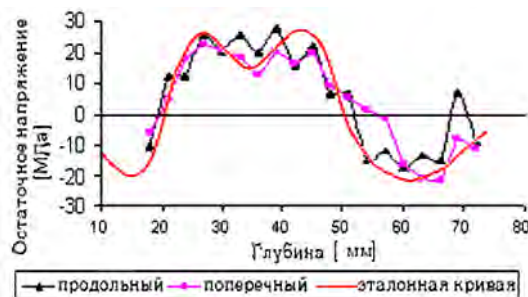


Рис. 9. Распределение остаточного напряжения на листе сплава 7050 после растяжения, из [3]

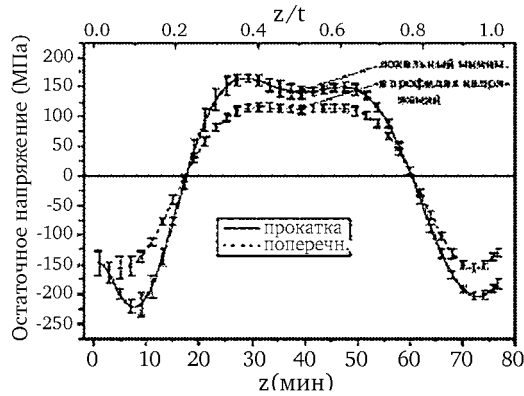


Рис. 10. Остаточные напряжения в алюминиевом листе сплава 7050-T74, из [4]

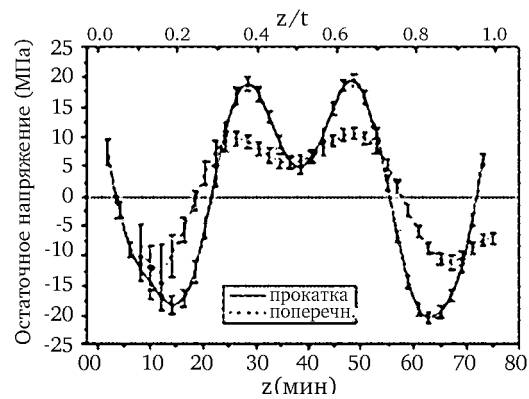


Рис. 11. Остаточные напряжения после снятия напряжений при растяжении, сплав (7050-T7451), из [4]

Механизм снятия напряжений показан на рисунке 12, где σ_R является остаточным напряжением, σ_{02} является пределом текучести, а ε – деформация. Лист можно рассматривать как состоящий из трёх областей в соотношении: две области сжатия на поверхностях и одна область в центральной части толщи. Приложением низкой пластической деформации (до 3,5%), остаточные напряжения после снятия напряжений показывают примерно 10% от первоначальной величины.

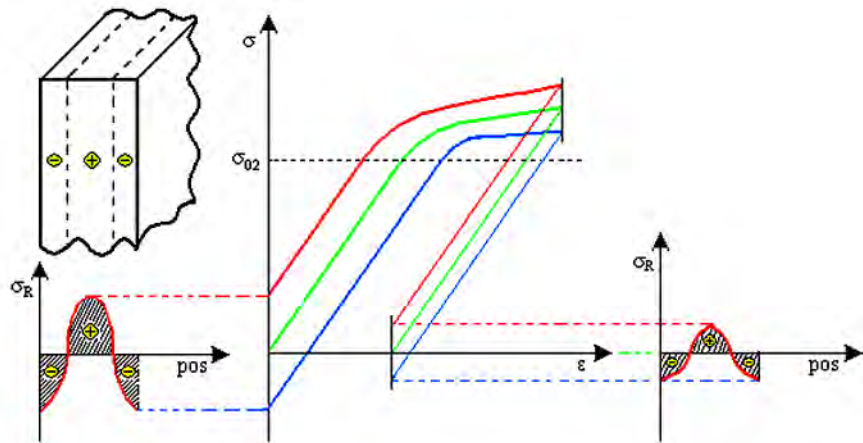


Рис. 12. Механизм снятия напряжений во время растяжения листа

Эффект снижения средних остаточных напряжений сильнее в зоне низких деформаций и имеет склонность стабилизироваться после 2,5% остаточного удлинения, означая логарифмическая зависимость. Установленные соотношения на основе экспериментальных результатов следующие:

В продольном направлении

$$\sigma_L = -8,1119\varepsilon^2 + 40,347\varepsilon - 57,878 \quad (1)$$

$$\text{Коэффициент детерминации } R^2 = 0,82 \quad (2)$$

В продольном направлении

$$\sigma_T = -14,311\varepsilon^2 + 73,525\varepsilon - 78,078 \quad (3)$$

$$\text{Коэффициент детерминации } R^2 = 0,79(4)$$

Помимо снятия напряжений, растяжение листа влияет на конечные механические свойства. В соответствии с [5], сплавы серии 7xxx будут иметь более низкий предел текучести, в то время как у сплавов серии 2xxx повышенный предел текучести, как показано на рисунке 13.

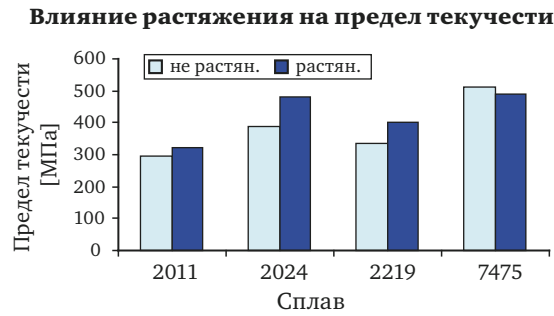


Рис. 13. Влияние растяжения на механические свойства, из [5]

С помощью полученных результатов были определены статистические модели для механических свойств. Ниже приведены уравнения регрессии, установленные методом наименьших квадратов [6] и сопряжённый коэффициент детерминации, R^2 :

- Предел прочности на растяжение

$$R_m = 2,0326\varepsilon^2 - 16,842\varepsilon + 589,41 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,91$$

- Предел текучести

$$R_{p02} = 7,6723\varepsilon^2 - 42,054\varepsilon + 546,72 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,96$$

- Удлинение

$$A = 0,3497\varepsilon^2 - 0,8153\varepsilon + 10,729 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,93$$

- Твёрдость

$$HB = 0,6692\varepsilon^2 - 4,3997\varepsilon + 179,04 \quad (9)$$

$$R^2 = 0,93$$

- Пластический потенциал R_{p02}/R_m

$$R_{p02}/R_m = 0,0102\varepsilon^2 - 0,0473\varepsilon + 0,9285 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,96$$

Распределение остаточных напряжений типичное: сжатие на поверхности и растяжение в центре листов. Это распределение определяется главным образом различными скоростями охлаждения поверхности и центра листов. Изменение остаточных напряжений с остаточным удлинением после растяжения как ожидается и может быть объяснено: во время пластической деформации внутренние напряжения поглощаются, и напряжения повторно уравниваются на нижних уровнях.

Изменение окончательных механических свойств и главным образом предела текучести с остаточным удлинением после растяжения следует разделить на два случая: сплавы серии 2xxx и сплавы серии 7xxx. Сплавы серии 2xxx хорошо известны несколькими фазами закалки, которые выделяются естественным старением. Значимое естественное старение сплавов 2xxx показывает также, что у этих сплавов хорошие условия для развития фаз закалки, поскольку им не нужно большое количество энергии для зарождения центров кристаллизации. Лучшие по механическим свойствам результаты старения обеспечиваются гомогенным зарождением центров кристаллизации на алюминиевой кристаллической решётке. Дисперсоиды будут оставаться в этом случае мелкими фракциями и однородной выделившейся фазой на уровне зон Гинье-Престона или когерентными интерметаллическими соединениями.

Гетерогенное зарождение центров кристаллизации, наоборот, образует крупнозернистые дисперсоиды с негативным влиянием на механические свойства. Во время растяжения небольшая пластическая деформация, которая индуцируется в металле, достаточна, чтобы увеличить плотность дислокаций. Дислокации являются подходящим местом для гетерогенного зарождения центров кристаллизации фаз закалки. В случае со сплавами серии 2xxx, гетерогенное зарождение центров кристаллизации представляет дополнительный источник твёрдой фазы в металлической конструкции, поскольку количество фаз закалки достаточно большое. В сплаве серии 7xxx главной фазой закалки является h' , и у этой фазы низкая плотность зарождения центров кристаллизации при гомогенном зарождении центров кристаллизации. Небольшое число зарождающихся центров кристаллизации образует эффекты сильного роста и крупнозернистых выделившихся фаз.

Для оптимизации растяжения следует установить наилучший компромисс между снижением остаточного напряжения и ослаблением механических свойств повышением пластической деформации во время растяжения. С допусками на свойства, которые были установлены на основе минимальных стандартных требований с 7% запасом, ниже даны следующие допуски на растяжение:

- Остаточное напряжение = 15 МПа
минимум = 1,54%
максимум = 3,43%
- Предел текучести = 492,2 МПа
минимум = 1,65%
максимум = 6,63%
- Предел прочности при растяжении = 567,1 МПа
минимум = 2,10%
максимум = 3,38%

На основе вышеизложенного, оптимальное остаточное удлинение, образуемое при растяжении, составляет $2,74 \pm 0,64\%$. Довольно интересно, что функция, которая описывает потенциал пластической деформации (определяется как соотношение между пределом текучести и пределом прочности при растяжении), имеет локальные минимумы при остаточном удлинении 2,32%. Это означает в определённом оптимальном диапазоне для удлинения даже характер растяжения металла будет оптимальным.

Выводы

Остаточные напряжения уменьшаются, в то время как степень остаточной деформации возрастает во время растяжения листов. Это непосредственное воздействие потребления энергии при пластической деформации.

Несмотря на множество сплавов серии 2xxx, сплавы серии 7xxx обнаруживают нижние значения для предела прочности и предела текучести вследствие ограниченного числа фаз закалки, которые будут выделившимися фазами в крупнозернистых дисперсоидов, когда происходит неоднородный аномальный рост зерна.

Оптимальным для остаточного удлинения при растяжении листа из сплава 7175 будет $2,74 \pm 0,64\%$. Этот интервал обеспечивает подходящий уровень внутренних остаточных напряжений между -15 и +15 МПа, механические свойства выше минимального стандарта на 7% и хороший характер пластической деформации листов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экмекси Б., Экмекси Н., Текайа А. Е., Эрден А., «Измерение остаточного напряжения методом послойного снятия», CMES1-04 Доклад на первом международном симпозиуме по машиностроению в Каппадокии, Турция, 2004.
2. ASTM E837-01. «Стандартный метод испытания для определения остаточных напряжений методом измерений датчиком силы при сверлении отверстий», Ежегодник стандартов ASTM или www.astm.org
3. АЛРО, Доклад ME – 2009-2030-R, 2010
4. Прайм М. Б., Хилл М. Р. «Остаточное напряжение, снятие напряжений и неоднородность в алюминиевом листе», Скрипта Материалия, 46, стр. 77-82, 2002.
5. Полмер И. Дж. «Сплавы лёгких металлов: Металлургия лёгких металлов», 2-ое издание, Эдвард Арнольд, Лондон, 1989, ISBN 0-340-49175-2.
6. Вольберг Дж. «Анализ данных, используя метод наименьших квадратов: Извлечение наибольшей информации из экспериментов», Спрингер-Верлаг, Нью-Йорк, 2005, ISBN: 3540256741.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КАТАНКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Л.П. Трифоненков, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, В.Ф. Фролов, В.Н. Баранов,
В.А. Падалка, Е.С. Лопатина, Э.А. Рудницкий, А.В. Сальников, В.М. Беспалов*

ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск, Россия

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

Деформированные полуфабрикаты из циркалоя (сплава алюминия и циркония) широко применяется в ядерном ракетостроении, военной промышленности, авиастроении и в тех областях, где работа проводников электрического тока связана с повышенными температурами. При комнатной температуре механические свойства сплава алюминия с цирконием (до 0,4%) и алюминия различаются мало, однако повышение температуры испытания до 200 °С приводит к заметной разнице в свойствах этих материалов: сохраняются высокие значения прочности и электропроводности. Исследования проволоки из алюминия и сплава с цирконием свидетельствуют о том, что проволока из сплава вполне может применяться при температуре 150 °С, в то время как максимально допустимая температура длительной эксплуатации твердой проволоки из алюминия не превышает 90 °С.

Современное состояние производства из этих сплавов характеризуется наличием проволочных полуфабрикатов зарубежных фирм (J-Power Systems, Lumpi-Berndorf, ЗМ США), однако для их применения в России потребуется ряд процедур по сертификации и локализации продуктов, что является долгим и трудоемким процессом. Поэтому целью данной работы являлось промышленное опробование технологии производства электротехнической катанки из новых сплавов системы алюминий-цирконий.

Изготовление электротехнической катанки осуществлялось на литейно-прокатном агрегате, включающим печь-миксер, роторный кристаллизатор, прокатный стан, имеющий 14 клетей с горизонтально и вертикально расположенными валками и две моталки. Масса плавки достигала 12 т, что позволяло получать до шести бухт готовой катанки диаметром 9,5 мм и весом порядка 1600 килограмм. Температура расплава в миксере составляла 740–780 °С, а перед фильтром в роторный кристаллизатор – 710–720 °С. При реализации промышленных исследований в начале процесса плавка велась без лигатуры, а затем добавляли лигатуру Al-Ti-B, так как на литой заготовке появлялись боковые трещины и процесс получения катанки не был реализован. Закристаллизовавшийся металл поступал на непрерывный сортопрокатный стан, на выходе из которого получали катанку заданного диаметра, температура которой составляла 310–350 °С. Изменение геометрических размеров деформированных полуфабрикатов по переходам показано на рис. 1. Для определения технологичности полученной катанки проводили холодное волочение без промежуточных отжигов для получения проволоки диаметром 2 мм. Далее производили отжиг деформированных полуфабрикатов и определяли их свойства в отожженном состоянии. Оценивали также удельное электросопротивление катанки и проволочных полуфабрикатов, полученных в результате проведенных промышленных испытаний.

Исследование механических свойств проводили на испытательной машине Walter+Bai AG LFM400 («Walter+Bai AG», Швейцария) методом статических испытаний на растяжение. Гантелеобразные образцы для испытания по ГОСТ 1497–84 получали на металлорежущем оборудовании, исключая возможное изменение свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки. Условия проведения испытаний были выбраны одинаковыми для всех опытов: температура 22–25 °С, скорость деформирования 20 мм/мин, длина рабочей зоны составляла 30–40 мм.

Для оценки свойств катанки в зависимости от содержания циркония проводили замеры механических свойств для трех сплавов АЦЕ-1, АЦЕ-2 и АЦЕ-3, в которых содержание циркония составляло соответственно 0,15; 0,20; 0,25 масс.%. В таблице 1 пред-



Рис. 1. Темплеты деформированных полуфабрикатов по проходам прокатки

ставлены средние значения прочностных и пластических показателей свойств деформированных и отожженных полуфабрикатов из исследуемых алюминиевых сплавов. В результате исследований было установлено, что увеличение содержания циркония в сплаве, ведет к увеличению прочности и снижению пластичности металла. Так для полученной катанки временное сопротивление разрыву возрастает с 123,8 до 133,0 МПа, а для отожженной проволоки с 96,1 до 126,5 МПа. Пластичность металла при этом снижается у катанки до значений порядка 18,6%, а у проволоки – до 11,1%.

Таблица 1

Механические свойства полуфабрикатов из алюминиево-циркониевых сплавов

Сплав	Катанка		Проволока (отож.)	
	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
АЦЕ-1	123,8	21,8	96,1	21,0
АЦЕ-2	127,9	20,6	119,6	15,3
АЦЕ-3	133,0	18,6	126,5	11,1

При изготовлении длиномерных полуфабрикатов важной оценкой качества продукции является стабильность свойств полуфабриката по его длине, поэтому проводили отбор образцов в различных местах бухты катанки (из начала полученной бухты и ее конца). Изучение влияния места отбора образцов на изменение механических свойств проведено на сплавах АЦЕ-1, АЦЕ-2. В качестве показателей изменения свойств, были выбраны такие характеристики, как временное сопротивление разрыву и относительное удлинение металла, полученные на образцах (табл. 2). Анализ опытных данных показывает, что значения прочностных и пластических свойств в зависимости от места отбора образцов находятся примерно на одном уровне. Так для катанки среднее значение временного сопротивления разрыву не превышает 133 МПа, а для проволоки, прошедшей термическую обработку, эти значения находятся в пределах 99–120 МПа. При этом следует отметить, что механические свойства образцов катанки в начале бухты чуть выше в сравнении с концом бухты: например, для сплава АЦЕ-1 в начале 125,7 МПа, в конце 123,8 МПа; для сплава АЦЕ-2 в начале – 128,1 МПа, в конце – 127,9 МПа. Это свидетельствует о том, что параметры технологии процесса, и в первую очередь температурные, меняются незначительно.

Таблица 2

Механические свойства металла в зависимости от места отбора образцов

№ п/п	Сплав	Место отбора образца	Катанка		Проволока (отож.)	
			σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
1	АЦЕ-1	начало	125,7	19,2	98,9	22,5
2		конец	123,8	21,8	96,1	21,0
3	АЦЕ-2	начало	128,1	22,4	122,8	13,6
4		конец	127,9	20,6	119,6	15,3

Влияние холодной деформации на изменение механических свойств приведено отдельно для каждого сплава, при этом изучали изменение таких механических характеристик металла, как предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление разрыву σ_b , относительное удлинение δ , относительное сужение ψ в зависимости от суммарной степени деформации при волочении проволоки, с одновременной аппроксимацией полученных данных (рис. 2). Здесь значения замеренных параметров при степени деформации, равной нулю, соответствуют механическим характеристикам заготовки для волочения (катанки).

Обобщая представленные выше данные можно сделать вывод о том, что с увеличением степени деформации возрастают прочностные свойства металла представленных сплавов. Так средние значения временного сопротивления разрыву возрастают до 230–233 МПа при степени деформации до 90% в зависимости от типа сплава. Также характерным для всех сплавов является интенсивное увеличение предела текучести металла с ростом деформации. Так, на рис. 2–4 видно, что кривая предела текучести $\sigma_{0,2}$ приближается к кривой сопротивления металла разрыву σ_b после суммарной деформации в 60%, что свидетельствует об интенсификации эффекта упрочнения при больших степенях деформации металла.

Помимо механических свойств, особое внимание уделялось и проверке удельного электросопротивления полуфабрикатов из исследуемых сплавов, так как они предназначены для использования в электротехнической отрасли. С этой целью измеряли удельное электросопротивление образцов катанки и проволоки, как в деформированном, так и в отожженном состояниях (табл. 3). При этом варьировали режимы термической обработки: одноступенчатый при температурах 300 и 400 °С; двухступенчатый при 400+450 °С и 300+450 °С.

Таблица 3

Удельное электросопротивление проволочных полуфабрикатов, Ом·мм²/м

Сплав	Состояние проволоки				
	деф.	отож. (400 °С)	отож. (400+450 °С)	отож. (300 °С)	отож. (300+450 °С)
АЦЕ-1	0,0307	0,0299	0,0300	0,0296	0,0293
АЦЕ-2	0,0315	0,0300	0,0300	0,0306	0,0297
АЦЕ-3	0,0322	0,0328	0,0321	0,0323	0,0311

В результате анализа полученных данных было установлено, что удельное электросопротивление холоднодеформированной проволоки диаметром 2,0 мм растет с ростом содержания в сплаве циркония, что видно из табл. 3. Было установлено также, что проволока, полученная из катанки без применения модифицирования на стадии литья, имеет более высокие характеристики удельного электросопротивления. Этот факт связан, по-видимому, с ухудшением электрических свойств при наличии в химическом составе сплава титана и бора. Применение одноступенчатого нагрева при отжиге позволило незначительно снизить значения удельного электросопротивления. Применение же двухступенчатого нагрева позволяет добиться снижения удельного электросопротивления до значений порядка 0,0293–0,0296.

По результатам опытно-промышленного исследования можно сделать следующие выводы и дать следующие рекомендации.

1. Исследуемые сплавы с содержанием циркония в пределах 0,15–0,25% характеризуются стабильными механическими свойствами полуфабрикатов, в том числе и по длине, что позволяет производить из них проволоку со степенями деформации порядка 90% без промежуточных отжигов.
2. С увеличением содержания циркония в сплаве в заданных концентрациях повышаются прочностные характеристики металла и снижаются пластические.
3. Механические свойства по длине длинномерных деформированных полуфабрикатов отличаются незначительно.
4. Холодная деформация приводит к упрочнению металла и повышению временного сопротивления разрыву до значений порядка 230–233 МПа, а последующий отжиг позволяет восстановить пластические свойства металла до значений порядка 21–22%.

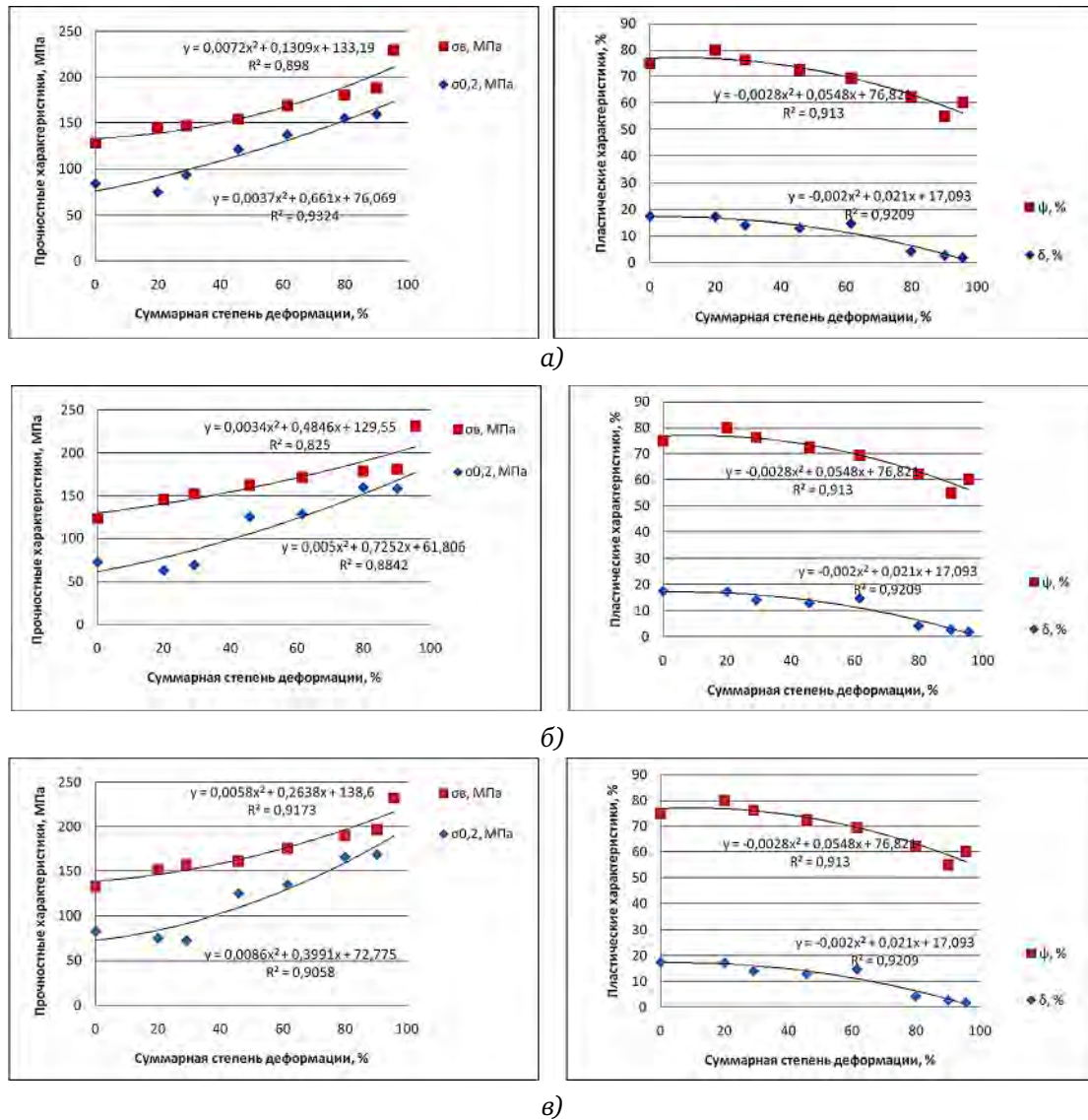


Рис. 2. Механические характеристики проволоки из сплавов:
а – АЦЕ-1; б – АЦЕ-2; в – АЦЕ-3

5. Применение двухступенчатого нагрева при термообработке позволяет получить полуфабрикаты с минимальными значениями удельного электросопротивления.
6. Для достижения высоких показателей электросопротивления необходимо иметь минимальное содержание в сплаве циркония, а также не применять модификаторы с содержанием титана и бора.
7. Оптимальным уровнем механических и электрических свойств обладают полуфабрикаты, полученные из сплава АЦЕ1 при использовании термообработки с двухступенчатым режимом нагрева.

Исследования проведены при реализации проекта по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки», финансируемого совместно Министерством образования и науки РФ и ОК РУСАЛ.

Результаты исследований будут использованы при создании высокотехнологичного производства по производству электротехнической катанки из новых сплавов, которое планируется создать на базе Иркутского алюминиевого завода.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПАЛЛАДИЕВОГО СПЛАВА 850 ПРОБЫ

*А. А. Гущинский, Е. А. Павлов, В. Ю. Гурская,
С. И. Ельцин, В. Н. Ефимов, С. Н. Мамонов*

ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В. Н. Гулидова»,
г. Красноярск, Россия

В работе рассматривается процесс производства заготовок из палладиевого ювелирного сплава. Установлено оптимальное количество переходов (нагрев-ковка) при доводке слитка до конечных размеров и максимальная степень деформации по переходам операцииковки. Совершенствуя технологию производства полуфабриката, исключается операция его отжига послековки.

В последнее время в мире наблюдается рост интереса к использованию палладия в ювелирном деле. Вместе с тем, широкое применение палладия в ювелирной промышленности до сих пор является проблематичным, так как чистый палладий обладает относительно низкими литейными свойствами, трудностью обработки методами пластической деформации, а известные высокопробные сплавы, пригодные для ювелирных целей, к сожалению, немногочисленны и изучены недостаточно.

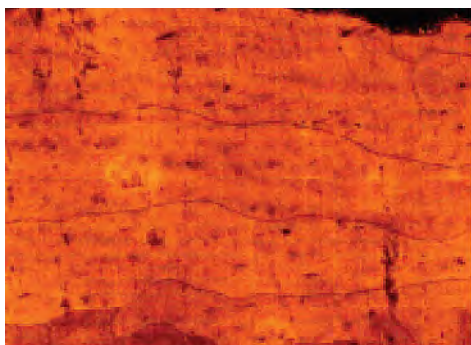
И все же, применение палладиевых сплавов в ювелирном деле весьма перспективно, поскольку их потребительские свойства, практически, не уступают платине и ее сплавам.

Для изготовления ювелирных изделий в ОАО «Красцветмет» используются сплавы палладия преимущественно 850 пробы.

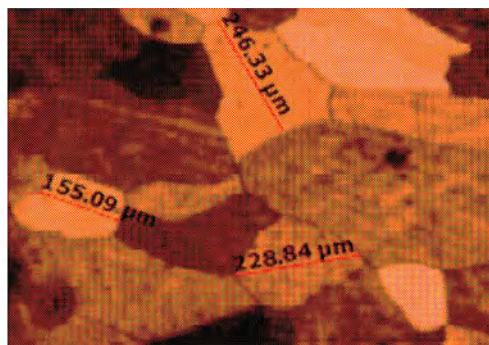
Технология производства исходных заготовок для дальнейшего изготовления из них ювелирных изделий включает следующие процессы:

- плавка палладия и лигатуры в вакуумной индукционной печи, слив расплава в медную изложницу;
- ковка слитков сплава на пневматическом молоте, с предварительным нагревом в открытой индукционной печи;
- отжиг в камерной печи в инертной атмосфере;
- прокат полученных заготовок до необходимых размеров, определяемых видом ювелирных изделий.

Плавка и слив расплава производятся в инертной атмосфере аргона. Температура образования расплава 1350–1400 °С, в зависимости от состава легирующих компонентов. Полученные слитки имеют микроструктуру, представленную на рисунке 1.



Край отливки



Середина отливки

Рис. 1. Микроструктура отливки, x100

Значения твердости по всему поперечному сечению слитка не меняются и составляют 1340–1360 МПа.

Слитки после удаления усадочной раковины поступают на участок ковки. Температура индукционного нагрева перед ковкой контролируется по свечению поверхности слитка, т.к. в конструкции печи не предусмотрена установка пирометра. Номинальные технические характеристики индукционной печи – мощность 120 кВт, частота 2,4 кГц, напряжение – 0,8 кВ.

При ковке отдельных заготовок ювелирного палладиевого сплава 850 пробы было выявлено наличие брака, проявляющегося либо в образовании трещин, либо – в разрушении поковки (рис. 2).



Рис. 2. Поверхность разрушенного слитка послековки, $\times 10$

При этом в исходном слитке (перед ковкой) каких-либо поверхностных дефектов (следы оплавления, трещины) визуально не наблюдалось.

Цель работы – установить причины разрушения слитков и скорректировать параметры их индукционного нагрева перед ковкой таким образом, что бы в итоге получать качественные заготовки, пригодные для последующего проката.

Известно, что основными дефектами, связанными с термообработкой металла, являются, пережог и перегрев. Первый – обусловлен нагревом металла до излишне высоких температур, при которых происходит оплавление границ зерен; приложение деформационных сил к такому слитку вызывает его разрушение. Второй вид дефекта связан с излишне длительной выдержкой слитка при воздействии высоких температур, при этом происходит вторичная рекристаллизация, которая ведет к снижению механических свойств слитка.

Проведенные исследования микроструктуры и механических свойств разрушенного слитка (рис. 3) показали, что в процессе нагрева перед операциейковки, при заданных параметрах индукционной печи, возможен «пережог» слитка, что влечет его разрушение при пластической деформации.

Опытным путем были установлены оптимальные параметры нагрева в индукционной печи, при которых исключается «пережог» металла. При этом необходимо контролировать и время нагрева слитка, чтобы исключить явление перегрева, отрицательно влияющего на процессковки.

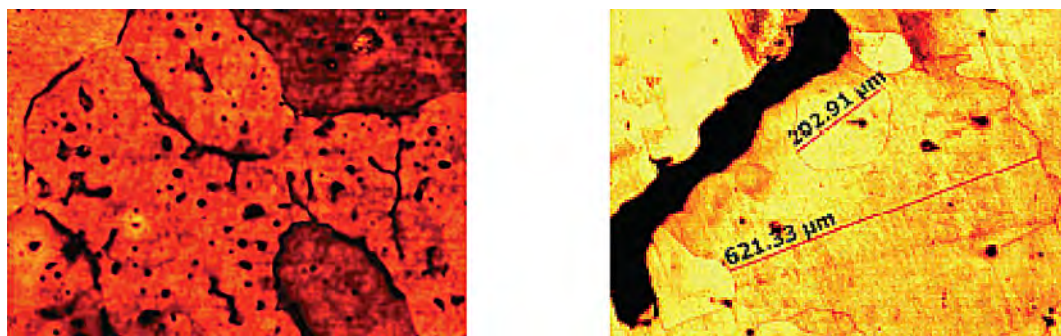


Рис. 3. Микроструктура разрушенного слитка $\times 100$:
а – пережог 1500 МПа; б – перегрев 1460 МПа

Слиток палладиевого сплава рекомендуется нагревать в индукционной печи перед ковкой при заданной мощности печи 80 кВт, напряжении 0,6 кВ, при продолжительности нагрева – 10 мин. При соблюдении этих параметров слиток перед ковкой имеет структуру, показанную на рисунке 4, и твердость 1100 МПа.

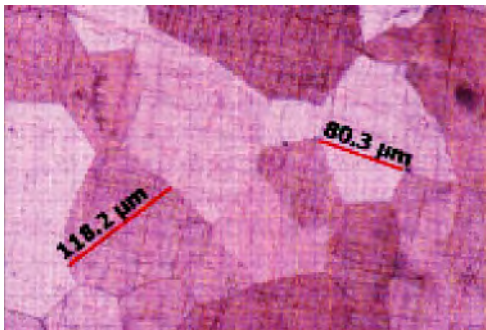


Рис. 4. Микроструктура образца палладиевого сплава перед ковкой, x200

Установлено, что количество переходов (нагрев-ковка) при доводке слитка до конечных размеров заготовки должно быть не меньше четырех, т.к. при увеличении отношения площади поверхности слитка к объему металла увеличивается интенсивность отвода тепла через инструмент. Рекомендовано осуществлять переходы при степени деформации поковки 25–30%. Микроструктура представлена на рисунке 5.

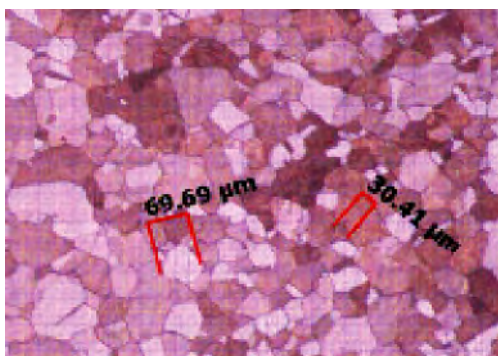


Рис. 5. Микроструктура кованной заготовки, x100

Показано, что при соблюдении рекомендованных параметров нагрева все полученные заготовки имеют структуру и механические свойства, обеспечивающие высокий выход годной ювелирной продукции.

В результате проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Выбран режим нагрева слитка перед ковкой в открытой индукционной тигельной печи: мощность индуктора 80 кВт; напряжение 0,6 кВ.
2. Выбран оптимальный временной интервал нагрева в печи 10 минут.
3. Количество переходов в процессековки должно быть равно четырем.
4. Переходы при ковке поковки должны составлять 25–30%.
5. Исключить отжиг перед прокатом поковки из ювелирного палладиевого сплава 850 пробы

НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПРУТКОВ ИЗ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ СОВМЕЩЕННЫМИ МЕТОДАМИ

*С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов, Д.Ю. Горбунов, М.В. Первухин,
Р.Е. Соколов, Р.И. Галиев, Д.С. Ворошилов, А.Л. Киселев*

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

Алюминий и его сплавы обладают уникальным сочетанием эксплуатационных свойств. Основными их достоинствами являются малая плотность, высокая удельная прочность и высокая коррозионная стойкость. В качестве конструкционных материалов в основном используют деформированные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов. Следует отметить, что по показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и сплавам титана.

Среди сплавов алюминия можно выделить группу нетехнологичных, которые из-за плохих пластических свойств трудно поддаются обработке давлением, поэтому их чаще всего используют в качестве литейных. К таким сплавам можно отнести сплавы систем алюминий-кремний, алюминий-магний, алюминий-магний-кремний и др. Если способы получения прессованных прутков и последующего волочения проволоки из деформируемых алюминиевых сплавов, к которым относятся магналии, давно известны, то получение аналогичной продукции из литейных силуминов, особенно эвтектического состава вызывает трудности. В связи с этим традиционные технологии производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из таких сплавов, например, прутков и проволоки из силуминов, характеризуются повышенной трудо- и энергоемкостью и высокими экономическими затратами.

Целесообразно использовать такие алюминиевые сплавы в сварных конструкциях различного назначения, например, применяемых в теплоэнергетике. По оценкам специалистов, замена медных сплавов на алюминиевые позволит почти в три раза снизить затраты на трубы, используемые в теплообменниках, при обеспечении близких теплофизических характеристик данных устройств. Алюминиевые теплообменники находят также широкое применение в автомобильной промышленности. До последнего времени в сварных конструкциях в основном использовали полуфабрикаты (листы, профили, трубы и др.) из деформируемых сплавов, например, термически неупрочняемых сплавов системы Al-Mg (магналии). Однако литейные алюминиевые сплавы также обладают ценными эксплуатационными свойствами. К перспективным материалам для изготовления многих конструкций следует отнести сплавы алюминия с кремнием (силумины), которые обладают хорошими литейными свойствами – жидкотекучестью и герметичностью в сочетании с высокой коррозионной стойкостью, благодаря малой плотности кремний снижает плотность алюминиевых сплавов. Кроме того, из всех литейных сплавов силумины относятся к группе ограниченно свариваемых.

Важной составляющей технологии сварки алюминиевых сплавов является использование присадочного материала, который позволяет избежать газонасыщения и пористости металла шва, а также избежать повышенного содержания растворенного водорода в шве и околошовной зоне. При дуговой сварке большинства соединений требуется использование присадочного материала в виде проволоки, металл которой заполняет зазоры, а также обеспечивает формирование шва в соответствии с размерами, установленными ГОСТ 14806–80. Кроме того, проволока позволяет изменять состав шва, что особенно важно при сварке различных алюминиевых сплавов. Требуемый для легирования состав проволоки выбирают с учетом химического состава свариваемых кромок и доли участия проволоки в образовании шва. Для дуговой сварки в инертных газах содержание каждого элемента в проволоке можно рассчитать

из уравнения:

$$C_{\text{п}} = \frac{C_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{п}} k_{\gamma}} - \frac{C_0}{\gamma_{\text{п}}} + C_0,$$

где $C_{\text{п}}$ – расчетное содержание элемента в проволоке; $C_{\text{ш}}$ – расчетное содержание элемента в сварочном шве; C_0 – расчетное содержание элемента в свариваемом металле; $\gamma_{\text{п}}$ – доля проволоки в металле шва; k_{γ} – суммарный коэффициент усвоения элемента металлом шва при сварке.

Общим правилом при сварке алюминиевых сплавов является то, что металл сварочной проволоки должен примерно соответствовать по химическому составу металлу детали. Исключением являются сплавы алюминия с магнием, для сварки которых из-за интенсивного испарения магния при сварке следует использовать проволоку с содержанием магния большим, чем в детали. Из магналиев часто изготавливают проволоку марки СвАМг6, которая применяется для сварки алюминий-магниевого сплава, авиалай, а также для свариваемых сплавов системы алюминий-цинк-магний. Недостатком применения этой проволоки является то, что сварной шов не должен при эксплуатации подвергаться действию температур, превышающих 80 °С.

Для сварки силуминов требуется сварочная проволока близкого химического состава с низкой температурой плавления. Такую проволоку используют для сварки авиалай, а также для исправления дефектов отливок из низколегированного силумина. Металл проволоки имеет низкую температуру плавления и хорошую жидкотекучесть. По сравнению с проволоками из алюминий-магниевого сплава она при сварке выделяет меньше дыма, что облегчает визуальное наблюдение за сварочной ванной. Сварной шов, выполненный с применением этой проволоки в качестве присадочного материала имеет малую пластичность и высокие прочностные свойства. На стадии промышленного производства деформированных полуфабрикатов находятся сейчас только такие марки сплавов, как СвАК5, СвАК7, СвАК10 и их зарубежные аналоги. Причем из-за низкой пластичности литых заготовок, получаемых непрерывным литьем, сплавы СвАК7, СвАК10, производят в крайне ограниченных объемах (последний только в виде прессованного прутка), а сплав СвАК5 выпускается обычно с концентрацией кремния на нижней границе его марки. Эти материалы для изготовления сварных конструкций имеют высокую температуру плавления (около 610 °С), что приводит к снижению прочности материала основы, а, следовательно, и всей конструкции. Для разработки новых технологий газотермической пайки элементов различных конструкций является актуальным производство сварочной проволоки с содержанием кремния до 12÷13%, которая имеет температуру плавления около 580 °С, что дает максимальную разницу между температурами плавления конструктивных алюминиевых сплавов и припоя и, следовательно, способна обеспечить высокое качество сварных конструкций. Характеристики некоторых сварочных материалов в виде проволоки и прутковых электродов из магналиев и силуминов, изготавливаемых за рубежом, приведены в табл. 1.

В России требования для сплава СвАМг6 составлены в соответствии с ГОСТ 7871–75. «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов». Проволоку из СвАМг6 получают прессованием и волочением. Изготовление проволоки из силуминов согласно данному документу предусматривается только прессованием и для сплавов, содержащих не более 10% (СвАК10). Для сплава СвАК12 разработаны технические условия на проволоку. Областями применения проволоки из сплава СвАМг6 является сварка изделий и конструкций плавлением, а проволоки из сплава СвАК12 – высокотемпературная пайка, сварка и газотермическое напыление алюминия и его сплавов. Химический состав этих видов проволоки приведен в табл. 2. Диаметр проволоки и предельные отклонения по нему должны соответствовать значениям, указанным в табл. 3, при этом механические свойства этих марок проволоки не контролируются.

В России для получения таких изделий была разработана технология производства полуфабрикатов малого сечения из гранул силуминов, полученных с большой скоростью охлаждения диспергированием расплава в воду. Технология включала литье гранул, их сушку, дегазацию, брикетирование, обточку брикетов, прессование и последующее волочение и характеризовалась большой сложностью и энергоемкостью производства, а также нестабильностью свойств полученных полуфабрикатов. Возникновение и развитие способов непрерывного прессования, основанных на использовании активных сил трения, дало новый импульс развитию гранульной металлургии

Таблица 1

Характеристики сварочных материалов зарубежного производства

Марка, применение, свариваемые материалы	Классификация	Химический состав проволоки, %	Механические свойства проволоки			Диаметр проволоки (прутка), мм	Цена, руб/кг
			σ_r , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %		
AlMg4.5MnZr Проволока/пруток для сварки Al-Mg-сплавов и алюминиевого литья. Благодаря содержанию циркония (Zr) повышается стойкость к растрескиванию при повышенных температурах. Изготовитель – Италия (Novofil)	DIN 1732: SG-AlMg 4.5MnZr	Si – до 0,25; Mn – 0,7; Mg – 4,5; Cr – 0,2; Zn – до 0,25 Ti – до 0,15; Zr – 0,2 Al – основа	300	140	20	0,8 1,6	525–570 420–460
AlSi5 Проволока/пруток для сварки алюминиево-кремниевых сплавов и разнородных алюминиевых сплавов. Изготовитель – Италия (Novofil)	DIN 1732: SG-AlSi 5	Si – 5; Mn – до 0,2; Mg – до 0,1; Zn – до 0,2 Ti – до 0,15; Al – основа	160	100	15	0,8 1,6	780–850 420–460
AlSi12 Проволока/пруток для сварки алюминиево-кремниевых сплавов и алюминиевых сплавов с содержанием кремния (Si) до 12%. Изготовитель – Швеция (ESAB)	DIN 1732: SG-AlSi 12	Si – 12; Mn – до 0,3; Mg – до 0,05; Zn – до 0,1 Ti – до 0,15; Al – основа	180	80	5	в виде электродов диаметром 2,5 мм	250

Таблица 2

Химический состав сварочной проволоки СВАМг6 и СВАК12

Марка сплавов	Массовая доля элементов, %									
	Основные компоненты			Примеси не более						
	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Cu	Cr	Ni	Zn
СВАМг6	не менее 99,5	5,8–6,8	–	–	0,5–0,8	0,1–0,2	–	–	–	–
СВАК12	основа	0,10	10,0–13,0	0,3	0,05	0,10	0,06	0,015	0,03	0,3

алюминиевых сплавов за счет замены мощных гидравлических прессов на достаточно компактную установку типа Конформ. Кроме того, большая доля сдвиговых деформаций, характерных для данного способа, обеспечивает образование ювенильных поверхностей на гранулах, что способствует высокому качеству схватывания между ними и стабильности свойств компактных полуфабрикатов. Дальнейшее развитие идея использования сил трения для деформирования была воплощена в процессе Экстроллинг, совместившем процесс прокатки и прессования в одном очаге деформации [1].

В настоящей работе предлагается использование способа, основанного на дальнейшем совершенствовании принципа совмещения прокатки и прессования. Для реализации этого способа применительно к обработке сплавов АК5 и АК12 были проведены исследования [2] с применением новых технических решений [3] по получению прутков методом совмещенной прокатки-прессования (СПП) из заготовки, полученной в электромагнитном кристаллизаторе.

Таблица 3

Пределные отклонения по диаметру тянутой проволоки

Диаметр проволоки, мм	Пределные отклонения по диаметру, мм	
	СвАМг6	СвАК12
0,80	-0,060	–
0,90	-0,060	–
1,00	-0,060	–
1,12	-0,060	–
1,20	–	-0,060
1,25	-0,060	–
1,40	-0,060	–
1,60	-0,060	–
1,80	-0,080	–
2,00	-0,080	-0,080
2,24	-0,080	–
2,50	-0,080	–
2,80	-0,080	–
3,15	-0,080	–
3,55	-0,096	–
4,00	-0,096	–
4,50	-0,096	–
5,00	-0,096	–
5,60	-0,096	–
6,30	-0,096	–
7,10	-0,116	–
8,00	-0,116	–
9,00	-0,116	–
10,00	–	–

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории кафедры ОМД института цветных металлов и материаловедения СФУ на установке совмещенной обработки с диаметром валков 200 мм. Для проведения опытов была применена следующая методика. В электрической печи сопротивления несколько заготовок, полученных с помощью электромагнитного кристаллизатора, одновременно нагревались до заданной температуры и выдерживались 10–15 минут. Температуру нагрева заготовок контролировали хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-3. Одновременно осуществляли нагрев валков до максимальной температуры 100 °С при помощи печи, выполненной в виде кожуха по форме валков и снабженного нихромовыми нагревателями. После нагрева заготовок и валков до необходимой температуры приводили во вращение валки установки со скоростью 4 или 8 об./мин. Нагретую заготовку задавали в калибр и, после того как произошел захват заготовки, при помощи тензометрической аппаратуры фиксировали усилие, оказываемое металлом на валки. Далее металл обжимался в калибре и достигал матрицы, смонтированной на матрицедержателе. С помощью клина и клинового устройства матрица была плотно поджата к валкам снизу, поэтому металл распрессовывался, заполняя калибр в зоне распрессовки, а затем, за счет постоянного поступления металла в калибр, выдавливался через калибрующее отверстие матрицы в виде прутка (рис. 1а). Сила на матрице R_m фиксировалась тензометрической аппаратурой с помощью кольцевой месдозы, а сила на валках R_v – с помощью двух цилиндрических месдоз. После того, как деформация заготовки заканчивалась, процесс повторяли, изменяя при этом скорость вращения валков.

От прутков отбирали образцы и проводили металлографические исследования (рис. 1б) и оценку механических свойств (табл. 4). Видно, что образец имеет весьма мелкозернистую и однородную по сечению макроструктуру, но, несмотря на это, отчетливо видны все зерна, зоны и поведение металла при деформации литой заготовки.

Изучение энергосиловых параметров процесса СПП (рис. 2, 3) показало, что максимальные усилия при заданных степенях деформации (вытяжке μ при прессовании) не превышают 400–450 кН, как на валках, так и на матрице. При этом расчетные значения усилия на валках выше экспериментальных, что связано с учетом прироста усилия при проникновении металла в зазор между валками и матрицей.

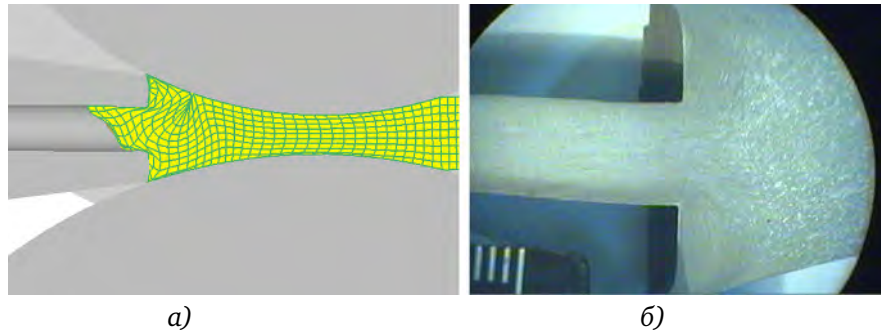


Рис. 1. Вид недоката из сплава АК12: а – по результатам моделирования процесса СПП; б – макроструктура зоны сформированного прутка, распрессовки и выдавливания

Таблица 4

Механические свойства прутков из сплава АК12 в деформированном и отожженном состоянии ($T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, время выдержки $t = 2\text{ ч}$)

Состояние материала	Суммарная деформация ($\ln \mu_{\Sigma}$)	Механические свойства		
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
деформированное	1,39	246,8	222,9	6,7
отожженное		181,3	168,2	13,2
деформированное	2,54	251,9	226,7	6,1
отожженное		188,4	171,7	12,8

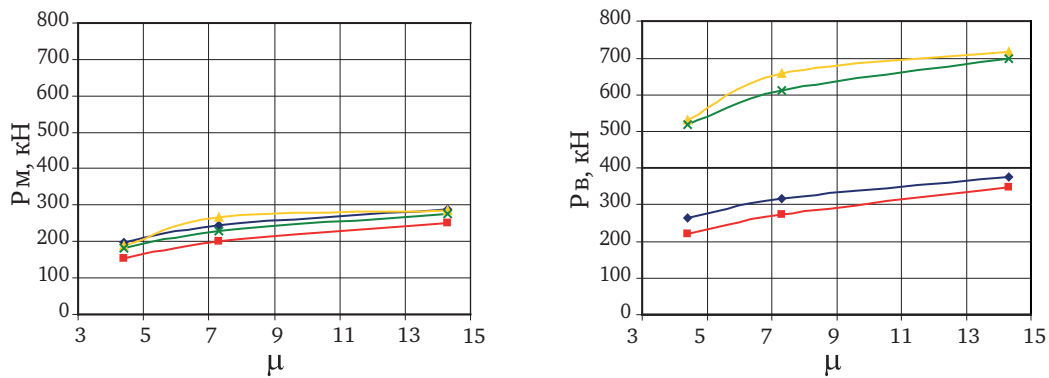


Рис. 2. Энергосиловые параметры процесса СПП для сплава АК5 при температуре заготовки $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. \blacklozenge и \blacksquare – экспериментальные значения усилия при $\xi=0,74\text{ c}^{-1}$ и при $\xi=1,49\text{ c}^{-1}$ соответственно; \blacktriangle и \times – расчетные значения усилий, полученные по формулам [1], при $\xi=0,74\text{ c}^{-1}$ и при $\xi=1,49\text{ c}^{-1}$ соответственно

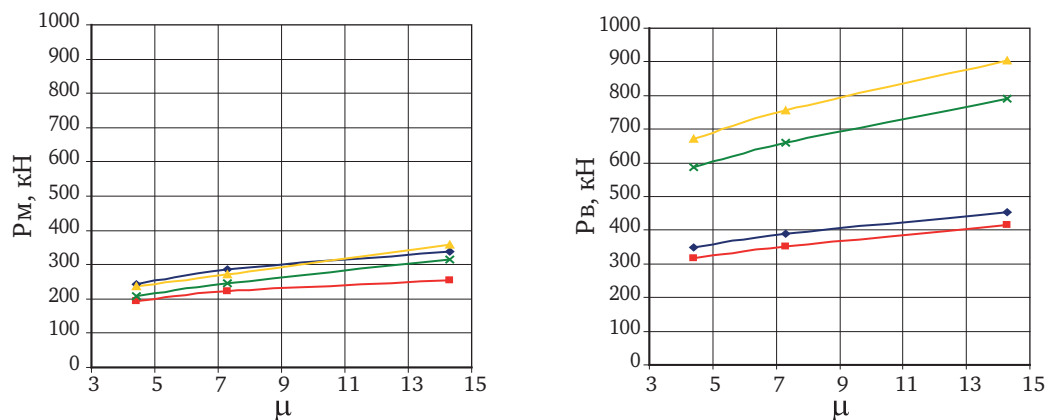


Рис. 3. Энергосиловые параметры процесса СПП для сплава АК12 при температуре заготовки $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. \blacklozenge и \blacksquare – экспериментальные значения усилия при $\xi=0,74\text{ c}^{-1}$ и при $\xi=1,49\text{ c}^{-1}$ соответственно; \blacktriangle и \times – расчетные значения усилий, полученные по формулам [1], при $\xi=0,74\text{ c}^{-1}$ и при $\xi=1,49\text{ c}^{-1}$ соответственно

Так как конечной целью исследований было получение сварочной проволоки, горячепрессованные прутки были подвергнуты холодному волочению до конечного диаметра 1,4–2,0 мм (степень деформации 94–99%). При этом были определены следующие оптимальные значения параметров процесса СПП: температура заготовки – $T=550^{\circ}\text{C}$; скорость вращения валков – 4 об/мин (скорость деформации металла составила – $\xi=0,74, \text{c}^{-1}$); суммарная вытяжка – $\mu=7,3$ (диаметр получаемого прутка составлял 6,8 мм).

Таблица 5

Результаты механических испытаний холоднодеформированных полуфабрикатов из сплава АК12

Диаметр образца, мм	Механические свойства полуфабрикатов	
	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %
4,3	346	11,0
3,6	362,4	10,2
3,3	409,2	7,1
3,0	424,4	4,3
2,6	433,2	2,9
2,0	461,5	1,5
2,0 (отжиг)	235,6	7,3
1,6	497,3	5,2
1,4	519,7	3,8

Таким образом, проведенные исследования дали возможность утверждать, что новые технические и технологические решения, предложенные авторами и использованные в данной работе, позволяют обрабатывать силумины со степенями деформации до 100%. Это утверждение может распространяться и на другие малопластичные сплавы алюминия, такие, как АМг6, АВ87, 01417 и т.д. Практическим приложением результатов исследований можно считать акты опытно-промышленной апробации полученной сварочной проволоки Св. АК12, которая прошла испытания на ФГУП «НПО «Прикладная механика» (г. Железногорск), где было установлено, что она соответствует требованиям ТУ 1–808–274–2003 и может применяться для пайки волноводных трактов, применяемых в космической и авиационной технике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н.. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
2. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Соколов Р. Е. и др. Разработка устройств и технологии для получения проволоки из труднодеформируемых алюминиевых сплавов с применением методов совмещенной обработки. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2009. – № 4. – С. 30–34.
3. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Тимофеев В. Н. и др. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования. Патент РФ № 67492. Оpubл. 27.10.2007, Бюл. № 30.

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С НЕДЕНДРИТНОЙ ТИКСОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ И ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ НИХ МЕТОДАМИ ДЕФОРМАЦИИ В ТВЕРДО-ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Ю.А. Горбунов

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

В течение ряда десятилетий во многих странах устойчиво сохраняется интерес к формированию алюминиевых и других сплавов в твердо – жидком состоянии, которое практически не используется отечественной металлургией и машиностроением. Этот процесс получил свое развитие после открытия Д. В. Спенсером (Массачусетский технологический институт) в начале 1971 г. аномальных свойств полужидкого недендритного сплава. Он установил, что при одном и том же содержании твердой фракции при переходе от дендритной к недендритной структуре полужидкого сплава напряжение сдвига уменьшается примерно на три порядка, что открывает большие возможности в изготовлении изделий самой сложной формы с минимальными энергетическими затратами.

При исследовании практических вариантов применения открытия Д. В. Спенсера в мировой практике наибольшее распространение нашли три принципиальные схемы получения сплавов с недендритной структурой и изделий из них в твердо-жидком состоянии.

1. Получение жидкого сплава и последующее его охлаждение в интервале кристаллизации в кокиле или другой форме при интенсивном перемешивании для разрушения ветвей дендритов и превращения отдельных дендритов в глобулы или сфероиды, окруженные прослойкой жидкой фазы (rheocasting – реолитье). При этом управление процессом кристаллизации осуществляется в одну стадию, т. е. без промежуточного охлаждения и повторного нагрева, но с промежуточной тепловой стабилизацией заготовки.

2. Получение мелко зернистой (в том числе недендритной) структуры в твердом слитке, с последующим нагревом его до твердо-жидкого состояния, когда каждое зерно, оплаваясь с поверхности, будет окружено прослойкой жидкой фазы и деформация заготовки в контейнере пресса или в штампе («thixocasting», «thixofforming», «thixoforging» или русские синонимы – тиксолитье, тиксоформование, тиксоштамповка и др). При тиксолитье (тиксоформовании, тиксоштамповке) слиток затвердевает полностью и охлаждается до комнатной температуры, затем разрезается на мерные заготовки, которые, после повторного нагрева и частичного расплавления в области твердо-жидкого состояния, используются для литья на машинах высокого давления (прессования или штамповки на специализированных прессах).

3. Сверхбыстрое охлаждение капель жидкого сплава и осаждение их в твердожидком состоянии на подложку в том числе и с возможностью последующей деформации.

Наиболее общее название группы обсуждаемых методов обработки металлов и сплавов semi-solid metal forming или дословно «формирование полужидкого металла». SSM – это своего рода «семейство методов», которое уже включает в себя реолитье, тиксолитье, тиксоэкструзию, жидко-твёрдую штамповку, и т. п.

Возможности, открываемые при применении SSM-методов, безусловно, крайне интересны, поэтому исследование этих методов длительное время находится в сфере внимания многих университетов и промышленных фирм в различных странах мира, что было отмечено еще в одном из первых отечественных обзоров по данной теме, выполненном

Г. С. Макаровым в середине 90-х годов. За последнее время за рубежом появилось достаточное количество монографий специалистов различных стран, посвященных не только результатам исследований, но и широкого практического использования процессов применительно к обработке алюминиевых, магниевых, медных сплавов и даже стали. Активные работы в этом направлении ведутся Шеффилдским универ-

ситетом Великобритании, сотрудниками которого в последние годы опубликован ряд крупных работ, обобщающих результаты научно-практической деятельности в области тиксофомования (G. Hirt, P. Kapranos, D. Kirkwood, R. Корр и др.). В разных странах мира регулярно проводятся международные научно-практические конференции по SSM-процессам.

В большинстве исследований отмечается, что наиболее просто обеспечить получение и подготовку к тиксотропной деформации заготовок можно для материалов с широким температурным интервалом кристаллизации, как например, у сплавов системы алюминий – кремний – магний (таких как сплав А 356 и ему подобные). Поэтому с применением этой группы сплавов и выполнено подавляющее большинство работ, известных к настоящему времени.

Первые шаги в этом направлении были предприняты фирмами Alumax и ITT-TEVES (USA) с использованием метода механического перемешивания расплава. В начале 80-х годов начался период интенсивного развития метода получения слитков с тиксотропной структурой фирмами Pechiney (France), Ormet (USA), SAG (Austria) и другими. Фирма Aluminum Pechiney, выбрав этот процесс в качестве одного из основных направлений деятельности инженерного центра компании, совместно с фирмой Alussisse-Lonsa запатентовала производство слитков с тиксотропной структурой за счет электромагнитного перемешивания жидкой ванны при полунепрерывном литье. В дальнейшем компания организовала промышленное и производство слитков с тиксотропной структурой из сплавов А356, А 357 для продажи предприятиям, производящим методами тиксолитья и тиксофомования изделия для автомобильной промышленности.

При этом можно отметить, что наибольшее развитие на первом этапе получили процессы первых двух групп – реолитья, МГД-литья и тиксолитья, для реализации которых в ряде стран налажено производство мощного современного оборудования. Например, итальянская фирма Italpresse в развитие работ, проведенных с компанией Pechiney, на базе машин для литья под высоким давлением серии МЛД IP 2000 – IP 4500 разработала специальную технологическую модификацию для процесса «thixocasting», которая в числе другой достаточно широкой номенклатуры изделий позволяет производить из алюминиевых сплавов заготовки колес для легковых автомобилей весом до 17 кг.

Такие процессы второй группы как thixofforming, thixoforging, thixorolling, базирующиеся на использовании традиционных способов обработки металлов давлением, освоены в несколько меньшей степени. В то же время несколько крупных компаний в Японии, США и Европе этими методами в коммерческом производстве ежегодно производят миллионы деталей из алюминиевых сплавов для автомобилестроения.

Японская фирма Rheo Tecnology Ltd, в числе одной из первых начав исследования в 1988 г., разработала методы непрерывной обработки сплавов в твердожидком состоянии с применением методов механического и электромагнитного способов перемешивания и сдвига, методы производства и формообразования сплавов в твердожидком состоянии при литье под давлением, литье слитков, прессовании и штамповке. В этих работах кроме чисто литейных процессов были широко изучены и методы деформации заготовок, нагреваемых до твердо – жидкого состояния. При этом было практически показано, что при содержании твердой фазы менее 0,6 объема заготовки сопротивление деформации алюминиевых и других сплавов составляет около 3 МПа.

Такое низкое значение сопротивления деформации позволило японской фирме Showa эффективно использовать заготовки из гиперэвтектического алюминий-кремниевый сплав А390, полученные на фирме Pechiney, для изготовления поршней автомобильных двигателей способом тиксофомования (H. V. Atkinson, P. J. Ward, 2008).

Аналогичные разработки по литью заготовок с электромагнитным перемешиванием расплава были реализованы в РФ (ВАМИ) под руководством В.Г. Борисова. Первая опытно-промышленная установка была успешно опробована им с коллегами на ИркА-Зе в 1995 г. при литье слитков сплава А356 длиной до 6 м. Однако эти работы были прекращены при развитии процессов консолидации предприятий алюминиевой отрасли.

Дальнейшие работы отечественными специалистами были продолжены с фирмой Alumax (США), которая затратив к этому времени около 10 млн. долл., создала на заводе в Инталко промышленную установку для литья слитков сплава А 357 с электромагнитным перемешиванием. Установка производительностью 16000 тн/год позволяла получать слитки диаметром от 38 до 152 мм с размером зерна около 30 мкм. Слитки, как

правило, диаметром 51 и 76 мм разрезали на заготовки длиной 100 и 178 мм, нагревали до твердо-жидкого состояния и штамповали на четырех гидравлических прессах на заводе в Сент-Луисе. В зависимости от типа сплава и вида деталей скорость деформирования изменялась от нескольких десятков до тысячи мм/с, а давление от $7 \cdot 10^{-3}$ до 135 МПа.

Фирма построила ещё один завод в Джексоне и довела к 1997 г. выпуск штамповок для автомобильной промышленности до 50 млн. штук/год. Переход от технологии точного литья автомобильных колес из сплавов А 356, 357 к штамповке в твердо-жидком состоянии позволил этой фирме не только повысить механические свойства, но и заметно изменить соотношение масс заготовки и колеса. Так, при точном литье заготовка имеет массу 11,1 кг, а готовое колесо 8,6 кг. При переходе на твердо-жидкую штамповку, соответственно – 7, 5 и 6,1 кг. При этом отмечено, что наибольшая эффективность процесса достигается при производстве геометрически сложных изделий, проблемных для традиционных методов литья и штамповки.

Есть информация об использовании процесса тиксоформования для получения штамповок словенской компанией Имполь совместно с итальянской Стампаль. Активно развивается применение технологий тиксоформования в Китае, ряд фирм которого предлагают в настоящее время поставку непрерывно литых заготовок заинтересованным предприятиям.

Немецкая фирма EFU Gesellschaft fur UR-Umformtechnik GmbH рекламировала производство слитков для тиксоформования не только из сплавов Al-Si-Mg, но и других более сложных систем легирования со значительно меньшим интервалом температур кристаллизации.

Последние в рамках опытных работ отливали слитки $\varnothing 110$ мм не только из алюминиево-кремниевых сплавов А 356, А 380, а так же из сплавов 5754, 6061, 6082, 2024, 7075 с модифицированием их лигатурой АТВ 5–1 и электромагнитным перемешиванием. Слитки обтачивали до 60 мм, нагревали в индукционной печи, применяя специальный индукционный датчик, позволяющий судить о количестве жидкой фазы, и штамповали диски толщиной 4 мм при скорости перемещения пуансона 100–500 мм/с и температуре матрицы 150–300 °С. Полученные при этом штамповки имели свойства близкие к полуфабрикатам, полученным по традиционной технологии.

Таблица 1

Сплав	Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %
A356	T6	234	172	12
A357	T6	358	290	10
6061	T6	330	290	8,2
2017	T4	386	276	8,8
7075	T6	496	421	7,1

Для одного из заводов фирмы Reynolds Me Co (USA) в 1998 г. российскими специалистами фирмы «Синталко» была опробована технология литья слитков из сплава 6061 с недендритной структурой с применением оснастки Maxicast фирмы Wagstaff для получения заготовок, использующихся для штамповки колес грузовых автомобилей. При этом предложена конструкция установки, позволяющая реализовать двухплоскостное перемешивание расплава, что обеспечивает эффективное воздействие на формирование структуры слитка диаметром до 8 дюймов.

В последние годы практической реализации процесса достигла фирма Eling A. D. из Сербии, которая в 2007–2009 гг. разработала электромагнитный стол и начала его продажи с участием компании S. M. A. C. для производства по технологии TIXOTROPIC слитков сплавов группы бxxx, которые рекомендуются для прессования без проведения предварительной гомогенизации.

От тиксоэкструзии ожидают и развитие возможностей в переработке трудно деформируемых сплавов в сложные профили. Так, на конференции прессовщиков в Германии в 1998 г. сообщено об опытах по получению тиксоэкструзией тонкостенных профилей из сплава 7021 (R. Kopp, M. Wimmer). При традиционном прессовании этого сплава возможна максимальная скорость выхода профиля 5–7 м/мин. В опытах по тиксоэкструзии удалось получить скорость выхода профиля до 30 м/мин. Высокие значения относительного удлинения профилей показывают, что имеется резерв

повышения механических свойств за счет термообработки. В более позднее время появились работы, связанные с прессованием профильной продукции из сплавов 6082, 2024, 7003 и 7075.

В работах, связанных с применением традиционных способов обработки металлов давлением заготовок, находящихся в тиксотропном состоянии, отмечается, что особо важным является операция повторного нагрева литых заготовок до жидко-твердого состояния. Его целью является получение однородного температурного состояния заготовки в диапазоне между линиями солидуса и ликвидуса с точно контролируемым содержанием твердой фазы из частиц глобулярной формы, равномерно распределенных в жидкой фазе с более низкой температурой затвердевания.

Во многих работах особо подчеркивается, что именно температура нагрева определяет количественное содержание твердой фазы в заготовке. От правильности выбора этой температуры, равномерности ее распределения по сечению заготовки, а так же общего времени нагрева зависит состояние микроструктуры заготовки перед деформацией, то есть степень проявления эффекта тиксотропности. Наиболее эффективным способом нагрева заготовок с тиксотропной структурой признан высокочастотный индукционный нагрев, время нагрева при котором не превышает 1–2 минут, что исключает окисление образующейся жидкой фазы и снижение механических характеристик конечных изделий. Такой нагрев проводится, как правило, на установках карусельного типа, что позволяет реализовать непрерывный процесс подготовки заготовок к деформации.

Таким образом, процессы, базирующиеся на применении метода электромагнитного перемешивания расплава при затвердевании сплавов с достаточно широким температурным интервалом кристаллизации, получили во Франции, Японии, США, Германии, Китае и ряде других стран достаточно широкое распространение при непрерывном литье слитков с недендритной структурой, подвергаемых в дальнейшем нагреву до жидко-твердого состояния и формоизменению различными методами с целью изготовления широкой номенклатуры изделий сложной геометрической формы.

В России начало систематическим исследованиям деформации заготовок в жидко-твердом состоянии положили ученые МГТУ им. Н.Э. Баумана проф. Б.И. Семенов с учениками, которыми в 2010 г. опубликована одна из первых монографий по этой теме, и МГТУ «Станкин» – проф. Ю.П. Кирдеев, проф. А.Э. Артес. Их исследования были связаны, в основном, с лабораторной разработкой технологических параметров штамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 в жидко – твердом состоянии.

В проведенных работах установлено, что применение тиксотехнологии характеризуются одновременным возрастанием прочности и пластичности материала поковок. При охлаждении до температуры суспензии с содержанием твердой фазы более 90%, формоизменяемая среда характеризуется пластичностью и сопротивлением деформированию подобными горячей объемной штамповке. Отштампованные таким способом поковки обладают высоким качеством и повышенной надежностью, существенно улучшенными критериями технологичности. Исходя из опыта экспериментальных работ, при проектировании штампов для процесса тиксоштамповки рекомендовано внутренние уклоны назначать по стандартам, принятым для горячей объемной штамповки (ГОШ) ГОСТ 7505–89 (из-за опасности залипания поковки на внутренней поверхности в результате термической усадки), а внешние штамповочные уклоны 0–2° (значительно меньше чем для ГОШ). Внутренние радиусы скругления – по стандартам ГОШ, а внешние 0–2 мм. Процесс тиксоштамповки заготовок из сплава А356 начинается при минимальном содержании твердой фазы ~ 50%. Поскольку материал в течение всего процесса деформации должен находиться в твердожидком состоянии, то штамп должен быть нагрет как минимум до температуры 250°С. Для смазки штампов при тиксоштамповке поковок из А356, как правило, рекомендовано использование нитрида бора (BN) или графита в дисперсном состоянии. Авторами были предприняты попытки внедрения разработанных технологий на АвтоВАЗе.

Аналогичные работы проведены и в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете проф. Казаковым А.А. с сотрудниками, в которых предложены методы прогнозирования составов сплавов для тиксотропной деформации и совершенствования технологии подготовки сплава А 357 к тиксоформовке. По разработанной технологии получены опытные отливки из сплава А357 тиксолитьем в производственных условиях.

Реальная попытка создания опытно – промышленной технологии и оборудования для ее реализации предпринята ВНИИМЕТМАШем, который в настоящее время имеет участок тиксотропного литья изделий ответственного назначения на базе прессы усилием 4 МН, в том числе тиксоформования. Отмечая сложность конструкции установок, использующих принцип МГД-перемешивания расплава для получения заготовок с тиксотропной структурой, необходимость дорогостоящего электропривода для обеспечения работы (индукторы, магнитопроводы, тиристорные или генераторные преобразователи и т.д.) специалистами ВНИИМЕТМАША использован принцип вибрационного возмущения кристаллизующегося расплава. Для этого транспортный желоб, по которому расплав с соответствующей температурой подается в литейную форму, снабжен механизмом, сообщаящим желобу возвратно-поступательные колебания переменной частоты и амплитуд вдоль направления разлива. При движении потока расплава по желобу активизируется захват зародышей кристаллов с затвердевшей корки металла, что приводит к получению мелкозернистой структуры заготовки. За счет этого по данным разработчиков обеспечивается получение заготовок требуемого качества.

В работах, проведенных на опытном участке ВНИИМЕТМАША, изучены различные технологические схемы штамповки детали ступицы составного тормозного диска из алюминиевого сплава АЛ-9 по технологии тиксоформования. Использовались два типа заготовок: цилиндрическая и кольцевая. Представлены исследования прочностных характеристик полученных изделий. Определена оптимальная технологическая схема и режимы получения качественной детали ступицы тормозного диска автомобиля методом тиксоформования. К 2010 г. институтом выполнен цикл работ по теме «Разработка технологии и основных технических решений на оборудование для производства алюминиевых корпусов букс вагонов метрополитена по новейшей технологии тиксоформования», который предложен для практической реализации ряду организаций.

Несмотря на то, что подавляющее большинство работ, реализованных на зарубежных предприятиях, базируется на получении заготовок с тиксотропной структурой методом электромагнитного перемешивания расплава при кристаллизации, следует признать, что у этого способа есть ряд недостатков. Применение МГД – устройств, занимающих определенные площади литейного стола, уменьшает количество слитков, одновременно отливаемых на литейной машине и, соответственно, ее производительность. Требуется применение достаточно сложных дополнительных устройств, на что обращают внимание сотрудники ВНИИМЕТМАША. Поэтому сохраняется интерес к исследованию и других способов получения заготовок для производства изделий методами деформации в жидко-твердом состоянии.

Например, фирма Sumitomo Light Metal Industry Ltd разработала технологию получения заготовок методом струйного осаждения капель (Ospray-процесс) из заэвтектического силумина, содержащего 17% кремния, которая может быть отнесена к третьей группе классификации SSM-методов. Изделия применены в двигателе фирмы Мазда Мотор благодаря высоким свойствам и низкому коэффициенту линейного расширения. Аналогичные изделия, но с содержанием кремния до 35%, получены в опытно-промышленных работах сотрудниками научно-технического центра ОАО КРАМЗ и ДМетИ, с применением методов металлургии гранул в начале 90-х годов.

В ряде работ отечественных исследователей ВИЛСа и ВИАМа, выполненных под руководством В.И. Добаткина и И.Н. Фридляндера, достаточно давно установлено, что в процессе литья слитков алюминиевых сплавов недендритную структуру можно получить:

- при наличии в сплаве умеренного количества элементов модификаторов и воздействии на кристаллизующийся сплав мощного ультразвука;
- в случае комплексного легирования некоторых алюминиевых сплавов скандием и цирконием (например, как в сплаве 1570);
- в слитках промышленных алюминий-литиевых сплавов, содержащих добавку циркония или в традиционных сплавах при наличии очень высокого содержания элементов модификаторов (например, 0,5% циркония в сплаве Д16).

В Германии еще в 1993 г. так же проводилось изучение достаточно экономичного процесса модифицирования титаном и бором алюминиевого сплава, который при последующем частичном оплавлении образует «суспензию» с частицами твердой фазы размерами 100 мкм и хорошими тиксотропными свойствами. Такой подход

представляется достаточно перспективным, так как позволяет реализовать получение заготовок с недендритной структурой в условиях действующих производств без существенного пересмотра состава применяемого оборудования.

С использованием аналогичного подхода специалистами НТЦ ОАО КраМЗ в рамках опытных работ 2002–03 гг. исследована возможность получения слитков сплава АВ диаметром 190 мм с измельчением структуры до 10–12 тысяч зерен в 1 см² поперечного сечения за счет применения высокоэффективной лигатуры алюминий-титан-бор. При последующей высокотемпературной деформации сплава с частичным оплавлением элементов структуры были получены штамповки автомобильных колес диаметром 14 дюймов, которые имели высокие механические свойства и требуемые эксплуатационные характеристики. Полученный комплекс механических и эксплуатационных характеристик колес, соответствовал требованиям стандарта ГОСТ Р 50511 «Колеса из легких сплавов для пневматических шин». Однако эти работы, как и многие другие, не получили развития в силу обстоятельств, сложившихся в отечественной промышленности в тот период времени.

Анализируя ситуацию в мире в целом, можно констатировать, что после десятилетия изучения и применения процессы производства сплавов с тиксотропной структурой и переработки их в полуфабрикаты методами обработки давлением в жидко-твердом состоянии все еще находятся в состоянии динамичного развития. Однозначно доказано, что применение SSM-методов для получения деформированных полуфабрикатов позволяет реализовать следующие преимущества:

- возможность активно деформировать литейные сплавы;
- получать за одну операцию изделия самой сложной фасонной формы при высокой точности размеров, часто исключая необходимость последующей механической обработки;
- обеспечивать высокий коэффициент использования материала и низкие энергетические затраты при производстве изделий сложной формы;
- получать комплекс физико-механических характеристик изделий, обеспечивающих надежную эксплуатацию изделий при их минимальных весовых характеристиках;
- интенсифицировать процессы деформации сложно легированных деформируемых сплавов и снизить затраты на их производство.

При явном наличии такого комплекса достоинств SSM-методов очевидно и значительное отставание отечественных науки и промышленности в разработке научных основ, оборудования и технологических процессов, базирующихся на получении и применении заготовок с тиксотропной структурой, а так же использования такой продукции в машиностроительной промышленности. В то же время большинство иностранных фирм, создающих производства автомобилей в РФ и имеющих задачи по локализации производства автокомпонентов с использованием продукции российских производителей, продолжают применять для производства техники и комплектации ее обслуживания в сервисных сетях изделия, полученные методами тиксотропного формоизменения зарубежными производителями. В такой ситуации, когда рост применения алюминия в машиностроении является очевидным, представляется целесообразность одновременной организации работ по нескольким направлениям:

- с одной стороны целесообразна закупка за рубежом современного оборудования и освоение технологий производства изделий для автопрома (как наиболее массового потребителя) и других машиностроительных предприятий на отечественных заводах (или на совместных предприятиях, которые возможно создать с зарубежными партнерами). Этот подход может быть эффективно реализован в достаточно сжатые сроки с учетом опыта, накопленного многими зарубежными фирмами в использовании SSM-методов первой и второй групп для литейных сплавов с широким интервалом кристаллизации;
- с другой стороны необходимо использовать научные заделы, созданные в предыдущее время по литью сплавов с недендритной структурой (в том числе и методами высокоскоростной кристаллизации), и организовать развитие собственной научной школы, проектно-конструкторской и машиностроительной базы для исследования деформации этих сплавов в жидко-твердом состоянии и внедрения в промышленность полуфабрикатов из них. Работы в этом направлении могут обеспечить эффективное применение SSM-методов не только для литейных сплавов, но и большинства групп деформируемых сплавов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ НА БАЗЕ КАРУСЕЛЬНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

В последние годы специалисты в области теории и практики трубопрофильного и проволочного производства цветных металлов уделяют все большее внимание исследованию и разработке способов непрерывного прессования профилей. Это связано с тем, что освоение процессов непрерывного прессования не только соответствует инновационным направлениям развития металлообрабатывающих производств, но и с тем, что многолетний опыт их исследования, разработки и промышленного применения за рубежом подтверждает эффективность и перспективность этих методов. Из ныне существующих способов непрерывного прессования наиболее известен метод Конформ, разработанный английским исследователем Д. Грином в начале 70-х годов прошлого столетия. За эти годы ряд зарубежных фирм освоили производство нескольких модификаций линий непрерывного прессования Конформ цветных металлов и сплавов. Основные технологические особенности непрерывного прессования труб, профилей и проволоки наиболее глубоко исследованы для алюминиевых сплавов и имеется устойчивая тенденция к дальнейшему расширению применения этого способа в прессовом производстве [1].

Для установок Конформ литейную заготовку, как правило, получают аналогично процессу непрерывного литья-прокатки в кристаллизаторах с подвижными стенками, затем калибруют в роликовой волоке и подают в ручей приводного колеса. Новым направлением промышленного освоения технологии непрерывного литья-прессования цветных металлов является способ Кастэкс, основанный на использовании рабочего узла установок Конформ в качестве кристаллизатора заливаемого в него жидкого металла. Затвердевшая часть слитка подвергается прессованию по мере ее поступления в деформационную зону перед матрицей (рис. 1). Стабильность реализации этого процесса во многом зависит от эффективной работы системы непрерывной подачи

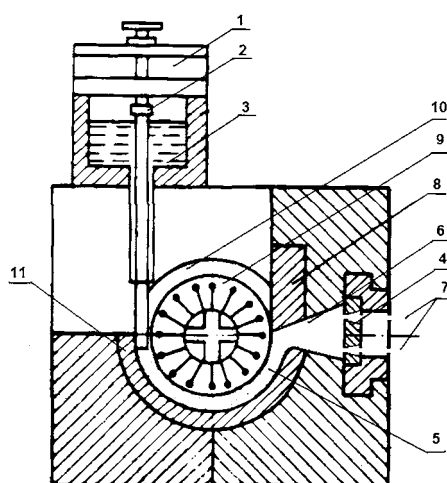


Рис. 1. Схема процесса непрерывного прессования Конформ-Кастэкс полых профилей из жидкого металла. 1 – литейный желоб; 2 – устройство регулирования расхода жидкого металла; 3 – жидкий металл; 4 – матрица; 5 – фронт кристаллизации; 6 – камера сварки; 7 – полые профили; 8 – упор; 9 – колесо; 10 – кольцевая канавка; 11 – кольцевая вставка

расплавленного металла в ручей рабочего колеса, которая должна отвечать следующим требованиям:

- расплавленный металл не затвердевает в начальной фазе процесса на поверхности контакта с неподвижным башмаком, сопрягающимся с ручьем приводного колеса;
- скорость перемещения расплавленного металла постоянна и соответствует скорости его затвердевания, определяемой интенсивностью теплоотвода от пресового инструмента;
- в потоке расплавленного металла не должно быть турбулентности.

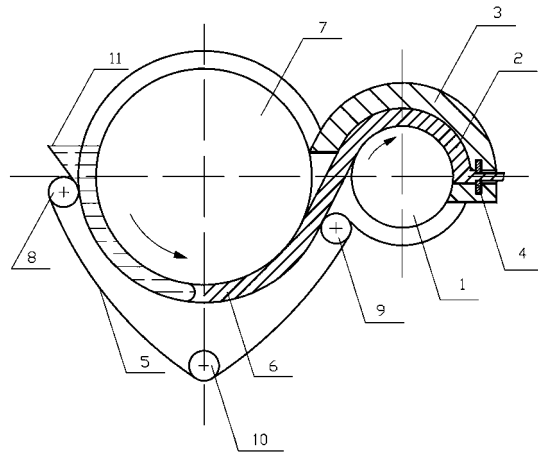


Рис. 2. Схема процесса непрерывного литья и прессования металлов

Использование базовой установки Конформ для осуществления способа Кастэкс вызывает затруднения в соблюдении этих требований, в частности, при заливке жидкого металла в ручей рабочего колеса происходит его «намораживание» на входной части башмака, что нарушает стабильность процесса подачи расплава. Для устранения этого недостатка предложено устройство непрерывного литья и прессования [2], состоящее из основного колеса 1 с основным калибром 2, образованным ручьем колеса и основной кольцевой вставкой 3, содержащей матрицу 4, т.е. установку Конформ (рисунок 2). Для заливки и кристаллизации жидкого металла устройство снабжено дополнительным калибром 6 образованным сопряжением по дуге дополнительного колеса 7 с лентой 5 и обеспечивающими ее натяжение роликами 8, 9, 10. Работа устройства осуществляется следующим образом: жидкий металл 11 заливается в канавку дополнительного колеса, охваченного движущейся стальной лентой, кристаллизуется и подается в виде слитка 2 в калибр основного колеса, из которого выдавливается в отверстие матрицы. Данное устройство действует по принципу кристаллизатор-слиток-прессование способом Конформ.

В лаборатории кафедры ОМД Сибирского федерального университета смонтирована экспериментальная установка непрерывного литья-прессования метал-

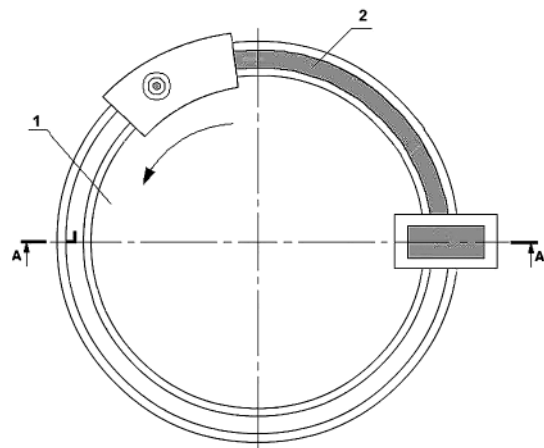
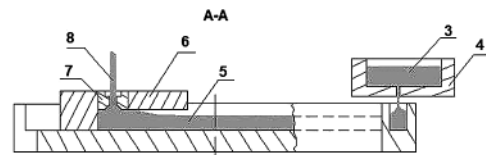


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки непрерывного литья в карусельный кристаллизатор и прессования способом Конформ

Рис. 4. Схема совмещения процессов непрерывного литья в карусельный кристаллизатор и прессования способом Конформ.

- 1 – колесо-кристаллизатор; 2 – ручей;
3 – жидкий металл; 4 – литниковая коробка;
5 – слиток; 6 – матрицедержатель;
7 – матрица; 8 – пресс-изделие

лов с горизонтальным расположением рабочего колеса, в верхнем основании которого выполнена кольцевая канавка (рис. 3).

Заливка жидкого металла и его кристаллизация происходит, так же как и в карусельном кристаллизаторе. Затвердевший металл поступает в зону сопряжения канавки колеса с башмаком и экструдируется в отверстие матрицы подобно способу Конформ (рис. 4).

Таким образом, реализуется процесс непрерывного литья-прессования металла в одном инструменте, причем соблюдение вышеперечисленных требований к устойчивому его осуществлению не представляет трудностей.

Проектирование технологического процесса непрерывного литья-прессования на этих установках проводилось в следующей последовательности:

- нахождение оптимальных размеров поперечного сечения контейнера;
- определение значений входного угла матрицы и угла наклона ее продольной оси к дну канавки колеса, обеспечивающих минимальную силу прессования;
- расчет длины контейнера, необходимой для стабильного выдавливания металла в отверстие матрицы;
- расчет времени кристаллизации расплава металла в канавке рабочего колеса для определения места его заливки;
- расчет температурных полей в деформационной зоне.

Определение и оптимизация расчетных параметров проводилось на основе вариационного метода исчисления. Научная новизна методики и алгоритма расчетов изложена в ряде публикаций в отечественных и зарубежных журналах. Для практической реализации расчетов составлены компьютерные программы, авторское право на которые защищено свидетельствами о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Локшин М.З., Шамраев В.Н., Авдеев В.В., Богатов В.Ю. Современные способы непрерывного прессования труб, профилей и проволоки//Технология легких сплавов. – 1992. – № 10. – С.60–65.

2. Солопко И.В., Горохов Ю.В. Устройство для непрерывного литья – прессования. Патент РФ № 96041, МПК В22F 3/02. Опубликовано: 20.07.2010, Бюл. № 20.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ПРИПОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА*

О.О. Виноградов, А.В. Столяров, Е.С. Лопатина

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

На сегодняшний день, на рынке изготовления полуфабрикатов из сплавов на основе серебра наблюдается значительный рост объемов производства, обусловленный расширением областей применения данной продукции. В связи с этим глубокая переработка серебра является одним из перспективных направлений работы таких профилированных металлургических предприятий, например, как Красноярский завод цветных металлов. Одним из перспективных направлений является изготовление полос, проволоки и порошка из припойных сплавов типа ПСр-40, ПСр-72, в том числе и с помощью совмещенных методов обработки [1], что обусловлено востребованностью этих полуфабрикатах предприятиями Красноярского края, такими, как Красноярский завод холодильников «Бирюса», Дивногорский завод низковольтных автоматов, Минусинский завод «Электрокомплекс» и др. Применяются эти сплавы для пайки трубок компрессоров холодильных установок, для пайки контактов низковольтной аппаратуры и т. д.

Одной из основных задач современного производства является снижение вредных факторов, возникающих в процессе обработки. Используемый в практике работы заводов сплав ПСр-40 содержит кадмий и, при наличии образующихся в процессе плавки припойного сплава и последующей пайки летучих соединений кадмия, обладающих высокой токсичностью, не рекомендован к использованию в производстве. Таким образом, актуальной является задача по разработке серебряных припоев, не содержащих кадмий, причем она осложняется тем, что любые изменения в химическом составе ухудшают как температурные, так электрофизические характеристики припойного сплава.

Решение задачи по поиску новых сплавов ПСр-40, не содержащих кадмий, но имеющих высокий уровень механических и технологических свойств, проводилось с использованием анализа двойных диаграмм состояния серебра с индием, цинком, кадмием, оловом и некоторыми другими металлами. На основании результатов этого анализа были разработаны припойные сплавы [2–4], соответствующие требованиям стандартов по химическому составу основного компонента и технологическим свойствам. Химический состав сплавов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав разработанных и используемых в производстве сплавов

Сплав	Состав	Содержание компонентов, мас. %					
		Серебро	Медь	Цинк	Кадмий	Индий	Олово
ПСр-40 И	1	40	34	21	-	5	5
	2	40	35	22	-	1	2
	3	40	36	19	-	3	1
ПСр-40 по ГОСТ	4	40	16,9	16,9	26,2	-	-
ПСр-72 по ГОСТ	5	72	28	-	-	-	-

Разработанные сплавы показали высокую работоспособность, имеют необходимый комплекс электро-физических, технологических и механических свойств (температура пайки, коррозионная стойкость, смачиваемость, электросопротивление, временное сопротивление разрыву и т. д.) и опробованы на Красноярском заводе цветных металлов. Однако, как и большинство припойных сплавов, они являются труднодеформируемыми и требуют большого количества переделов обработки и промежуточных отжигов.

* Работа выполнена под руководством д. т. н., проф. С. Б. Сидельникова

Для производства длиномерных полуфабрикатов в виде проволоки диаметром 1,2 мм были опробованы различные технологические схемы, включающие операции литья, сортовой прокатки, прессования, волочения, отжига и др. (рис. 1).

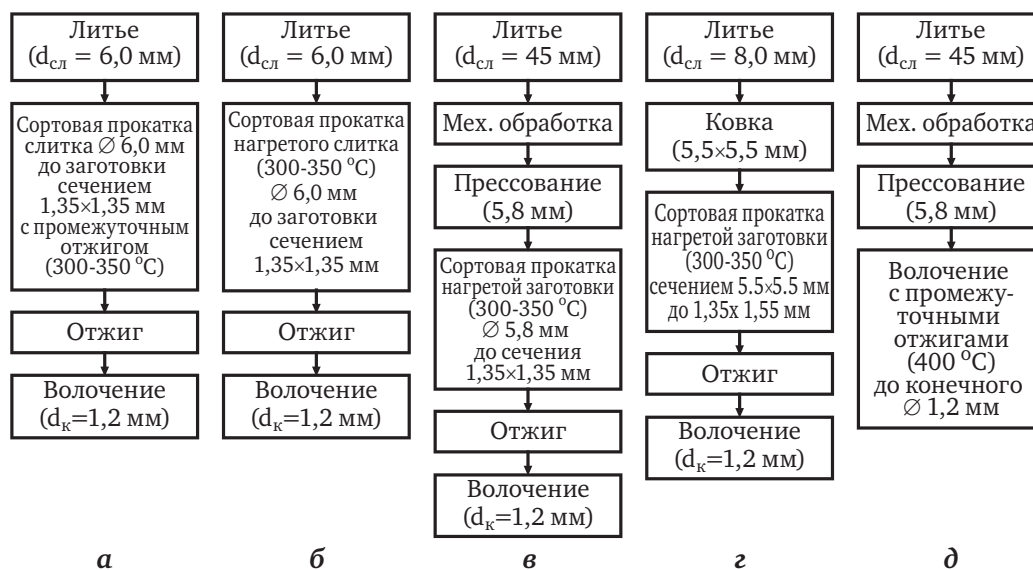


Рис. 1. Технологические схемы получения проволоки

Для завода ОАО «Красцветмет» была разработана и опробована технологическая схема, представленная на рис. 2. Данная схема была адаптирована к заводскому оборудованию и с ее помощью получена укрупненная партия припойной проволоки, которая прошла промышленные испытания на одном из заводов-потребителей.

Представленные схемы являются многоцикловыми и включают в себя множество промежуточных операций. Это оказывает влияние на повышение себестоимости продукции и, как следствие, снижает ее конкурентоспособность. В мировой практике для решения данной проблемы ведутся работы по созданию технологий и устройств, совмещающих в одной непрерывной линии расплав, кристаллизацию и формоизменение. Наиболее перспективной технологией для производства длиномерных полуфабрикатов является технология совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛИПП). Проведенные ранее исследования были направлены на изучение методов совмещенной обработки применительно к алюминиевым сплавам [1], и в них не рассматривались особенности деформации сплавов на основе серебра. Одним из технических решений для реализации процесса СЛИПП является устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования металла [5]. Для проектирования технологических режимов обработки на таком устройстве необходимо знать закономерности распределения температуры полуфабриката и тепловые условия процесса. С этой целью моделировали процесс СЛИПП [6] с помощью разработанной ранее программы «СЛПП» с использованием системы программирования DELPHI (рис. 3).

В качестве значимых параметров были выбраны следующие: h_1 – минимальный зазор между валками; h_p – высота зеркала матрицы; $h_{вх}$ – высота входа расплава в активную зону, которая может быть рассчитана по известным геометрическим соотношениям; ω – угловая скорость валков; R – средний радиус валков. При этом температура расплава на входе в активную зону была строго фиксированной и равнялась $T_0 = 990^\circ\text{C}$. Температура валков в начале процесса составляла $T_v = 20^\circ\text{C}$. Кроме того, задавались соответствующие теплотехнические характеристики для серебра (рис. 3) и значение коэффициента K при контактном обмене ($K=100$). Значение K используется в качестве дополнительного корректирующего коэффициента, учитывающего процессы теплопередачи иными механизмами (конвекцией, испарением, кипением жидкости и др.).

Результаты расчета для различных условий ведения процесса (водоохлаждаемые и неводоохлаждаемые валки) представляли в виде графиков зависимости температуры металла от времени протекания процесса по длине зоны очага кристаллизации-деформации (рис. 4) в трех характерных местах (сечениях): в центре полуфабриката (1), на поверхности контакта металла с валками (3) и на оси, равноудаленной от них (2).

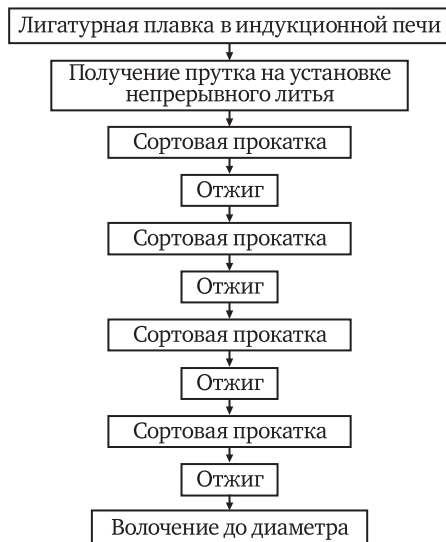


Рис. 2. Схема технологического процесса получения проволоки диаметром 1,2 мм на ОАО «Красцветмет»

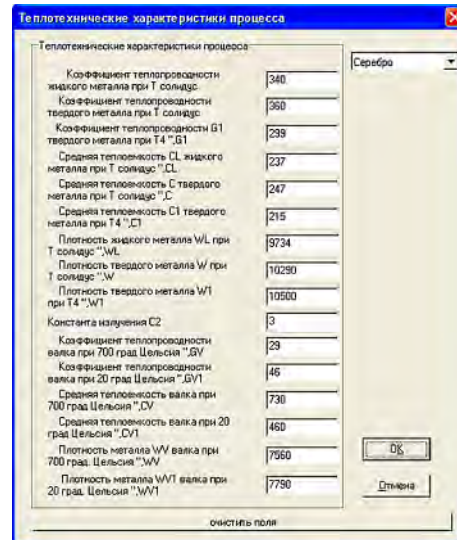


Рис. 3. Исходные данные для моделирования процесса

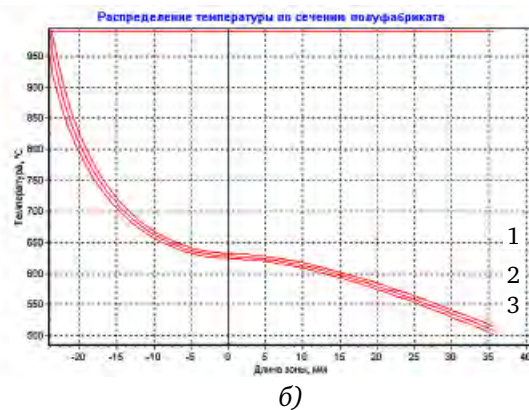
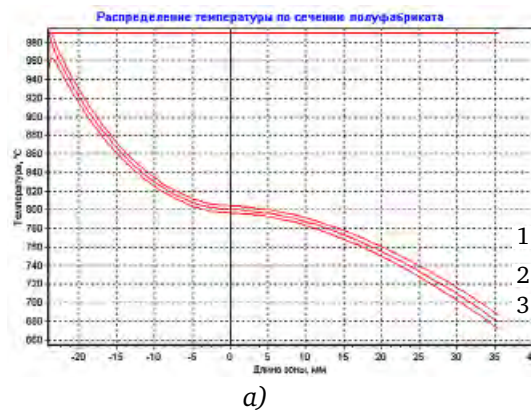


Рис. 4. Зависимости температуры по длине зоны очага кристаллизации-деформации: а – неводоохлаждаемые валки; б – водоохлаждаемые валки

Распределение температуры носит нелинейный характер, при этом как видно из графиков в сечении 3 значение температуры значительно ниже, чем в сечении 1, что обусловлено отбором тепла валками. Характерной особенностью полученных зависимостей является незначительное уменьшение температуры в сечении 3 для водоохлаждаемых валков, всего на 80–100 °С. По всей видимости, данное явление обуславливается теплофизическими свойствами сплава. Проведенные теоретические расчеты изменения температуры в процессе литья, прокатки и прессования показали, что этот процесс может быть осуществлен с минимальными энергозатратами.

Для его реализации создана экспериментальная установка на базе предложенного устройства [5] и спроектирован инструментальный узел с целью получения проволоки тонких размеров. Установка (рис. 5) включает следующие основные элементы: станину, изготовленную из двух стальных пластин, соединенных между собой четырьмя стяжными шпильками; валковый узел, состоящий из валка с выступом и валка с вырезом, образующими закрытый ящичный калибр размерами 9x4 мм; прессовый инструмент и поджимной узел пружинного типа; подшипники качения, расположенные в отверстиях станины и обеспечивающие вращение валков. Валки приводились во вращение с помощью электродвигателя мощностью 320 Вт через червячный редуктор. Окружная скорость вращения валков составила 2,5 об/мин.

Опробование процессов совмещенной обработки проводилось на сплаве ПСР-40 по методу совмещенного литья, прокатки и прессования на модельной установке СЛИПП-80 и лабораторной установке СЛИПП-200 [1]. Полученные образцы в виде



Рис. 5. Общий вид модельной установки СЛИПП-80



Рис. 6. Недокаты и пресс-изделия, полученные методом совмещенной обработки сплава ПСр-40 на различных экспериментальных установках

недокатов и пресс-изделий приведены на рис. 6, при этом следует отметить, что процесс получения пресс-изделий достаточно малых размеров (диаметр 2,0–3,0 мм) был опробован экспериментально впервые.

Еще одной задачей исследования было определение энергосиловых параметров процесса для формирования требований к опытно-промышленной установке. С помощью мессдоз и фиксирующей аппаратуры на установке СЛИПП-200 замеряли усилия, действующие на валки и матрицу при реализации процесса заливки металла непосредственно в валки и последующей кристаллизации-деформации с получением пресс-изделий диаметром 7–9 мм. С помощью самописца были построены осциллограммы и зафиксированы следующие значения силовых параметров:

- для прутка диаметром 7 мм максимальное усилие на валках составило 195,31 кН, а максимальное усилие на матрице – 258,35 кН
- для прутка диаметром 9 мм максимальное усилие на валках составило 94,96 кН, а максимальное усилие на матрице – 163,96 кН.

Для исследования механических свойств полученных полуфабрикатов из прутка диаметром 9 мм были изготовлены образцы для проведения испытаний методом растяжения из нового сплава ПСр-40 [3]. Образцы имели длину рабочей зоны 30 мм и диаметр 6 мм. Один из образцов был подвергнут отжигу при температуре 500 °С, второй остался упрочненным. Испытания проводились на универсальной машине LFM 400, а их целью было определение временного сопротивления разрыву, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения при разрушении образца. В результате проведения испытаний были определены механические свойства деформированного и отожженного образцов (табл. 2)

Таблица 2

Механические свойства прутков из сплава ПСр-40

Параметр	После деформации	После отжига
Временное сопротивление разрыву, МПа	579,7	392,2
Предел текучести, МПа	141,9	33,3
Относительное удлинение, %	4,1	16,5
Относительное сужение, %	9,0	0,3

Для металлографических исследований были подготовлены микрошлифы из данных образцов (рис. 7), причем материал прутка диаметром 9 мм исследовался как в деформированном, так и в отожженном состоянии. Срез образцов подвергся шлифовке, полировке и травлению. Исследование проводилось с помощью микроскопа, имеющего кратность увеличения 800 и 1600. В результате исследования было выяснено, что соотношение между серебром и медью 40:35 соответствует несколько заэвтектическому положению сплава на двойной диаграмме Ag-Cu. Поэтому, структура припоя в литом состоянии содержит достаточно пластичные избыточные кристаллы твердого раствора компонентов системы на основе меди и эвтектику между твердыми растворами на основе меди и серебра. Цинк и индий находятся в составе указанных твердых растворов, не образуя самостоятельных интерметаллидных фаз. Однако, в системе Cu-In возможно выделение вторичных выделений интерметаллида δ -фазы, что может приводить к достижению достаточной прочности припойного сплава.

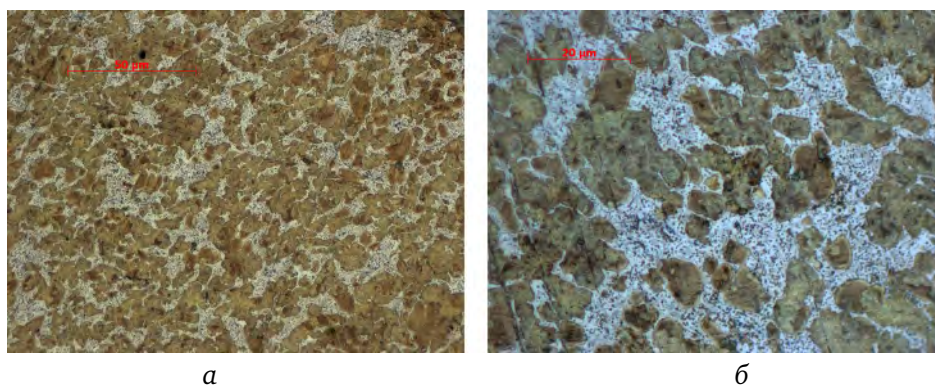


Рис. 7. Микроструктура деформированных образцов прутка диаметром 9 мм при разном увеличении $\times 800$ (а) и $\times 1600$ (б)

Для надежной пластической деформации сплав должен подвергаться отжигу при температуре 400–450 °С с выдержкой порядка 1 часа. Условия горячей деформации определяются этими же температурными интервалами. Превышение этих температурных параметров может приводить к эффектам пережога, как при термической обработке, так и при горячей пластической деформации. Структуры исследуемых образцов представлены на рис. 8.

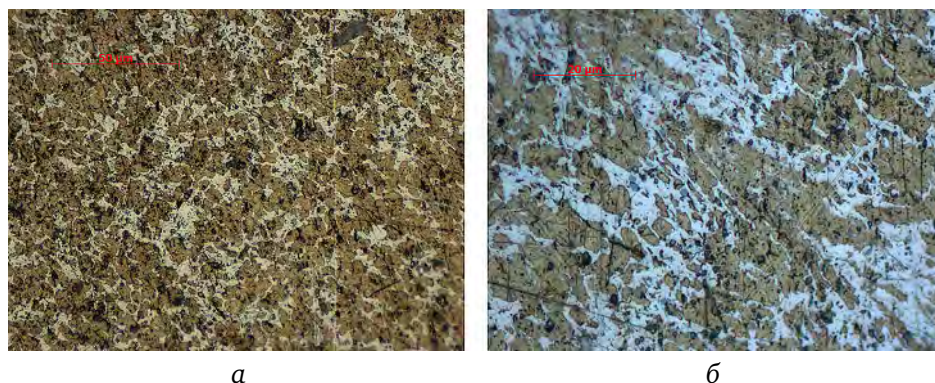


Рис. 8. Микроструктура отожженных образцов прутка диаметром 9 мм при разном увеличении $\times 800$ (а) и $\times 1600$ (б)

Таким образом, было проведено компьютерное и физическое моделирование процесса совмещенного литья, прокатки и прессования, результаты которого позволили утверждать, что для получения пресс-изделий небольшого поперечного сечения из серебра и его сплавов можно применять схему совмещенной обработки с использованием в качестве исходного материала расплава металла. Выявлены закономерности распределения температуры вдоль очага деформации-кристаллизации и влияние на нее охлаждения инструмента. На экспериментальных установках с диаметром валков 80 и 200 мм отработаны режимы совмещенной обработки, определены конструктивные особенности выполнения отдельных узлов, уточнены температурно-скоростные условия проведения процесса СЛИПП, замерены энергосиловые параметры и получены образцы пресс-изделий. Проведены металлографические исследования структуры и оценка механических свойств полученных полуфабриката из припойного сплава на основе серебра ПСр-40.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
2. Довженко Н. Н., Ходюков Б. П., Сидельников С. Б. и др. Припой на основе серебра. Патент РФ № 2335385. Оpubл. 10.10.2008.

3. Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Биронт В. С. и др. Припой на основе серебра. Патент РФ № 2367552. Оpubл. 20.09.2009.

4. Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Биронт В. С. и др. Припой на основе серебра. Патент РФ № 2367553. Оpubл. 20.09.2009.

5. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Лопатина Е. С. и др. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов. Патент РФ № 73245 РФ.

6. С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, О. О. Виноградов и др. Моделирование процесса совмещенного литья, прокатки и прессования для припойных сплавов на основе серебра/Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2010. – № 1. – С. 72–75.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЛИПП

И. Ю. Губанов, Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников,
С. В. Беляев, В. Н. Баранов, И. Ю. Маслов

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

В настоящее время достаточно хорошо изучены и широко применяются в производстве процессы беслитковой прокатки тонкой литой полосы из алюминиевых сплавов, однако данный процесс невозможно использовать для получения полуфабрикатов и изделий бесконечной длины в виде профилей, проволоки и т.д. Для их производства за рубежом разработаны и применяются совмещенные процессы непрерывного литья, прокатки и прессования (Кастекс, Кастер). В нашей стране разработки в этой области связаны с созданием установок и технологий непрерывного прессования и непрерывного литья-прессования по методу Конформ и совмещенных процессов обработки по методу совмещенной прокатки-прессования (СПП) и совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛИПП) [1].

Однако разработка и внедрение промышленных установок сдерживается необходимостью дополнительных исследований и разработки моделей и программ ввиду сложности одновременно протекающих процессов гидродинамического течения металла, процессов кристаллизации и теплообмена параллельно с процессами пластической деформации. Моделирование каждого из этих процессов является сложной математической задачей, которая не имеет замкнутого решения. Для их решения с успехом применяются программные продукты, основанные на методах конечных разностей и конечных элементов: моделирования процессов литья (Procast – Франция, Magmasoft – Германия, Flow3D – США), так и обработки металлов давлением (QForm – Россия, Deform-3D – США). Из программ для моделирования совмещенных процессов, в частности беслитковой прокатки, известна компьютерная система MIRAS [2], представляющая собой универсальный пакет программ, позволяет моделировать температурные режимы обработки, распределения напряжений и легирующих компонентов по сечению заготовки, варьируя которыми можно добиваться способа получения с однородной структурой полосы.

Однако использование данных программ затруднительно для исследования такого нового процесса СЛИПП. Поэтому, в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» создается комплекс программ по моделированию процесса совмещенного литья, прокатки и прессования. Для определения тепловых условий процесса СЛИПП разработана программа СЛПП [1], позволяющая найти распределение температуры по сечению полуфабриката в виде изотерм или графиков по мере движением линии на имитационной модели (рис. 1), от начала зоны прокатки до конца зоны распрессовки.

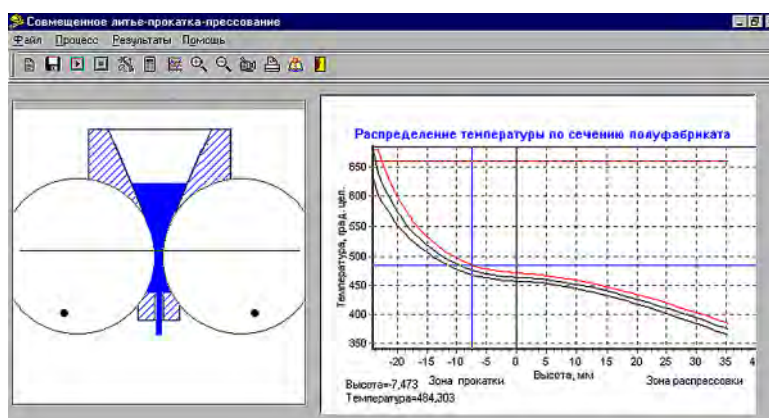


Рис. 1. Главное окно программы СЛПП

Данная программа используется для моделирования различных технологических вариантов процесса СЛИПП и выбора параметров оборудования для его реализации.

С целью определения тепловых условий и энергосиловых параметров процесса СЛИПП с применением принудительно охлаждаемого инструмента ведется разработка программы SLIPP (рис. 2).

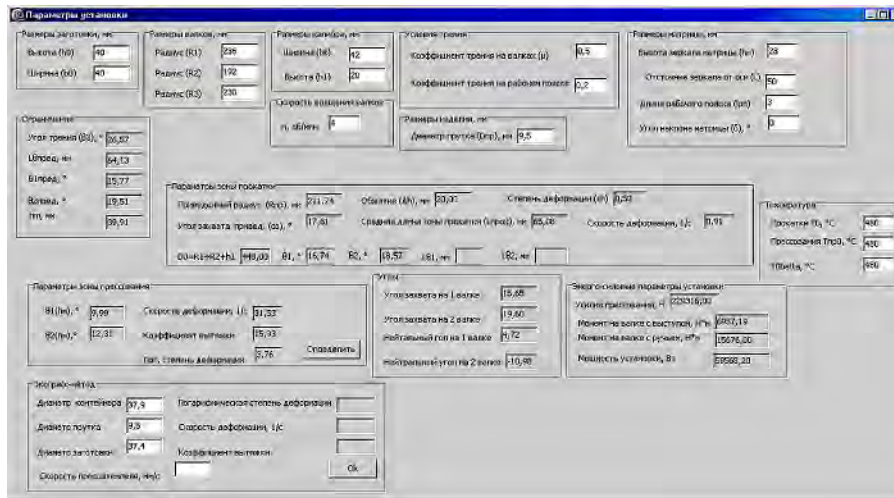


Рис. 2. Окно «Параметры установки» программы SLIPP

Варьируя геометрическими параметрами установки (диаметрами валков, размерами зеркала матрицы и ее расстоянием до оси валков) и скоростью вращения валков программа позволяет подобрать минимальную мощность для реализации процесса и определить объем и скорость подачи хладагента в системе принудительного охлаждения.

Актуальной задачей при проектировании установок СЛИПП является определение давления гидравлического прижима на матрицу с целью регулирования оптимального зазора в калибре. При минимальном зазоре увеличивается сила трения на границе контакта подвижных валков и неподвижной матрицы и возрастает абразивный износ инструмента, а с другой – при увеличении зазора возможно появление заусенца, что нарушает стабильность протекания непрерывного процесса, ухудшает качество изделия и снижает выход годного. С этой целью разработана математическая модель [3] и методика определения величины оптимального зазора для заданных параметров установки и реологии деформируемого металла.

Окончательная проверка принятых конструктивных и технологических решений установки СЛИПП проводится с помощью пакетов инженерного анализа Deform3D и Procast с учетом реальной реологии обрабатываемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С. Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография/С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Н. Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611221. «MIRAS». А. Г. Бабенко, Г. Л. Хазан, В. Ю. Бажин. Зарегистр. 22.03.07.
3. Беляев С. В. Выбор оптимальных зазоров в калибре при совмещенной прокатке-прессовании // С. В. Беляев, С. Б. Сидельников, И. Н. Довженко, И. Ю. Губанов, Д. С. Ворошилов // Журнал Сибирского федерального университета // Техника и технологии – 2010, том 4, № 3, с. 411–421.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ «КОРПУС МУФТЫ» ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД-35

В.А. Иванов, В.И. Воронков, П.А. Петров, Е.В. Крутина

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва, Россия

Для передачи крутящего момента с вала двигателя на приводы различных механизмов используются специальные муфты. Широкое распространение, особенно при использовании шаговых электродвигателей, получила муфта, конструкция которой показана на рисунке 1. Данная упругая муфта смягчает толчки и удары, возникающие при частых пусках и остановках машины, защищает привод машины от вредных крутильных колебаний, а также используется для соединения валов, имеющих взаимные смещения. Правильно подобранная по крутильной жесткости и демпфирующей способности упругая муфта существенно снижает величину вредных крутильных колебаний в приводах машин, тем самым повышая их ресурс.

Муфта состоит из трех основных элементов (рис. 1): двух ступиц и упругого зубчатого венца. Если зубчатый венец по своим демпфирующим свойствам не удовлетворяет задаче, например, при возникновении явления резонанса, то конструкция муфты позволяет его легко заменить венцом большей или меньшей жесткости. Ступицы муфты выполняются трех видов: стандартная ступица, большая ступица и удлиненная ступица.

Номенклатура детали «Ступица» (или «Корпус муфты») включает не менее 10–12 модификаций. Для каждой модификации существует несколько типоразмеров. При этом изменяется геометрия нижней части детали, а геометрия зубьев ступицы, наиболее проблематичных в изготовлении, изменяется только в масштабе, в зависимости от габаритных размеров, что позволяет применять одну, типовую, технологию изготовления корпуса муфты при изготовлении различных модификаций детали. Основные, габаритные, размеры детали «Корпус муфты» варьируются по диаметру (D) от 30 мм до 420 мм и по длине (l) от 22,5 мм до 269,5 мм (рис. 2) [4].

Деталь «Корпус муфты» изготавливается из алюминиевого сплава АД-35 либо методом литья, либо точением из пресованной заготовки. Механические свойства литых деталей получаются неоднородными по сечению. При получении детали из заготовки по технологии обработки резанием происходит нарушение структуры волокон, что также негативно сказывается на механических свойствах изделия. Для повышения качества детали может быть применен метод горячей изотермической штамповки.

Изотермическая штамповка представляет собой процесс горячего деформирования заготовок в штамповом инструменте, при котором заготовка и инструмент

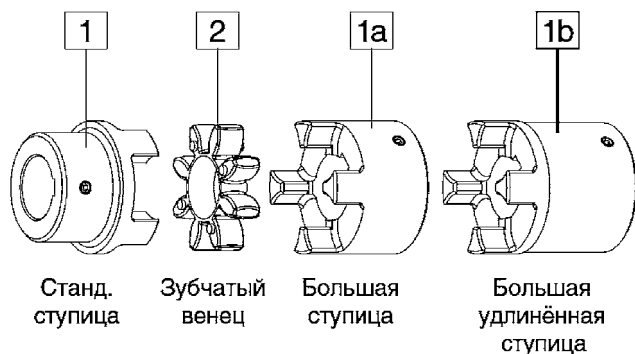


Рис. 1. Упругая муфта

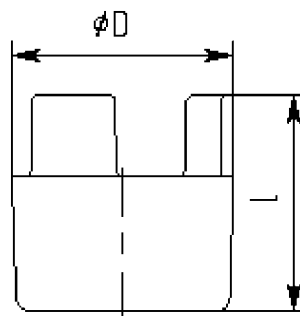


Рис. 2. Габаритные размеры детали «Корпус муфты»

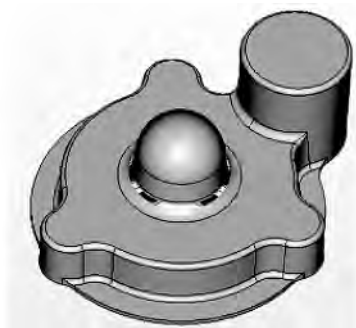
нагреты до температуры горячей либо полугорячей штамповки материала. Термин «изотермическая штамповка» относится к условиям выполнения технологической операции пластического деформирования, а не к состоянию деформируемого материала во время выполнения этой операции, т. к. из-за теплового эффекта пластической деформации и контактного трения температура заготовки во время деформирования будет повышаться и, соответственно, не будет оставаться постоянной. Благодаря отсутствию передачи тепла от заготовки в штамп не происходит остывания штампуемой детали, что даёт возможность деформирования с малыми скоростями деформации. Что в свою очередь позволяет добиться оптимальных термомеханических условий деформирования. Отмеченные преимущества процесса позволяют снизить припуски на последующую механическую обработку, уменьшить радиусы закруглений и штамповочные уклоны при проектировании поковки. Это приводит к снижению стоимости механической обработки и потерь металла.

Так как штампы нагревают приблизительно до той же температуры, что и заготовку, для их изготовления применяются теплостойкие стали либо жаропрочные стали и сплавы. Например, при изотермической штамповке алюминиевых сплавов рабочий инструмент изготавливают из теплостойких сталей марок 5XНВ (5XНМ), 4X5 В2 ФС и др.

В данной статье описывается разработка технологии изготовления детали «Корпус муфты» методом изотермической штамповки. А также возможность применения компьютерного моделирования для разработки и исследования технологий изготовления деталей из алюминиевых сплавов методом горячей изотермической штамповки. Компьютерное моделирование изотермической штамповки детали «Корпус муфты» было выполнено с помощью системы QFORM-2D/3D (ООО «КванторФорм», г. Москва).

Система QFORM основывается на теории течения; независимыми переменными при этом являются компоненты вектора скорости и нормальное напряжение. Материал заготовки представляется как жестко-вязко-пластическая среда. При этом считается, что материал несжимаемый, изотропный, а упругие деформации малы, и ими пренебрегают. Сопротивление деформации деформируемого материала рассматривается как функция трех переменных: накопленной деформации, скорости деформации и температуры. В качестве модели контактного трения используется модель трения, предложенная А. Н. Левановым.

При корректном задании исходных данных для расчёта использование системы QFORM позволяет на начальном этапе выявить возможные дефекты разрабатываемой технологии. Так, например, при моделировании процесса изотермической штамповки детали «Крышка», изготавливаемой из алюминиевого сплава АМг6, было обнаружено возникновение дефекта в виде внутренней утяжины (прострела) (рис. 3) [1]. Образование утяжины связано с неравномерным течением металла в очаге деформации. В тот момент, когда центральная полость пуансона заполнена материалом, начинается интенсивное течение металла из под пуансона в боковой отросток. Это приводит к тому, что на поверхности поковки, прилегающей к радиусу закругления пуансона формируется прострел.



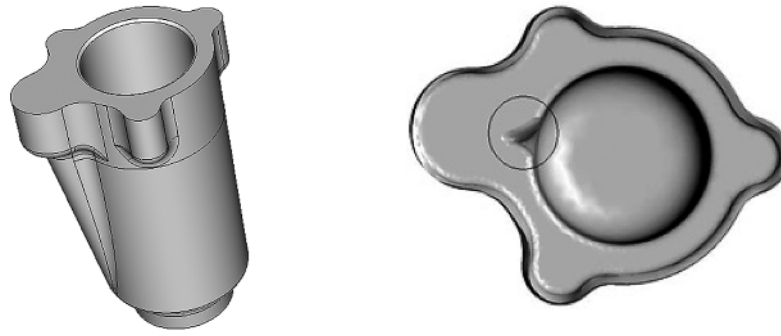
а) Деталь «Крышка»



б) Моделируемый дефект

Рис. 3. Моделирование изотермической штамповки детали «Крышка»

При моделировании изотермической штамповки детали «Корпус», изготавливаемой из алюминиевого сплава АК4–1, был выявлен дефект, показанный на рисунке 5 [1].



а) Деталь «Корпус» б) Моделируемый дефект
Рис. 4. Моделирование изотермической штамповки детали «Корпус»

Как уже отмечалось выше, при моделировании технологии объёмной штамповки в любой программе основанной на методе конечных элементов (КЭ) необходимо правильно задать исходные данные для расчёта. Наиболее сложно корректно задать материал и данные по контактному трению. Данные по кривым текучести материала можно взять из специальных справочников, например из справочника П. Г. Микляева. Но, как показывает практика, справочных данных по кривым текучести материалов часто недостаточно для проведения моделирования технологического процесса с требуемой точностью.

В работах [1, 2] описывается метод получения экспериментальных кривых текучести, использование которых при постановке задач в программах основанных на методе КЭ обеспечивает корректный расчёт моделируемого процесса. Данный метод заключается в поэтапной корректировке кривых текучести, полученных по результатам испытаний методом сжатия цилиндрического образца.

1) Экспериментальные кривые текучести корректируются с учётом погрешности вызванной непостоянством скорости деформации в течение всего цикла нагружения. Для компенсации влияния отклонения текущей скорости деформации от ее номинального значения выполняется пересчет напряжения текучести по формуле:

$$\sigma'_i = \sigma_i \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{\text{экс}}}{\dot{\varepsilon}_i^{\text{ном}}} \right)^k, \quad (1)$$

где σ'_i – напряжение текучести, соответствующее значению скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i^{\text{экс}}$ в эксперименте; σ_i – напряжение текучести, соответствующее номинальному значению скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i^{\text{ном}}$; k – показатель скоростной чувствительности.

2) Далее выполняется корректировка с учетом влияния на напряжение текучести контактного трения по формуле:

$$\sigma_i^{\text{экс}} = \frac{\sigma'_i}{A}, \quad A = 1 + \frac{2m}{3\sqrt{3}} \frac{r_0}{h_0} \exp\left(-\frac{3\varepsilon_i}{2}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_i^{\text{экс}}$ – напряжение текучести, скорректированное на величину изменения сопротивления деформации вследствие действия контактного трения; m – показатель трения; r_0, h_0 – радиус и высота исходного (недеформированного) образца.

3) Из-за теплового эффекта пластической деформации температура материала при проведении испытаний повышается, что ведёт к заниженным значениям напряжения текучести, несоответствующим номинальной температуре испытаний. Поэтому необходимо сделать корректировку кривых текучести с учётом изменения температуры испытаний по формуле, предложенной С. Н. Курнаковым:

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp(\alpha(T_i - T_0)), \quad (3)$$

где σ_i – напряжение текучести при температуре T_i ; σ_0 – напряжение текучести при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент; T_i – температура образца, T_0 – номинальная температура испытаний.

4) Для учёта неизбежных погрешностей возникающих при проведении эксперимента выполняется корректировка кривых текучести методом постановки обратной задачи. Данный метод основан на сравнении экспериментальной диаграммы «сила деформирования»-«перемещение» с диаграммой силы, полученной при моделиро-

вании эксперимента в программе основанной на методе КЭ, например, в системе QFORM. При этом расхождение расчётных значений силы деформирования от экспериментальных не должно превышать 2,5% (рис. 5). Если расчётное значение силы деформирования отличается от экспериментального более чем на 2,5%, то в кривые текучести (уже скорректированными согласно пунктам 1, 2 и 3.), которыми задаётся исследуемый материал в используемой программе, вводится корректировка, после чего расчёт проводят заново. Корректировка кривых текучести делается до тех пор, пока не будет достигнуто вышеуказанное допустимое расхождение [2].

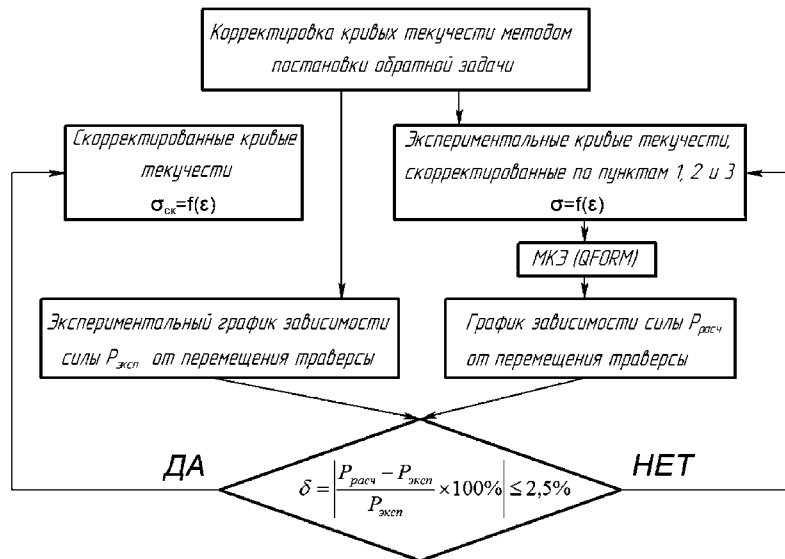


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая принцип метода постановки обратной задачи: δ – относительная погрешность расчётной диаграммы силы; $P_{расч}$ – сила деформирования по результатам расчёта в конечно-элементной программе; $P_{эсп}$ – сила деформирования, измеренная в опыте; σ – напряжение текучести, скорректированное по пунктам 1, 2 и 3; $\sigma_{ск}$ – напряжение текучести скорректированное по методу постановки обратной задачи; ϵ – накопленная деформация

Влияние внесённых в программу данных по кривым текучести материала на расчёт моделируемого технологического процесса можно показать, проведя сравнение графиков зависимости силы деформирования от перемещения инструмента. На рисунке 6 показан общий вид графика «сила деформирования»-«перемещение» при моделировании изотермической штамповки детали «Корпус муфты». Наибольшее расхождение расчётных значений силы деформирования при использовании разных кривых текучести штампуемого материала наблюдается на начальном этапе заполнения зубьев корпуса муфты (рис. 8). На рисунке 7 показано сравнение участков графиков сил, соответствующих моменту начала заполнения зубьев корпуса. Диаграмма 1 получена при расчёте по кривым текучести взятым из справочника П. Г. Микляева [5]. Диаграммы 2 и 3 – при расчёте по кривым текучести, полученным по вышеописанной методике.

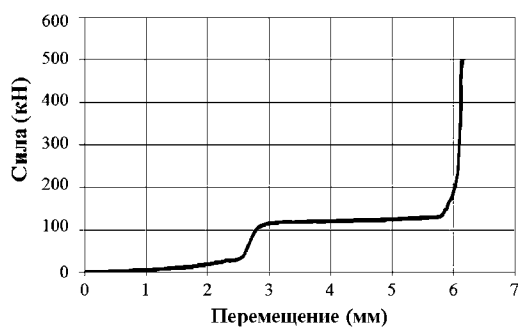


Рис. 6. График силы

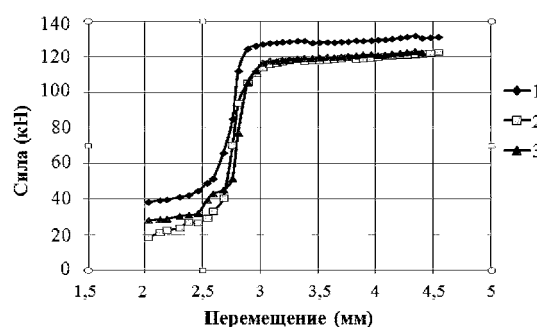


Рис. 7. Графики силы

При этом диаграмма 2 получена при расчёте по кривым текучести скорректированным только по пунктам 1, 2 и 3, а диаграмма 3 – по кривым текучести скорректированным, в том числе, и по пункту 4 (методом постановки обратной задачи).



Рис. 8. Заполнение гравюры штампа

При вводе исходных данных для расчёта в программах моделирующих технологические процессы объёмной штамповки важно правильно задать трение между заготовкой и поверхностью инструмента, т. к. часто причиной расхождения результатов конечно-элементного моделирования и экспериментальных данных могут являться, неточности в описании показателя трения. В системе QFORM-2D/3D трение описывается моделью трения Леванова [3]:

$$\tau_k = m \left(1 - \exp(-1.25(\sigma_n / \sigma_{Т.К.})) \right) \frac{\sigma_{Т.К.}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где τ_k – контактное касательное напряжение; m – фактор трения; σ_n – нормальное напряжение на контактной поверхности; $\sigma_{Т.К.}$ – предел текучести приконтактного слоя.

Для определения фактора трения, входящего в модель трения Леванова, наиболее рационально использовать метод осадки кольцевых образцов. На свойства технологических смазок используемых при штамповке существенное влияние оказывает температура штамповки, поэтому необходимо проводить эксперименты для нескольких температур лежащих в диапазоне температур горячей штамповки исследуемого материала. Зная фактор трения технологической смазки при нескольких температурах можно определить аппроксимирующую функцию, которая будет представлять температурную зависимость вида $m = f(T_{деф})$. При этом зависимость фактора трения от температуры для различных смазок определяется применительно к конкретному материалу.

При моделировании процесса изотермической штамповки детали «Корпус муфты» в системе QFORM задавались кривые текучести сплава АД-35 (рис. 9) полученные по вышеописанной методике. Фактор трения задавался как функция от температуры деформации $m = f(T_{деф})$. Данные по температурной зависимости фактора трения были получены в ходе проведения эксперимента методом осадки кольцевого образца.

Технология изотермической штамповки корпуса муфты разрабатывалась для наиболее распространённой модификации детали. Чертёж холодной штамповки показан на рисунке 10. Напуски и допуски определялись по ГОСТ 7505–89.

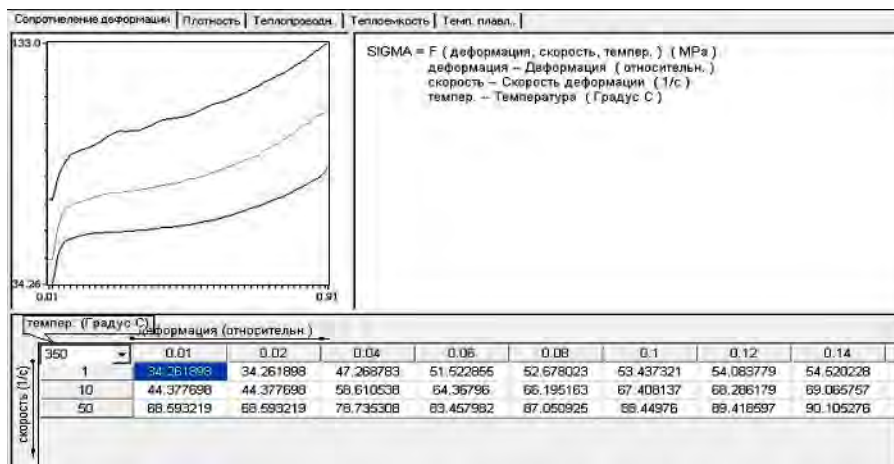
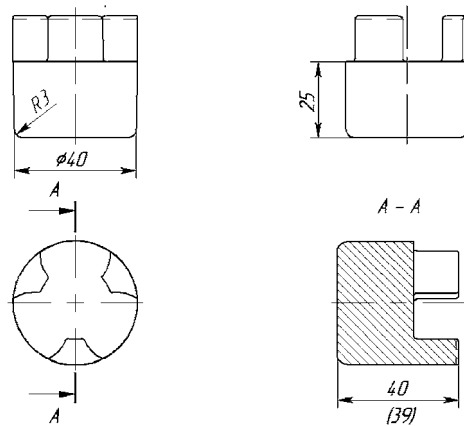


Рис. 9. Кривые текучести сплава АД-35, заданные в системе QFORM

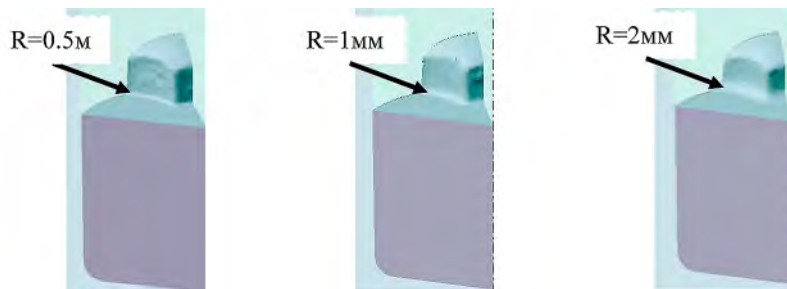


Не указанные радиусы скругления 1 мм

Штамповочные уклоны: внутренний 1°; наружные 1°.

Рис. 10. Чертёж холодной штамповки

При разработке технологии изотермической штамповки корпуса муфты исследовалось влияние величины радиуса скругления на переходе к зубу (рис. 11) на характер течения металла. Радиус принимался равным 0,5 мм, 1 мм и 2 мм. При этом во всех случаях отход металла от стенки штампа был незначительным и не приводил к образованию зажимов. Исходя из этого радиус скругления был принят равным 1 мм, что соответствует чистовому размеру детали.



а) Радиус скругления 0,5 мм б) Радиус скругления 1 мм в) Радиус скругления 2 мм

Рис. 11. Радиусы скругления при моделировании

Как показывает моделирование, при назначении уклонов на внешнюю поверхность зуба корпуса муфты металл выдавливается в зазор образующийся между матрицей и пуансоном, что приводит к недоштамповке детали (рис. 12). Исходя из этого, уклон на внешнюю поверхность зуба не назначается, а благодаря наличию в прессе нижнего выталкивателя не должно возникать проблем с извлечением штамповки из нижней полости штампа.



Рис. 12. Выдавливание металла в зазор между матрицей и пуансоном

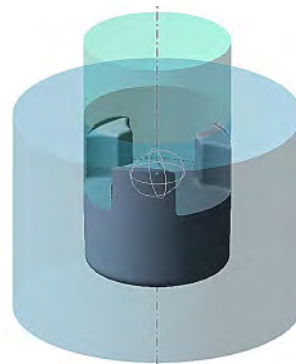


Рис. 13. Штамповка детали «Корпус муфты»

Дальнейшее моделирование показало, что заполнение всех полостей штампа происходит равномерно и без дефектов (рис. 13). Таким образом, по результатам моделирования, штомповка будет обеспечивать получение качественного изделия, что говорит о целесообразности применения технологии изотермической штамповки для изготовления детали «Корпус муфты».

Рентабельность изготовления детали методом изотермической штамповки заключается в возможности изготовления универсальной системы штамповых блоков со сменным инструментом и универсальную систему нагрева заготовки и инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров П. А. Разработка и исследование технологии точной штамповки деталей из алюминиевых сплавов на основе компьютерного моделирования. // Материалы третьей научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктуры и процессы деформирования. Металлдеформ-2009», 2009. Самара: СГАУ. Т2. – стр. 174–183.

2. Петров П. А., Дубинчин А. В. Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АМг6. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. № 1 (19), 2008. Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, стр. 145–150.

3. Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П., Картак Б. Р., Ашпур Ю. В., Спаский Ю. И. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

4. Данные взяты с сайта www.ktr.com

5. Микляев П. Г. Механические свойства лёгких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением. Справочник. М.: Металлургия, 1994. – 280 с

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ В МНОГООБЪЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Э. М. Голубчик, В. Е. Телегин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Современному металлургическому предприятию для поддержания высокого конкурентоспособного уровня изготавливаемой металлопродукции необходимо оперативно реагировать на быстро меняющиеся рыночные условия. Особенно это актуально для крупных предприятий, выпускающих широкий спектр продукции. Своевременное принятие как организационных, так и технологических решений в ответ на запросы и пожелания потребителей способствует достижению максимальной эффективности производства.

Наиболее проблемными с точки зрения адаптации являются технологии, обеспечивающие выпуск металлопродукции с глубокой степенью переработки (МГСП), к которой можно отнести, например, продукцию четвертого (лента, трубы) и пятого (метизы) переделов. Для предприятий черной металлургии, как правило, данные виды продукции, являются эксклюзивными и требования к ней, либо жестко нормируются различными стандартами, либо указываются потребителями в качестве дополнительных пожеланий. При массовом производстве с большим объемом размерно-марочного сортамента продукции, единым технологическим циклом и непрерывной загрузкой основного технологического оборудования зачастую возникает необходимость оперативной корректировки, как самой схемы производства, так и отдельных ее элементов, включая и элементы оборудования, т. е. на первый план выступает проблема именно технологической адаптации. Технологическую адаптацию в широком смысле можно определить, как процесс целенаправленного изменения структуры и параметров технологической системы для повышения эффективности ее функционирования [1]. Технологические системы изготовления МГСП, как правило, представляют собой многообъектные технологические системы (МОТС), под которыми в данном случае понимаются технологические схемы производства, представляющие собой либо иерархическую многоуровневую структуру, организованную по многопоточному или разделяющемуся принципам. Кроме того в МОТС включаются лица, принимающие решения (ЛПР), а также непосредственно потребитель (в виде набора предъявляемых требований к продукции). Причем, данные системы для обеспечения высокого уровня качества и повышения результативности производства при изменении внешнего или внутреннего воздействия должны быть настроены на возможность оперативного реагирования. Причем, возможные затраты на технологическую адаптацию к новым условиям должны быть минимизированы. Принятие решения о необходимости проведения процедур технологической адаптации может быть проиллюстрирована схемой, представленной на рис. 1.

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» является одной из крупнейших сталелитейных компаний в области черной металлургии. Характерными примерами МОТС в условиях ОАО «ММК» являются технологические системы изготовления стальной холоднокатаной ленты, холодногнутого профиля, металлопроката с покрытием (горячеоцинкованным и полимерным), производство жести.

Рассмотрим возможности применения адаптационных механизмов на примере изготовления холоднокатаной ленты в условиях ОАО «ММК». Укрупненно технологическую систему «производство холоднокатаной ленты» можно представить следующим набором основных операций [2]:

- продольный роспуск широкого горячекатаного подката на полосы меньшей ширины в линии агрегата укрупнения и продольного роспуска (АУР);
- травление подката в линии НТА;

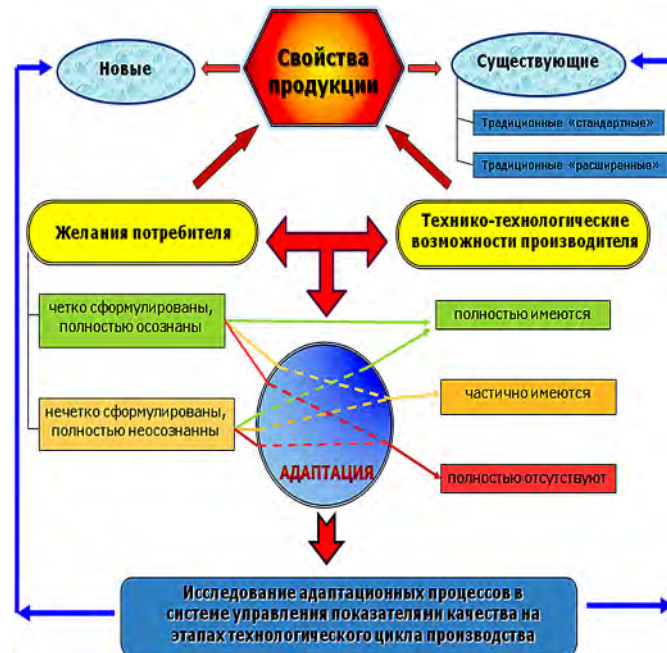


Рис. 1. Схема к вариантам принятия решения о применимости технологической адаптации

- холодная прокатка на пятиклетевом стане «630» на заданную толщину;
- рекристаллизационный отжиг холоднокатаного проката в колпаковых печах;
- дрессировка отожженного проката;
- продольный роспуск холоднокатаной полосы на заказные ширины в линии агрегатов продольной резки (АПР).

При этом приведенная технологическая схема является «традиционной» для цехов холодной прокатки. В тоже время, возможна многовариатность технологического процесса производства одного и того же вида ленты в зависимости от требований и пожеланий потребителя. Причем, внутри одного варианта, включая «традиционную» схему, в свою очередь, также возможна многоуровневость технологии. Например, добавление предварительной, либо промежуточной термообработки, двойной или тройной прокатки и т.д. Наличие возможной вариабельности процесса, приводит к ситуации, когда от лица, принимающего решение по способу организации технологической схемы в выбранной МОТС, зачастую зависит успешность в достижении требуемой результативности и эффективности производства, способности предприятия в целом обеспечить выполнение принятого заказа. В таких условиях для исключения возможных ошибок и выбора наиболее рациональной технологической схемы в МОТС и необходима разработка модели технологической адаптации.

Используя системный подход и аппарат теории технических систем, МОТС, так же как и произведенную в ней продукцию, можно описать системой целей, которая проявляется через свойства, присущие данной системе (объекту) [3]. Свойством является всякий существенный признак объекта. Обобщенная оценка свойств приводит к понятию качества, которое можно сформулировать как «совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением» [4]. То есть, обеспечение качества подразумевает реализацию системы целей. В таком случае всякая МОТС может быть определена как система преобразований (вещества, энергии и информации) или операнд O_d . Так как операнд находится в системе преобразований, то его состояние определяется через вектор свойств. При этом, операнд имеет начальное состояние (начальные свойства) O_d^0 , промежуточное состояние O_d^i и конечное состояние O_d^n . Для удовлетворения соответствующей потребности задается необходимое состояние операнда O_d^n , которое является целью преобразований. Изменение $O_d^0 \Rightarrow O_d^n$ называется преобразованием, которое реализуется в процессе технологии. В результате преобразований операнд изменяет вектор свойств E_j^i . Так в рассматриваемой в качестве примера МОТС

«производство холоднокатаной стальной ленты» ее уровень качества определяется совокупностью показателей механических свойств, геометрических параметров, характеристик поверхности и структуры, то вектор свойств может быть представлен как:

$$O_d^n = \begin{pmatrix} A_i^j \\ B_i^j \\ C_i^j \\ D_i^j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где A_j^i – вектор механических свойств, B_j^i – вектор геометрических параметров, C_j^i – вектор характеристик поверхности, D_j^i – вектор характеристик структуры.

Для разработки модели технологической адаптации, на примере рассматриваемой МОТС был проведен комплекс исследований по изменчивости механических свойств по ширине полосы в рулоне ленты в зависимости от изменения структуры технологического процесса [2]. В общем виде изменчивость параметров холоднокатаной ленты можно выразить следующим образом:

$$X = X_1 + X_2 + X_3, \quad (2)$$

где X_1 – изменчивость свойств по ширине ленты в МОТС, X_2 – изменчивость свойств по длине ленты в МОТС, X_3 – естественная изменчивость.

Под «естественной» понимается изменчивость в результате влияния конкретных технологических факторов в рамках данной технологической операции. указанная характеристика способствует определению допустимых интервалов уровней механических свойств на каждом переделе МОТС. Сравнение текущего диапазона механических свойств с заданным и последующие адаптационные действия преследуют цели конечного соответствия продукции требованиям (ожиданиям) потребителя. Корректировка функционирования всей МОТС – есть ответ на изменяющиеся условия внешней среды, которыми является несоответствие текущих и заданных параметров по определенной причине. Дополнительным «раздражителем» МОТС, требующим проведения технологической адаптации, являются изменяющиеся требования потребителя. При этом адаптация деятельности технологической системы может быть выражена следующим образом:

$$O_d^0 = O_d^n \times T \times K, \quad (3)$$

где T – «традиционная» технология, K – коэффициент технологической адаптации.

В рассматриваемой работе K – интегральный показатель, отражающий совокупность возможных направлений деятельности по преобразованию операнда в случае необходимости применения определенной технологической адаптации.

Для обеспечения оперативной технологической адаптации необходимо установление границ допустимых диапазонов разброса свойств, а также выявление зависимостей для конкретных показателей.

На примере рассматриваемой МОТС было определено поле изменчивости механических свойств холоднокатаной ленты из низкоуглеродистых марок стали, производимой в цехе углеродистой ленты ОАО «ММК». Данные исследования позволили разработать адаптационную модель изготовления ленты, а также определить наиболее рациональную технологическую схему для производства ленты под монетную заготовку для новых десятирублевых монет России, требования к которой отличаются очень узким диапазоном труднодостижимых как геометрических, механических свойств, а также жестко нормируемыми показателями шероховатости поверхности.

Кроме того, предложенный выше подход позволил определить наиболее рациональные технологические схемы при изготовления холодногнутого профиля из новых для ОАО «ММК» марок стали повышенной прочности по требованиям евро-норм [5]. При этом МОТС «производство холодногнутого профиля» включало в себя как саму схему производства, так и разработку системы калибровок. Был разработан адаптационный механизм реализации процесса, учитывающий свойства горячекатаного подката, особенности валковой формовки в условиях поштучного профили-

рования, а также настройку технологической системы на возможность оперативного изменения под действием внешних факторов.

Применение разработанных принципов технологической адаптации в условиях многообъектных технологических систем позволяют максимально эффективно и быстро реагировать на постоянно изменяющиеся рыночные условия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.М. Голубчик, Е.Б. Яковлева, В.Е. Телегин и др. Повышение результативности производства холоднокатаной упаковочной ленты из стали марки 30 Г2 путем применения адаптационных механизмов. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С. 62–66.

2. Э.М. Голубчик, В.Е. Телегин. Исследование изменчивости механических свойств при производстве стальной холоднокатаной ленты // «Цветные металлы 2010». Сб. докл. II междунар. конгресса в составе XVI междунар. конф. «Алюминий Сибири», IV конф. «Металлургия цветных и редких металлов», VI симпозиума. «Золото Сибири». Красноярск: СФУ, ООО «Версо». 2010. С. 613–616.

3. Хубка В. Теория технических систем. М.: Мир, 1987. 208 с.

4. ГОСТ 15467 «Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения».

5. Голубчик Э.М., Щуров Г.В., Архандеев А.В.. Управление качеством при изготовлении гнутых профилей для мостостроения в ОАО «ММК» // Сталь. 2009. № 10. С. 46.

ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ НА КАЧЕСТВО СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

М.В. Чукин¹, И.В. Ситников², Н.В. Копцева¹, М.А. Полякова¹

¹ ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

² ООО «ЗМИ-Профит», г. Магнитогорск, Россия

Современный этап стабильного функционирования и развития многих отраслей промышленности требует производства композиционных слоистых материалов, сочетающих в себе высокие электропроводные и прочностные свойства. Наибольшее и все возрастающее применение находит сталемедная проволока, как класс слоистых композиционных материалов. Она используется в качестве проводниковых и силовых элементов подвески контактной сети электрифицированных железных дорог, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, выводов радиодеталей и компонентов электронной техники. При этом к сталемедной биметаллической проволоке предъявляются все более жесткие требования по качеству, особенно при применении в изделиях, предназначенных для оборонной промышленности и авиации. Обобщая требования действующей нормативной документации к показателям качества сталемедной проволоки, структуру качества данного вида продукции можно изобразить в виде схемы, приведенной на рис. 1.



Рис. 1. Структура качества сталемедной проволоки

На основе научных разработок, проводившихся в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова (МГМИ) в 1983–1999 гг. [1, 2] и на предприятии ООО «ЗМИ-Профит» (г. Магнитогорск) была разработана и пущена в эксплуатацию линия по производству сталемедной катанки. Технологические возможности этой линии позволяют получать сталемедную катанку с массовым содержанием меди от 20 до 70%, используемую в качестве заготовки при производстве проволоки различных марок и неизолированных проводов. Изготовление сталемедной катанки осуществляется на технологической линии, состоящей из формовочного и прокатного станков. Общая схема технологического процесса и состав оборудования комплексной линии представлены на рис. 2. Реализация данного технологического процесса в условиях ООО «ЗМИ-Профит» позволила обеспечить производство биметаллической катанки с достаточно высокими показателями качества.

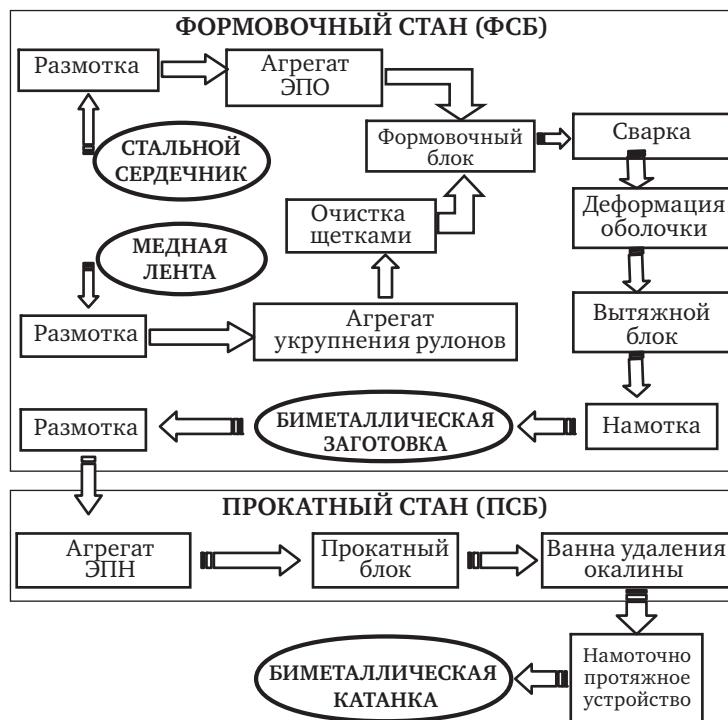


Рис. 2. Схема технологического процесса производства сталемедной катанки в условиях ООО «ЗМИ-Профит»

Одной из важных технологических задач является обеспечение высокой прочности сцепления компонентов биметалла. Эти параметры во многом зависят от структуры и свойств исходных компонентов. Поэтому целью данной работы явилось проведение комплекса металлографических исследований медной ленты и стального сердечника, используемых в качестве исходных компонентов для производства сталемедной проволоки в ООО «ЗМИ-Профит». Была исследована медная лента различных партий К-529, К-977, К-189 и М-282 различных отечественных производителей и стальная катанка из стали Ст3 пс и Сталь 10.

Методика исследования. Изготавливались микрошлифы, которые исследовались на металлографическом микроскопе с использованием системы компьютерного анализа изображений SIAMS. С помощью цифровой видеокамеры изображение микроструктуры вводилось в компьютер и затем анализировалось с использованием специализированных программ. Применяемые методики адаптированы в соответствии с требованиями стандартов. С помощью системы SIAMS выполнялся также количественный анализ: анализ размеров пор; определение величины зерна; определение соотношения структурных составляющих. Пористость и наличие неметаллических включений исследовалось на нетравленных шлифах, при этом с помощью специальных приемов устанавливали, является ли данный структурный элемент порой или неметаллическим включением. Микроструктура исследовалась на травленных шлифах, при этом в соответствии с целью исследования подбирали необходимые реактивы-травители.

Поскольку в ходе технологического процесса производства биметаллической проволоки заготовка испытывает значительную пластическую деформацию, то исходная медная лента должна иметь высокую пластичность. Известно, что на пластичность меди наиболее сильно влияют межзеренные прослойки из легкоплавких эвтектик ($T_{пл} = 327$ и 270 °С), которые образуют с медью *Pb* и *Bi* практически при любом их содержании (даже в тысячных долях %). (Хрупкие неметаллические соединения Cu_2S , Cu_2O и CuO , также располагающиеся в виде эвтектик по границам зерен, при небольшом содержании *S* и *O* практически не влияют на горячую обработку). Поэтому необходимо выявить наличие или отсутствие охрупчивающих включений в меди. Была исследована медная заготовка партии К-529. Прокатка заготовки с медной оболочкой из этой партии прошла стабильно. Пористость медной оболочки практически отсут-

ствуется, очень редко встречаются неметаллические частицы. Наблюдаемые точечные включения, располагающиеся в виде строчек, видимо являются оксидными включениями (рис. 3, а), которые при пластической деформации располагаются по границам сильно вытянутых зерен меди, образуя строчечную структуру. При травлении выявляется структура типичная для холоднодеформированной и отожженной меди: наблюдаются зерна меди, имеющие характерное двойниковое строение. Рекристаллизация, очевидно, была неполной, т.к. видны участки деформированной структуры (рис. 3, б). Балл рекристаллизованного зерна соответствует примерно № 6–7.

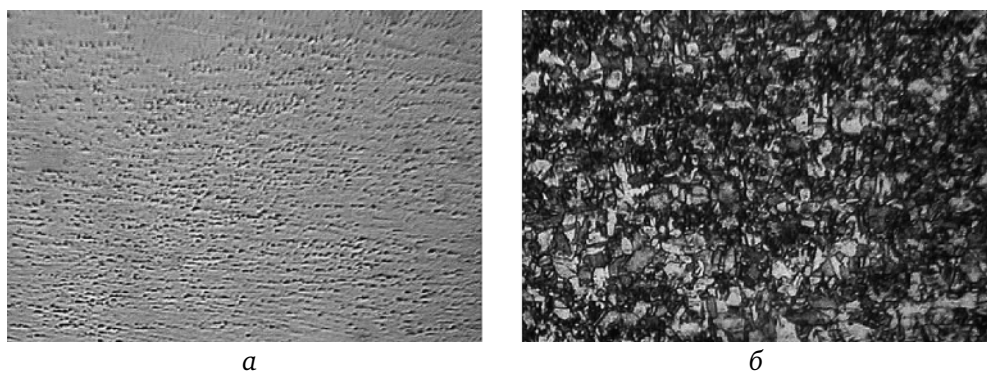


Рис. 3. Микроструктура медной заготовки:

а – нетравленный шлиф, б – травление в концентрированной HNO_3

Известно, что причиной охрупчивания при нагреве меди может стать водородная болезнь, при которой водород взаимодействует с закисью меди (в кислородосодержащей меди) или с атомарным кислородом, сегрегированным на границах зерен при содержании $\leq 0,001\% \text{O}_2$, при котором он не обнаруживается металлографически, т.к. весь находится в твердом растворе. (При нагреве бескислородной меди в окислительной атмосфере может происходить диффузия кислорода внутрь в количествах, также вызывающих водородную болезнь до определенной глубины). Выделяющиеся пары воды создают высокие давления, приводящие к образованию несплошностей по границам зерен и пустотам (порам) в теле зерна. Эти несплошности развиваются в трещины, что особенно сильно проявляется при горячей обработке давлением. Поэтому следующим этапом исследований явилось изучение пористости медной оболочки на различных технологических операциях.

При оценке пористости проводились замеры по 10 полям зрения, которые охватывали практически все сечение медной оболочки. Результаты исследования в виде фотографий микроструктуры и гистограммы распределения пор по размерам представляются в методиках системы SIAMS в виде протоколов.

Анализ полученных результатов (рис. 4) свидетельствует, что пористость в разных партиях продукции несколько различается. Однозначной корреляции с качеством заготовки выявить не удалось.

Например, пористость медной оболочки образцов, которые соответствовали лучшему качеству заготовки (партии К-529, К-977) была практически такая же, как пористость в заготовке, прокатка которых шла нестабильно, с наличием «усов» в получаемом полупродукте (К-189). Однако, при худшем качестве заготовки пористость медной оболочки была больше, например, в медной оболочке партии М-282, при использовании которой на последующих операциях технологического процесса наблюдалось отслоение меди от стального сердечника.

Другим фактором, влияющим на механические свойства (при нагреве деформированной меди), является величина зерна рекристаллизованной меди (температура начала рекристаллизации $200\text{--}230^\circ\text{C}$). Разупрочнение начинается уже при нагреве выше 150°C . При температуре выше оптимальной (выше $500\text{--}600^\circ\text{C}$) сильно уменьшается относительное удлинение меди из-за роста зерна и образования текстуры рекристаллизации (которая к тому же приводит к анизотропии свойств). Поэтому необходимо провести исследование структуры и свойств после операций формовки и прокатки.

Была проанализирована структура медной оболочки заготовки партии К-529, прокатка которой прошла стабильно. На границе контакта меди со стальным сердеч-

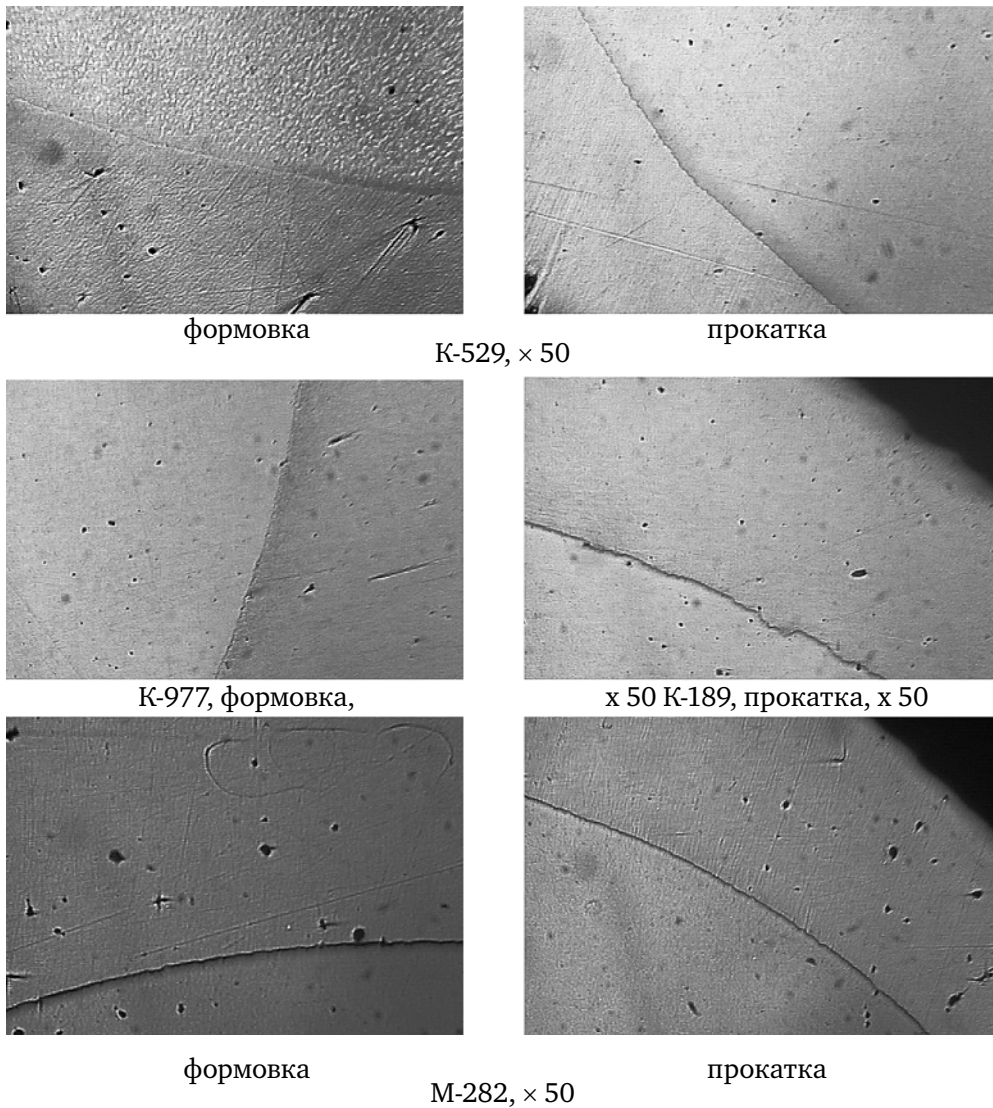


Рис. 4. Пористость медной оболочки

ником диффузионных слоев не наблюдаются (рис. 5, а). Граница контакта гладкая, с одинаковым строением. Структура меди после формовки практически такая же, как в исходной заготовке. Резкие отличия в структуре наблюдаются в области сварного шва, для которой характерно наличие зон термического влияния. Для этих зон характерно увеличение размеров зерна, выросшего в результате термического воздействия сварочного тепла.

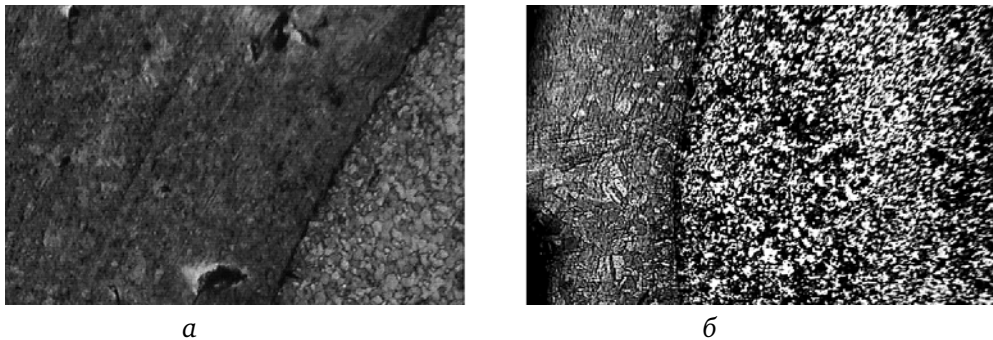


Рис. 5. Медная оболочка партии К-529, травление в реактиве Марбле, x126:
а – после формовки; б – после прокатки

Структура медной оболочки после прокатки характеризуется наличием областей, величина зерна в которых резко отличается (рис. 5, б). Наблюдаются участки,

симметрично расположенные относительно центра заготовки, в которых происходит значительное увеличение размеров зерна. Эти участки чередуются с участками с более мелким зерном.

Микроструктура медной оболочки других партий биметаллической заготовки после операций формовки и прокатки имеет аналогичное строение. Однако, в отличие от заготовки партии К-529 в заготовке партии М-282 наблюдается худшее сцепление медной оболочки со стальным сердечником (отслоение) уже на стадии формовки (рис. 6). При этом на границе контакта со сварным швом медной оболочки в сердечнике из стали марки Ст3 пс наблюдается обезуглероженный слой толщиной от 61 до 204 мкм.

Хорошо известно, что сцепление (прочное соединение) разнородных металлов во многом определяется типом кристаллических решеток соединяемых металлов. При образовании биметаллического соединения медь-сталь при прокатке нагретой заготовки надо, очевидно учитывать фазовый состав стального сердечника, находящегося в контакте с медью, имеющей ГЦК-решетку. Используемые в качестве стального сердечника марки стали Ст3 пс, 10 являются доэвтектоидными. В этих сталях в зависимости от температуры нагрева марок количественное соотношение фаз: аустенита (с ГЦК-решеткой) и феррита (с ОЦК-решеткой) при нагреве в межкритическом интервале температур $A_{C1} - A_{C3}$ меняется. При повышении температуры количество феррита уменьшается, а количество аустенита – увеличивается.

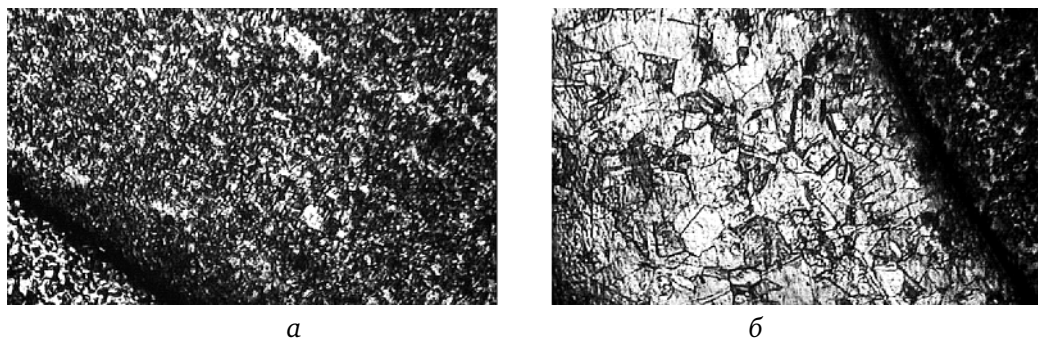


Рис. 6. Медная оболочка партии М-282, травление в концентрированной азотной кислоте, х 126: а – формовка, б – прокатка

Однофазное состояние с решеткой ГЦК, т. е. аустенитное состояние может быть достигнуто только при нагреве стали выше температуры A_{C3} , которая для данных сталей находится в пределах 865–885 °С. При скоростях нагрева, используемых при прокатке сталемедной заготовки, температура A_{C3} смещается в область еще более высоких температур. Поэтому резонно сделать предположение, что степень прогрева приграничного поверхностного слоя стального сердечника и тип решетки преобладающей фазы могут влиять на прочность соединения на контактной границе сталь-медь.

Были исследованы контактные поверхности снятых медных оболочек и сердечников заготовок различных партий. В ряде случаев на поверхностях обнаруживались посторонние вещества, которые можно предположительно отнести либо к окислам меди, либо к остаткам моющих растворов, затекших под оболочку. Однако в ряде случаев наблюдались совершенно чистые поверхности меди, что заставляет также искать возможную причину плохого сцепления особенностях строения и поведения стального сердечника.

В ходе проведенных исследований микроструктуры стального сердечника были получены следующие результаты.

Наличие на поверхности стального сердечника обезуглероженного ферритного слоя приводит к ухудшению прочности сцепления компонентов.

Уменьшение скорости прокатки, обеспечившее устранение «уса», сопровождается очевидными изменениями структуры стального сердечника, в то время, как заметных изменений структуры медной оболочки не наблюдается.

Диффузионных слоев на границе контакта меди со стальным сердечником не образуется, что является благоприятным фактором для «обновления» контактирующих

поверхностей при совместной пластической деформации биметаллической заготовки на дальнейших операциях технологического процесса.

Таким образом, решение проблем повышения качества сталемедной продукции на базе развития и совершенствования технических и технологических параметров групп управления качеством, является важной и актуальной научно-технической задачей. Стабильность достижения высоких прочностных и пластических показателей сталемедной продукции позволит не только увеличить экономическую эффективность и результативность производства биметаллов отдельного предприятия, но и улучшить эксплуатационные показатели всей сталемедной продукции, оказывать положительное влияние на развитие экономики региона и всей страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новая технология производства биметаллов соединением компонентов при прокатке в калибрах. Стеблянко В.Л., Бухиник Г.В., Ситников И.В. и др.//Материалы Всесоюзн. науч.-техн. конф. – Челябинск, 1989. – 156 с.
2. Разработка и освоение опытно-промышленной линии производства сталемедной заготовки. Стеблянко В.Л., Ситников И.В., Щербо Ю.А. и др.//Новые технологии получения слоистых материалов и композиционных покрытий: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Сочи, 1992. – С. 11.