

Ю.С. СТАРОСТИН

**ИННОВАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ
ПРЕССОВАНИЯ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА"

Ю.С. СТАРОСТИН

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПРЕССОВАНИЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.777:669.295:771
ББК 34.3
С773



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: чл.-кор. РАН, д-р. техн. наук, проф. В. А. Барвинок,
канд. техн. наук, проф. С. А. Привалов

Старостин Ю.С.
С773 **Инновационные технологии на основе прессования:** учеб.
пособие / Ю.С. Старостин – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм.
ун-та, 2007. – 64 с.: 53 ил.

ISBN 978-5-7883-0631-5

Представлены инновационные технологии, основанные на способе прессования в широком смысле, т.е. на условии формирования изделий под действием высокого давления: экструдирование; изостатическое прессование; "прокатка – прессование"; гидромеханическое выдавливание и др. процессы, представляющие реальный интерес для инвестирования. Показаны преимущества инновационных предложений по отношению к существующим технологиям. Указана необходимость учета эволюции технологий при выборе или разработке новых процессов. На основе анализа, произведенного мировыми центрами технологий, даны прогнозы развития важнейших инновационных идей на 25-30 лет вперед. В пособии приводятся также опубликованные в литературе материалы по методам получения наноструктурного состояния металлов: равноканальному угловому прессованию; прессованию через матрицу типа "песочные часы" и другим. Приведено объяснение механизма появления наноструктуры при холодной пластической деформации.

Пособие предназначено для студентов старших курсов и дипломников, обучающихся по специальности "Обработка металлов давлением" и "Машины и технология обработки металлов давлением"

УДК 621.777:669.295:771
ББК 34.3

ISBN 978-5-7883-0631-5

© Старостин Ю.С., 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

Оглавление

Предисловие.....	4
1 Эволюция технологий, комплексный подход	5
2 Основные сведения о прессовании	9
2.1 Сущность процесса	9
2.2 Разновидности процесса	9
2.3 Сортамент прессуемых изделий.....	10
2.4 Классификация способов прессования.....	11
3 Развитие традиционных технологий на основе прессования	12
4 Реально перспективные технологии	14
5 Гидропрессование металла.....	15
5.1 Прямое гидропрессование	15
5.2 Гидромеханическое прессование	17
5.3 Горячее гидродинамическое выдавливание (ГТДВ)	18
6 Прессование изделий из алюминиевых сплавов в оптимальных условиях.....	19
7 Прессование с активным трением.....	21
8 Конформ-процесс (КНФ).....	21
9 Экструзионный процесс (ЭКСП).....	23
10 Прессование изделий из особо прочных алюминиевых сплавов	25
10.1 Получение сплавов нового поколения высокоскоростной кристаллизацией	25
10.2 Технология получения изделий	27
11 Изостатическое прессование	28
12 Прессование титановых сплавов.....	35
12.1 Особенности и инновационность проблемы.....	35
12.2 Титановые сплавы как материал для прессования	36
12.3 Объекты инновационной привлекательности в технологии производства титановых профилей.....	38
12.3.1 Толстостенные профили и панели	38
12.3.2 Тонкостенные профили.....	39
12.3.3 Полые и петельные профили.....	41
13 Производство биметаллов	43
13.1 Плакирование прессованием	43
13.2 Изготовление биметаллических изделий радиальным пульсирующим обжатием	45
13.3 Получение биметаллических изделий изостатической диффузионной сваркой	47
14 Получение композиционных материалов.....	49
15 Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией (ИПД), обеспечивающие получение наноструктуры	51
Заключение	60
Список литературы.....	62

Предисловие

Данное пособие предназначается для первичного ознакомления студентов с новыми направлениями в области обработки металлов давлением. Выпускник вуза должен усвоить базовые принципы и методики своей специальности, но, кроме того, уже со студенческой скамьи знать о тенденциях и разветвлениях различных технологий, которые могут стать прорывными, эффективными направлениями в ближайшем будущем.

Знакомство с такими идеями порождает в голове ищущего молодого человека мысли о возможной рационализации недоработанных предложений. Часто эти устремления духа оканчиваются решением задачи, что не только приносит удовлетворение творцу, но и, возможно, продвигает отрасль существенно вперед. Сказанному очень много исторических примеров: в реализации крупных изобретательских задач самые оригинальные решения находили не только маститые ученые, но и "дилетанты", либо молодые неопытные люди, только приступившие к работе, поскольку они, не опасаясь тупиков и сомнений, известных специалистам, высказывали свежий, непредвзятый взгляд на решение. И этот взгляд, после некоторой доработки, оказывался правильным, приводящим к работоспособной конструкции.

Ростислав Алексеев будучи студентом уверовал в возможность постройки судна на подводных крыльях, способного двигаться по воде в 5-10 раз быстрее обычного корабля. Выполняя курсовой, а затем дипломный проект на избранную тему, он на уровне своих студенческих знаний доказывал, что эта идея реализуема. Однако известные профессора и академики, рассматривавшие проект, с богатством своих академических знаний легко доказывали, что это не больше, чем игра фантазии, и аналогии с самолетом здесь быть не может. Когда началась Великая Отечественная война и потребовались быстроходные суда, власти сами нашли автора студенческого проекта, дали ему средства и помощников, заставили работать над реализацией "фантазии", – в результате появились скоростные катера, а затем и корабли типа "Комета" на подводных крыльях.

Сейчас суда на подводных крыльях и на воздушной подушке бороздят водные просторы со скоростью 100-150 км/ч. А в развитие этих технических направлений появились экранолеты ("летающие платформы"), раз-

вигающие скорость до 600 км/ч, для которых, что вода, что болото, что пески – все "одно и то же" – опорная экранирующая поверхность, над которой можно лететь и перевозить людей и грузы. Вот это и есть сбывшаяся "высокая фантазия", начавшаяся с углубленной мысли студента Р. Алексеева: "А почему бы не поднять корабль на подводные крылья?!".

Современное производство в области авиационной металлургии может показаться значительно приземленной. Но это только на первый взгляд. Когда мощная идея овладевает инженерами-творцами, она возносит их над обыденностью и, порождая лавину изобретений, приводит к плодотворным, долго живущим, техническим решениям, реализуемым в новых процессах, технологиях и оборудовании.

Так, научные предпосылки чл.-кор. АН СССР И.М. Павлова, высказанные еще в 40-х годах, о том, что обычно мешающее при прессовании трение можно сделать активным, помогающим делу, так и оставалось бы "умствованием" ученого-оригинала, если бы инженеры-энтузиасты молодые специалисты В.Л. Бережной и В.Н. Щерба не взялись исследовать явление в натуре. Они, преодолевая сотни преград, добились создания мощного, не имеющего аналогов пресса; доказали, что "прессование с активным трением" дает блестящие результаты и позволяет управлять созданием структуры изделия, улучшая свойства полуфабриката. Оба защитили докторские диссертации – настолько обширна эта тематика. Но самое главное: в багаж мировых знаний и производств внесен существенный вклад, породивший новое направление в технике.

Подобного восхищения также достойна идея технологии изготовления панелей – тонких широких листов с продольными на всю длину элементами жесткости (стрингерами). "Как отпрессовать панель, ширина которой больше, чем диаметр контейнера, из которого ее прессуют?". Действительно: "Как?". Но молодые русские и американские инженеры-творцы независимо друг от друга в середине 50-х годов нашли решение: прессовать в виде трубы с ребрами, а затем разрезать вдоль и развернуть. В результате было развито целое новое направление в обработке металлов давлением – производство широких панелей. На основе технологической базы по производству прочных и надежных цельных панелей стали реально возможными новые конструкции летательных аппаратов. Были разработаны и изготовлены легкие, быстроходные и экономичные морские и речные суда новых классов.

1 Эволюция технологий, комплексный подход

Динамизм современной авиационно-космической техники требует от специалистов не просто отслеживания новых технических решений в области обработки металлов, обеспечивающих реальное воплощение этой техники, но требует комплексного подхода с учетом эволюции техноло-

гий. Только такое отношение к технологиям обработки металлов давлением позволит обеспечить выполнение задач конкурентоспособности в мировом производстве и в освоении космоса.

Если решение технической проблемы традиционно ищут, опираясь на какую-либо техническую систему (т.е. на создаваемую машину или процесс), то комплексный подход предполагает ориентацию на более широкое понятие – выдвигаемую проблему. **Комплексный подход** – это проблемно-ориентированная задача.

Поскольку даже осознанная проблема не является материальным субстратом, исполнитель неизбежно сталкивается с необходимостью виртуального (т.е. мысленного, нематериального) проектирования технологий, которых пока нет. Полученные фантазией связи технологий должны быть затем предельно жестко проанализированы. Только так можно добиться инвестиций в опытную реализацию технических решений, а затем и в технологию как систему.

В глобальном плане разработка технологий как объектов продаж очень выгодна. По сообщениям специалистов по глобализации все мировое производство базируется на 34 макротехнологиях, включающих около 20 тыс. микротехнологий. Доля России на рынке наукоемких технологий составляет 0,3%, США – 36%, Японии – 30%. В год США продают новых технологий примерно на 30 млрд. долларов, а закупают на 10 млрд. долларов. Поэтому для осуществления технологического прорыва наши выпускники должны тщательно изучать перспективные направления в обработке металлов давлением, т.к. именно на их плечи ложится задача такого прорыва, а конкретно ее выполнение возможно на перечисленных направлениях развития.

Вместе с тем молодому специалисту необходимо понимать, что от найденных технических решений до технологии – длинный путь, связанный с разрешением производственных и организационных вопросов.

Технологическая система, вобравшая в себя в качестве основы техническое решение, – это сложная упорядоченная целостность множества процессов и отношений, носителями которых являются превращаемые вещества, энергия, машины и персонал.

Общественное производство – всегда является расширенным воспроизводством. Поэтому любое перспективное направление в области технологии со временем теряет свою эффективность, тормозится конкурирующими явлениями. Период эффективности новшеств составляет 30-40 лет. Поэтому, внедряя инновационный процесс, необходимо (желательно!) сразу заглядывать дальше вперед, чтобы узнать, какие тенденции развития намечаются у рассматриваемых процессов на общем фоне развития.

Сегодня во многих отраслях наблюдается интенсивное развитие исследований в области "нанотехнологий". В металлургическом производ-

стве это является реакцией на состояние, близкое к исчерпыванию возможностей создания требуемых свойств у сплавов традиционными методами. Наноструктуры перспективны, хотя до последнего времени нет публикаций о промышленном выпуске изделий с достоинствами свойств, присущих наноструктуре. Приближение к достоинствам материалов со свойствами наноструктурного состояния просматривается при выпуске промышленных изделий с супермелким зерном (до 20 мкм), полученным специальными способами литья ("технология гранул").

Еще великий русский металлург Д.К. Чернов указывал, что в литом металле можно получить свойства деформированного металла, если создать при затвердевании структуру особомелкого зерна. Таким образом, минимизация зерна – это путь к возможной отмене всех процессов обработки металлов давлением вообще.

Уменьшение размеров частиц, составляющих объект, придает объекту в целом новые свойства. Это вызвано: во-первых, влиянием развитых границ, т.к. приграничные условия отличаются от внутризеренных; а во-вторых, отсутствием внутри зерна условий, которые должны проявляться в большом объеме. Поэтому наноразмеры зерен способны придать при сохраняющемся химсоставе существенно новые качества тому же самому сплаву.

В настоящее время еще не изучен действительный тонкий механизм указанного влияния. Но некоторые проявления в виде отдельных аномально высоких свойств обнаруживаются. Поэтому предсказания Д.К. Чернова сбываются и проявляются в виде развития мощного нового направления – придания зерну структуры супермелкого состояния. Подход к реализации данной идеи осуществлен с двух противоположных сторон: со стороны сохранения микрочастиц жидкого металла и со стороны компактирования порошков из твердого металла.

Сегодня получают порошки металлов (алюминий, титан, магний) с регулируемыми размерами частиц с минимальным диаметром 50-70 мкм. Заполнение точных форм таким порошком с последующим высокотемпературным спеканием дает требуемые высокие результаты по прочности и точности сложных деталей. Доля технологии порошковой металлургии в общем объеме производства деталей авиа- и судостроения быстро увеличивается. Однако, несмотря на то, что "технология гранул" только "набирает обороты", уже становится очевидным, что другая технология – "низкотемпературная технология волокнистых композитов с металлической матрицей из легких металлов" – вполне конкурентоспособна и уже используется в новейших разработках (например, в конструкции нового американского самолета "Боинг" обшивка выполнена из листов углепластиковой композиции). Анализ конкурирующей технологии дает основа-

ние ожидать, что будущая технология будет низкотемпературной, т.к. она как технологический комплекс менее энергозатратна.

Расширение взгляда на технологию как комплекс дает основание предполагать, что порошковая технология охватит даже шихту и, таким образом, в металлургии значительно разовьются атермальные процессы (т.е. процессы без плавки металла). Такой прогноз много что значит для оценки относительно недалекой будущей конкурентной борьбы. Лучшие материалы приведут к принципиальному изменению конструкторских решений по использованию конструкционных материалов, что определит границы использования технологий.

В глобальном плане анализ тенденций развития показывает возрастающее влияние технологий на жизнь общества в целом. Примером такого влияния может быть расширение использования технологии получения алюминиевого листа методом непрерывного литья с прокаткой из жидкого металла. Такая технология в большинстве случаев лишает крупные предприятия их преимуществ, делает ненужными затраты на мощное прокатное оборудование, позволяет ее владельцам опередить конкурентов.

Технологии различных отраслей взаимосвязаны друг с другом. Поэтому поиски приемлемых технологий необходимо производить с учетом связующих их цепочек. Так, металлургическое производство обеспечивает заготовками производство двигателей, а те – в свою очередь – поставляют свою продукцию для самолетостроителей. При отсутствии взаимосвязи технологий ситуация может оказаться критической (убыточной). Например, штамповка деталей с использованием полиуретана, разработанная для моторостроительных и авиационных предприятий, без опоры на реальные технологии металлургического производства, оказалась совершенно неприемлемой к применению по условиям рынка. Это вызвано тем, что высокая стоимость полиуретана не позволяет использовать его в виде вспомогательного материала для штамповки.

Вместе с тем устранение неэффективных производств и технологий целесообразно только в случае, когда в производственном "организме" уже появились и работают новые идеи. В противном случае "устранение" приводит к исчезновению производства в целом.

Сегодняшним выпускникам вуза, радующим о возрождении на новом, современном уровне отрасли по обработке металлов давлением, следует без промедления использовать свою энергию молодости и интеллектуальный запас для разрешения вопросов перспективных технологий на базе осознанного научного предвидения.

2 Основные сведения о прессовании

2.1 Сущность процесса

Прессование – это процесс выдавливания металла из замкнутого объема контейнера через отверстие по форме изделия. Схема процесса прессования приведена на рис. 1.

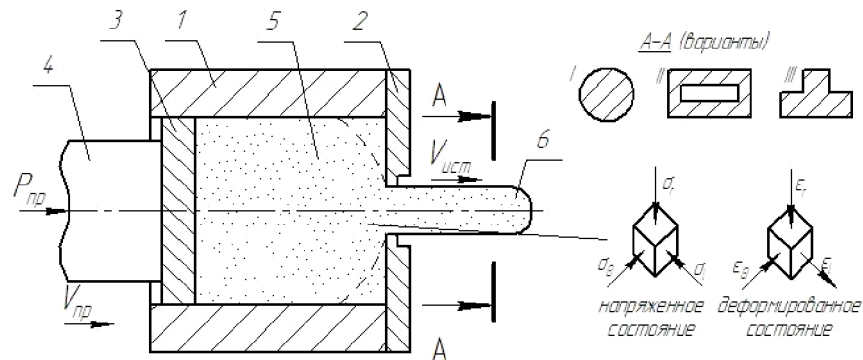


Рис. 1 Прямое прессование: 1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – пресс-шайба; 4 – пресс-штемпель; 5 – заготовка (слиток); 6 – изделие; $V_{пр}$ – скорость прессования; $V_{ист}$ – скорость истечения

Контейнер представляет собой толстостенную втулку, выдерживающую давление прессования.

Осуществляя давление на заготовку, помещенную в контейнер, по всему объему заготовки создают всестороннее неравномерное сжатие с напряжениями: σ_r – радиальным; σ_θ – тангенциальным; σ_l – осевым. За счет напряжений сжатия металл выдавливается через матрицу, получая две деформации сжатия (ε_r и ε_θ) и одну (наибольшую) деформацию растяжения ε_l .

Всестороннее неравномерное сжатие благоприятно для деформирования любых материалов. Поэтому прессованием изготавливают изделия как из пластичных, так и из малопластичных и хрупких материалов. Схема напряженного состояния – всестороннее неравномерное сжатие – является важнейшим достоинством процесса.

2.2 Разновидности процесса

Существуют различные виды процесса выдавливания: прямое (рис. 1), обратное (рис. 2, а) и боковое (рис. 2, б).

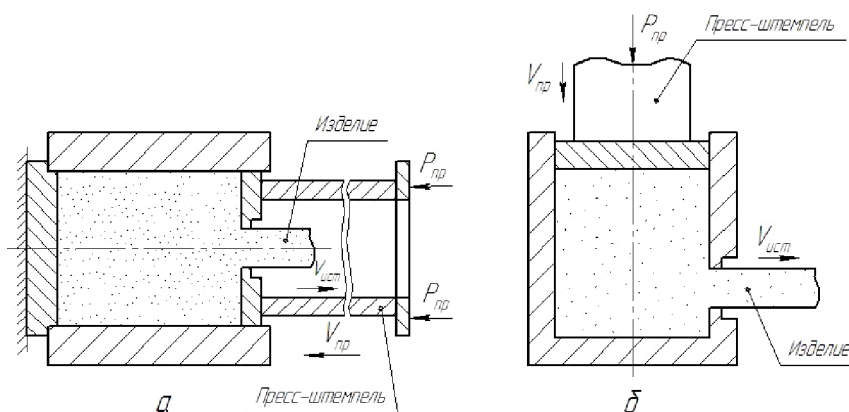


Рис. 2 Разновидности прессования: обратное (а) и боковое (б)

При прямом прессовании выход (истечение) изделия происходит в направлении движения пресс-штемпеля. При обратном прессовании выход изделия происходит в направлении, обратном движению пресс-штемпеля. При боковом прессовании истечение металла происходит в направлении, перпендикулярном движению пресс-штемпеля.

2.3 Сортамент прессуемых изделий

Сортамент прессуемых изделий из алюминиевых сплавов включает более 15 тысяч наименований.

Прессованные профили используют: в качестве силовых элементов в авиа-, автомобиле- и судостроении; в качестве токоведущих элементов, корпусов электродвигателей и теплоотводящих деталей в электро- и теплотехнике; в виде облицовочных конструкций в строительстве, машиностроении и в других областях.

Сортамент можно разделить на следующие группы:

1. Прутки круглого и близкого к кругу поперечного сечения (рис. 3, а, б).
2. Сплошные одноконтурные (открытые) профили: тавр, двутавр, уголок, швеллер, сложный профиль (рис. 3, в, г, д, е, ж).
3. Сплошные профили переменного сечения: ступенчато-переменного и плавно-переменного (рис. 3, з, и).
4. Полые профили (рис. 3, к).
5. Петельные профили (рис. 3, л).
6. Трубы (рис. 3, м).
7. Панели (рис. 3, н).
8. Трубы с законцовками (рис. 3, о).

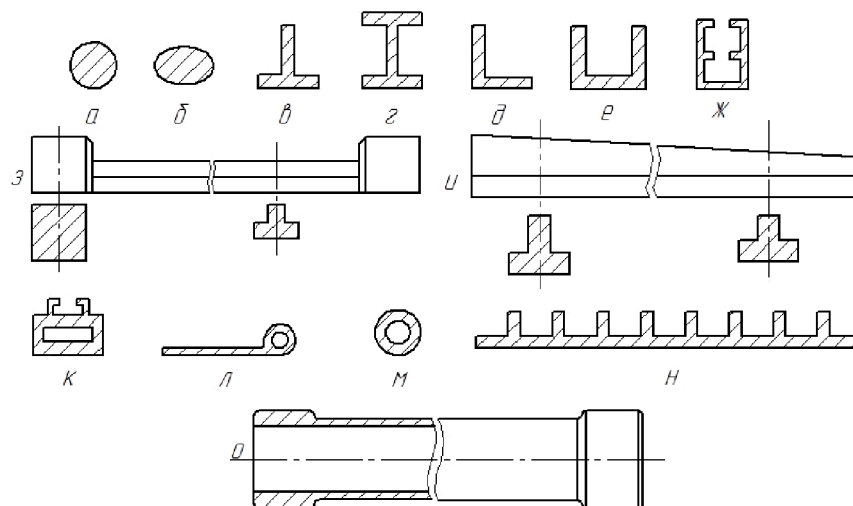


Рис. 3 Сортамент прессуемых изделий

Сортамент профилей быстро увеличивается, т.к. расширяется применение прессованной продукции.

2.4 Классификация способов прессования

По важнейшим отличительным признакам способов прессования целесообразны следующие варианты классификации.

1. Классификация по контактному взаимодействию с контейнером:
 - 1) с сопротивляющимся трением;
 - 2) без трения;
 - 3) с активным трением.
2. Классификация по температурным условиям прессования:
 - 1) Горячее прессование:
 - с равномерным предварительным нагревом;
 - с градиентным (неравномерным по длине) нагревом.
 - 2) Теплое прессование:
 - с использованием тепла литья;
 - с предварительным недогревом всего объема слитка.
 - 3) Холодное прессование:
 - с ударным выдавливанием;
 - с гидростатическим выдавливанием.
3. Классификация по типу получаемых изделий:
 - 1) прутки (круглые, многогранные);
 - 2) профили сплошного сечения (типа тавра, швеллера);

- 3) профили переменного по длине сечения;
 - 4) полые профили;
 - 5) панели;
 - 6) трубы;
 - 7) трубы с законцовками;
 - 8) кабельные оболочки.
4. Классификация по характеру истечения металла:
- 1) с прямым истечением;
 - 2) с обратным истечением;
 - 3) с боковым истечением;
 - 4) с равноканальным истечением (угловым и винтовым);
 - 5) совмещенное со сдвигающим кручением.

Два последних способа (4.4 и 4.5) представляют собой специфические примеры прессования, предназначенные для осуществления так называемой интенсивной пластической деформации (ИПД), цель которой не формоизменение слитка в изделие, а создание структуры металла с особомелким зерном (наноструктуры). Подробнее данные приемы воздействия на структуру изложены далее, в разделе "Обработка металлов интенсивной пластической деформацией".

3 Развитие традиционных технологий на основе прессования

Перечисленные инновационные способы используют множество физических идей различной степени технической готовности к применению. Наиболее привлекательны усовершенствованные технологии на базе традиционного процесса. В России в период 2001-2006 гг. появилось более 20 производств на основе экструзионных процессов. Настоящий бум наблюдается в производстве профилей для конструкций оконных переплетов.

Наиболее обоснованным технически является следующий прогноз развития традиционных технологий на основе экструдирования, сделанный специалистами головного института в области обработки легких сплавов – "Всероссийского института легких сплавов" (ВИЛС) – с учетом мирового уровня развития [4] на ближайшие 25 лет [2, 5, 10].

Производство экструдируемых профилей из алюминиевых сплавов будет осуществляться преимущественно на заводах, специализированных по основным признакам прессования сплавов: "мягким", легкопрессуемым (группа "А") и "твердым", труднопрессуемым (группа "В").

К группе "А" относят низко- и среднелегированные сплавы типа АМц и АД31 (сплавы систем: 1000, 3000, 6000 – в цифровой индексации). Основными потребителями продукции являются: строительство; транс-

порт; электротехническое машиностроение. Уровень потребления профилей группы "А" составляет 80-90% от всего объема производства профилей.

"Мягкие" сплавы позволяют достичь высоких скоростей истечения (десятки метров в минуту), поэтому прессование "мягких" сплавов высокопроизводительно. Производство легко поддается автоматизации и компьютерному управлению. Оборудование комплектуют в виде поточной автоматизированной линии по технологической схеме: нагрев – прессование – обработка на рольганге выходного стола – правка на копильнике (пуллере) – резка профилей в меру.

В связи с легкопрессуемостью выгодно сокращать затраты времени на вспомогательные операции, автоматизировать сам процесс выдавливания для поддержания его в оптимальной области и последующую обработку для сдачи готовой продукции. При этом дорогостоящие мероприятия по автоматизации в поточном цикле и компьютеризации (до 500 программ) окупаются.

Предполагается к использованию по указанной схеме 3 типа заводов:

- малой мощности с прессом 17 МН (одна поточная линия), максимальный диаметр контейнера – 170 мм;
- средней мощности (4 поточных линии: две линии с прессами 16,5 МН и по одной с прессами 20 и 22,5 МН; максимальный диаметр контейнера – 205 мм);
- большой мощности с прессами от 20 до 65 МН (8 поточных линий), диапазон контейнеров от 180 до 460 мм.

Предлагаемые варианты рассчитаны на использование прямого прессования. Существенным изменениям должны быть подвергнуты механизмы: подачи слитка, смены инструмента, центровки и прижатия контейнера, резки изделий, отделения пресс-остатка. Управление прессами будет осуществляться в режиме автопилота.

К группе "В" относят сплавы типа Д16 и В95 (сплавы систем: 2000, 5000, 6000 – в цифровой индексации). Эти сплавы используют в основном для целей систем вооружения, аэрокосмического и авиационного комплекса. Главными требованиями к продукции из сплавов группы "В" (профилям, трубам, панелям) является высокое качество изделий, их соответствие требованиям технических условий по механическим свойствам, структуре, коррозионной стойкости и качеству поверхности.

Скорости истечения рассматриваемых "твердых" сплавов на порядок меньше, чем у "мягких". Следовательно, на производительность процесса влияет в основном сам процесс выдавливания, а не вспомогательные операции. Поэтому прогнозируемые технические усовершенствования касаются: повышения точности и чистоты инструмента; упрочнения контейнера и улучшения контейнерных сталей (для создания в нем давления до

800-1000 МПа); отслеживания за соблюдением рекомендуемых оптимальных температур нагрева слитков и прессования; систем контроля изделия по геометрии и чистоте поверхности.

Обработку профилей из "твердых" сплавов прогнозируется производить партиями, мелкосерийно. Это связано с необходимостью осуществлять закалку вне прессового стола. Для условий мелкосерийного производства сформировался следующий прогноз на технологический комплекс:

- резка слитков в холодном состоянии пилами;
- нагрев заготовок в индукционной печи (равномерный по длине либо неравномерный – "градиентный");
- прямое прессование, позволяющее получать большую номенклатуру изделий по сравнению с обратным прессованием;
- система контроля за процессом компьютеризирована, обеспечивает условия изотермического прессования;
- предварительная правка на пуллерах с повышенным усилием натяжения;
- закалка на агрегатах с вертикально-закалочными печами и колодцами, с последующим искусственным старением в печах старения, состояние и процессы которых контролируются адекватно требованиям к продукции.

В связи с трудностью формирования требуемой по ТУ структуры металла методами пассивного контроля за выполнением температурно-скоростных условий прессования и низкой производительностью процесса прогнозируется использование прессования с активным трением контейнера о слиток. В этом случае появляется возможность перемещать контейнер со скоростью, большей скорости движения пресс-штемпеля, что по сравнению с традиционной технологией позволяет: увеличить скорость истечения и производительность в 3-4 раза; увеличить точность и повысить сортность изделий; устойчиво получать необходимую мелкозернистую структуру изделий.

Специализированные заводы для сплавов группы "В" могут быть представлены в виде комплекса агрегатов с прессами мощностью 40-120 МН (диаметр контейнера – 306-500 мм).

4 Реально перспективные технологии

В обработке металлов авиационной металлургии – металлургии легких и специальных сплавов – множество направлений: литье, прокатка, прессование, ковка, штамповка, волочение, изготовление труб и другие. За последние 30-40 лет были осуществлены новые для своего времени существенно значимые технологии.

Авиационная металлургия работает в основном на авиационно-космический комплекс, постоянно выдвигающий все более жесткие требования к полуфабрикатам по прочности, точности, качеству поверхности, уровню рентабельности. К настоящему времени возможности традиционных технологий для выполнения поставленных задач в значительной степени исчерпаны.

Новые разработки для обеспечения конкурентоспособности решений должны:

- 1) опираться на новые физические эффекты;
- 2) учитывать комплексное развитие отрасли;
- 3) обладать высокой надежностью результатов;
- 4) обладать способностью к оптимизации процессов;
- 5) быть экономически оправданными;
- 6) обеспечивать экологическую чистоту.

Перспективными для металлургической отрасли авиапрома являются следующие технологические направления:

- 1) гидропрессование металла;
- 2) изотермическое прессование (прессование профилей в контролируемом через ЭВМ режиме оптимальности);
- 3) прессование с активным трением;
- 4) конформ-процесс;
- 5) прессование из твердого состояния (экструзия-процесс);
- 6) прессование (прокатка, ковка) изделий из гранулированного металла ("технология гранул");
- 7) изостатическое прессование;
- 8) прессование профилей из титановых сплавов из цельной заготовки;
- 9) получение биметаллов;
- 10) получение изделий из волокнистых (слоистых, дисперсионно-упрочненных) композитов;
- 11) прессование с получением наноструктуры (равноканальное угловое; винтовое; со сдвиговым кручением).

5 Гидропрессование металла

5.1 Прямое гидропрессование

Гидропрессование – процесс выдавливания жидкой рабочей средой, действующей непосредственно на металл, при котором изделие и инструмент разделены слоем рабочей жидкости, сохраняющей по толщине слоя истечения свойства данной жидкости. Слой истечения – это тонкий слой рабочей жидкости толщиной примерно 20 микрон ($\delta_{жс} \approx 20$ мкм), кото-

рый остается на поверхности изделия. Гидропрессование осуществляют в статическом режиме.

Давление, создаваемое в контейнере, достигает 20 тысяч атмосфер. Давление развивают постепенно. Чтобы до начала процесса не было выхода рабочей жидкости, конец заготовки предварительно оформляют по форме конуса матрицы, что до начала истечения обеспечивает герметичность.

Для реальных условий производства используется бескомпрессорный способ гидропрессования с созданием высокого давления уплотненной по контейнеру пресс-шайбой (рис. 4). В качестве рабочей жидкости применяют воду. При достигаемых давлениях (до 20 тыс. атм.) следует учитывать упругие свойства инструмента и сжимаемость воды.

Чтобы по окончании процесса не происходило "выстреливания" заготовки, увеличивают протяженности рабочего процесса. Способ применяют для малых сечений ($d_{изд} \approx 0,1$ мм) и используют деформацию с большими вытяжками ($\lambda \geq 1000$), что технологически допустимо при гидропрессовании, а применяемую заготовку большой длины сворачивают в моток (рис. 4). Процесс ведут в холодную. Применяют для особо прочных труднодеформируемых металлов (молибден, вольфрам).

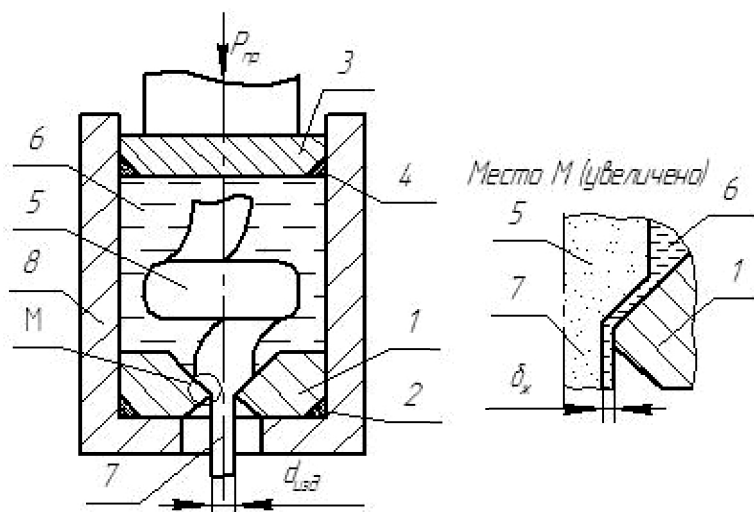


Рис. 4 Бескомпрессорный способ гидропрессования: 1 – матрица; 2 – уплотнение матрицы; 3 – пресс-шайба; 4 – уплотнение пресс-шайбы; 5 – заготовка; 6 – рабочая жидкость; 7 – изделие; 8 – контейнер; $\delta_{лс}$ – смазочный слой

5.2 Гидромеханическое прессование

Для управления процессом гидропрессования часть давления прессования передают на заготовку механическим путем через торец заготовки ($\tilde{p}_{тор}$), а остальную часть, требуемую для выдавливания, передают посредством давления жидкости ($\tilde{p}_{жс}$) (рис. 5).

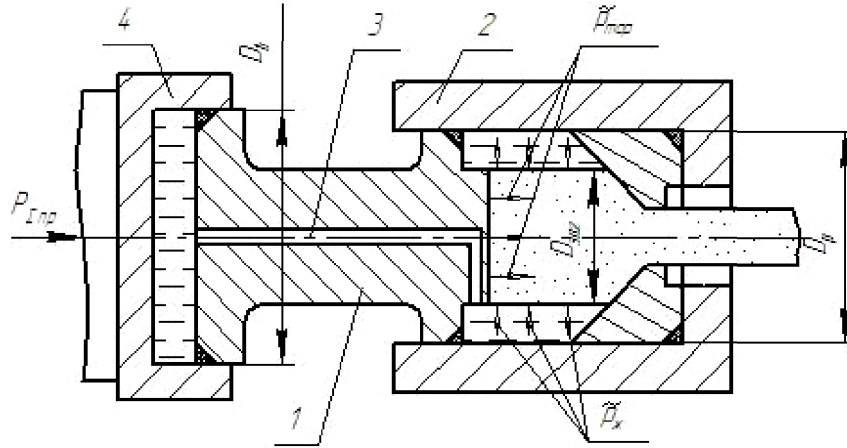


Рис. 5 Схема установки для гидромеханического прессования: 1 – пресс-штемпель; 2 – рабочий контейнер; 3 – перепускной клапан; 4 – внешний контейнер

При этом соотношение давлений выражается формулой

$$\frac{\tilde{p}_{тор}}{\tilde{p}_{жс}} = 1 + \frac{D_v^2 - D_p^2}{D_{заг}^2}, \quad (5.1)$$

где $\tilde{p}_{тор}$ – торцовое давление (удельное усилие) на заготовку;

$\tilde{p}_{жс}$ – давление жидкости (боковое давление);

D_v , D_p , $D_{заг}$ – соответственно диаметры внешнего и рабочего контейнеров и заготовки.

Для поддержания соотношения (5.1) в пресс-штемпеле выполняют перепускной канал из рабочего контейнера во внешний контейнер.

Сумма развиваемых усилий от механического и жидкостного давления составляет общее усилие прессования (p_{Σ}) выпрессовки изделия.

Применение гидромеханического прессования позволяет в любой момент остановить истечение металла. Окончание процесса происходит плавно, с извлечением изделия и пресс-остатка без выброса изделия и рабочей среды высокого давления.

5.3 Горячее гидродинамическое выдавливание (ГГДВ)

Этот процесс является псевдогидропрессованием, так как выпрессовываемый металл и инструмент разделены слоем смазки, дающим коэффициент трения близкий к жидкостному, но жидкостью этот слой не является. Схема горячего гидродинамического выдавливания изображена на рис. 6.

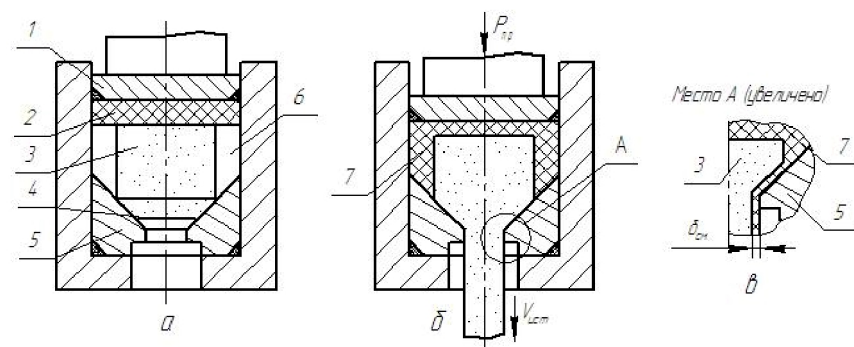


Рис. 6 Горячее гидродинамическое выдавливание: 1 – пресс-штемпель молота; 2 – смазочная шайба; 3 – заготовка; 4 – подготовленный торец заготовки; 5 – матрица; 6 – объем кругового зазора; 7 – распрессованная смазочная масса

Описываемый процесс используется для формообразования титановых и стальных изделий типа лопаток турбин, металлообрабатывающего инструмента и т.п.

Перед прессованием торец заготовки подготавливают с условием, чтобы его форма соответствовала входному конусу прессовой матрицы и заперла вход в матричный канал, ориентируя заготовку в контейнере с созданием боковых зазоров. Для реализации процесса заготовку нагревают до 700-800°C. Вброшенную в контейнер заготовку накрывают смазочной шайбой, спрессованной из графита (70%) и битумной связки (30%), объем которой несколько больше объема боковых зазоров между заготовкой и контейнером (рис. 6, а). Вслед за этим ударом с силой, равной силе выдавливания, деформируют помещенный в контейнер комплект "заготовка – смазочная шайба". Удар разрушает смазочную шайбу, заполняющую зазоры по контейнеру, и выдавливает заготовку в изделие с высокой

скоростью ($V_{ист}$), близкой к предельно допустимой скорости деформации сплава. Формирование изделия (рис. 6, б, в) происходит на слое смазочной массы толщиной $\delta_{см}$ ($\delta_{см} = 0,3 \div 0,5$ мм) и приводит к полному выбиванию металла заготовки без оставления пресс-остатка и смазки в контейнере. Прием изделий производят в воду, заполняющую емкость, на дно которой насыпают песок для амортизации удара "выстреливаемого" изделия.

Способ ГГДВ отличается высокой производительностью, относительной точностью и чистотой поверхности "выстреливаемого" изделия и является предпочтительным в сравнении с другими способами изготовления одноименных изделий.

6 Прессование изделий из алюминиевых сплавов в оптимальных условиях

Важнейшим параметром, необходимым для реализации "оптимального прессования", является поддержание постоянной температуры процесса ("изотермическое прессование"). При этом оптимальным режимом обеспечиваются следующие результаты: наименьшее усилие прессования; наибольшая производительность; предельно высокий выход годного; наилучшее качество изделия и др.

Оптимизация достигается при использовании автоматической системы контроля за процессом, для чего пресс переводят на компьютерное управление. Компьютерная программа отслеживает через систему датчиков изменение температуры в очаге пластической деформации. Ориентируясь на заранее заданную температуру, при которой усилие минимально, компьютер в случае отклонения фактической температуры от заданной подает сигналы исполнительному устройству на изменение скорости движения главного плунжера, т.е. изменение скорости прессования и истечения. С изменением скорости прессования изменяется выделение тепла в очаге пластической деформации, происходящее вследствие затрат энергии на работу деформации. В результате температура очага деформации поддерживается постоянной. Это стабилизирует условия в очаге пластической деформации и поддерживает постоянной также и скорость истечения.

При этом важным обстоятельством является точное повторение всех режимов процесса по отношению к наилучшему варианту сочетаний параметров, дающих наилучшие результаты по структуре, свойствам и т.д. Это так называемый мониторинг технологии является во всех процессах гарантом получения надежных по качеству и свойствам изделий.

Блок-схема контроля работы пресса при изотермическом прессовании показана на рис. 7.

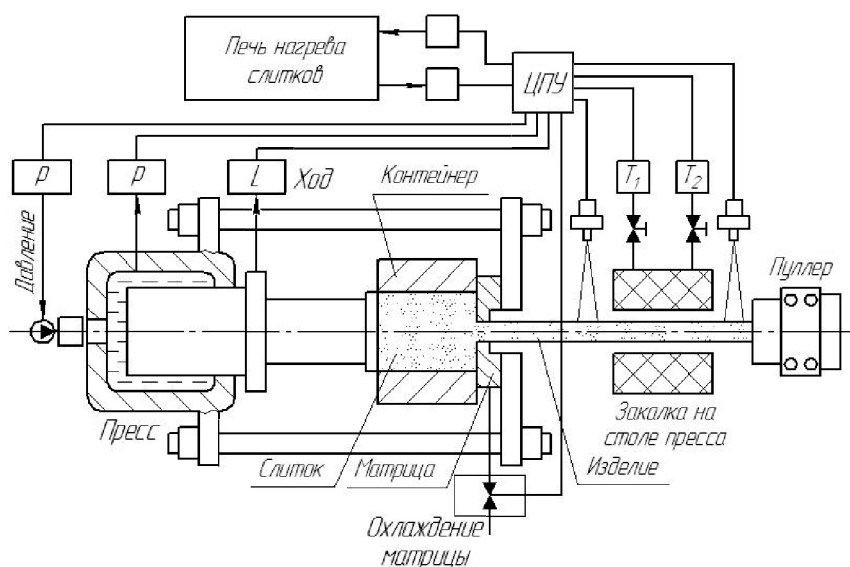


Рис. 7 Блок-схема контроля и управления при изотермическом прессовании

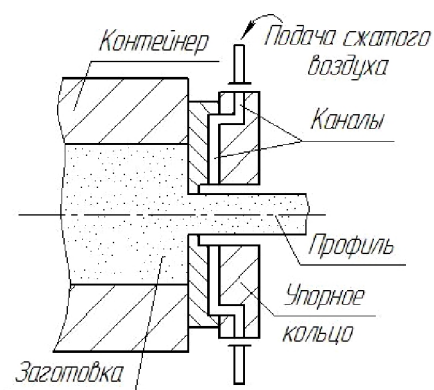


Рис. 8 Схема охлаждения матрицы воздухом

Температура очага пластической деформации регулируется также системой охлаждения матрицы. Применяют различные способы охлаждений: жидким азотом, водой, сжатым воздухом, потоком дисперсоидов водовоздушной смеси и другие (рис. 8).

Дополнительная эффективность работы прессы достигается установкой на прессы устройства, называемого "пуллер". Пуллер – правильное устройство, производящее правку изделий растяжением по выходе из матрицы. При

этом сокращается длина пресс-остатка, улучшается качество поверхности и повышается выход годного.

Указанные меры способствуют: увеличению скоростей истечения до 30% и сокращению трудозатрат на тонну выпуска до 15%.

7 Прессование с активным трением

Схема процесса представлена на рис. 9. Суть прессования с активным трением заключается в создании силы трения по контейнеру, направленной в сторону матрицы и способствующей истечению. При таком действии сил дополнительные сдвиги у поверхностных слоев не возникают, структура изделия характеризуется однородностью, отсутствует крупнокристаллический ободок.

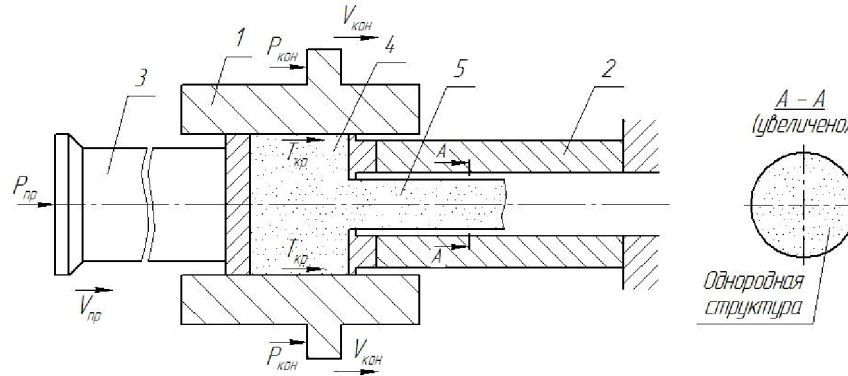


Рис. 9 Схема прессования с активным трением: 1 – контейнер; 2 – полый неподвижный пресс-штемпель; 3 – пресс-штемпель главного плунжера; 4 – заготовка; 5 – изделие

Требуемое направление силы трения получают, перемещая контейнер в сторону прессования специальными цилиндрами (на схеме не показаны) со скоростью $V_{кон}$, большей скорости прессования $V_{пр}$. Такая схема реализуется при совмещении прямого и обратного прессования ($V_{кон} > V_{пр}$).

8 Конформ-процесс (КНФ)

Схема конформ-процесса изображена на рис. 10. Устройство для осуществления конформ-процесса состоит: из силового барабана 1 с желобом, выполненного с возможностью вращения; башмака 3, посаженного на ось 6, который создает силу прижима $P_{прж}$ под действием силового цилиндра (на схеме не показан); матрицы 4, обеспечивающей формообразование изделия 5. Прессование осуществляют из заготовки, подаваемой в виде прутка 2 в зону матрицы. При вращении барабана и возникновении

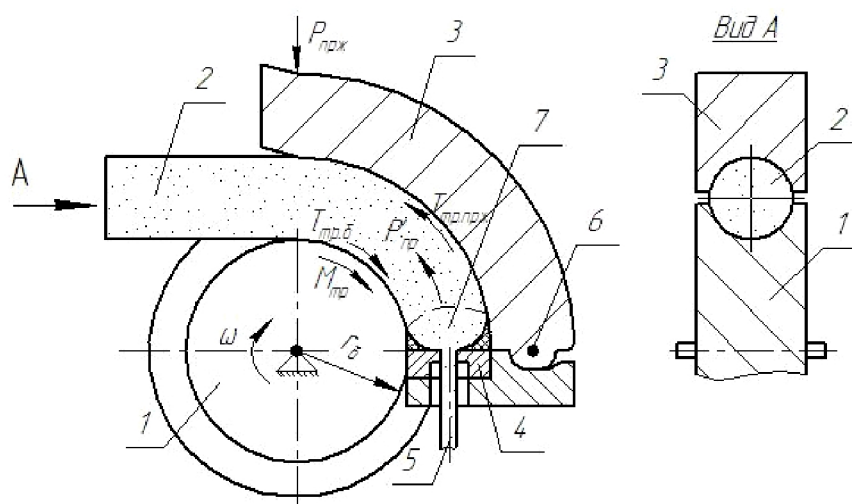


Рис. 10 Схема конформ-процесса: 1 – барабан; 2 – заготовка; 3 – башмак; 4 – матрица; 5 – изделие; 6 – ось поворота башмака; 7 – очаг пластической деформации

активной силы трения $T_{тр.б}$, направленной к матрице, формируется очаг пластической деформации.

Силы трения по башмаку $T_{тр.пж}$ и силы, противодействующие продавливанию $P'_{пр}$ (равны силе прессования $P_{пр}$), препятствуют началу прессования. При достижении равенства

$$T_{тр.б} = T_{тр.пж} + P'_{пр} \quad (8.1)$$

начинается процесс выдавливания. Для его поддержания необходимо постоянное вращение силового барабана с созданием момента трения

$$M_{тр} = T_{тр.б} r_б, \quad (8.2)$$

где $r_б$ – радиус барабана.

Повышая скорость вращения ω , можно добиться высокой скорости истечения $V_{ист}$. Производительность процесса высока и достигает 500 кг/час.

При применении КНФ деформацию осуществляют в холодную, при этом учитывают и используют выделяющееся тепло деформации.

КНФ применяют для изготовления мелких по сечению профилей 2-10 мм. Кроме сплошных, изготавливают полые профили, устанавливая язычковые матрицы.

При соединении заготовок в торец за пределами устройства процесс реализуется, как полунепрерывный.

9 Экстролинг-процесс (ЭКСП)

Схема экстролинг-процесса изображена на рис. 11. ЭКСП является совмещением прокатки и прессования. ЭКСП по своей сути похож на конформ-процесс, в котором роль подающих в очаг деформации элементов выполняют два валька с желобами, которые при вращении втягивают заготовку в очаг деформации и "нагнетают" туда все новый металл. Возникающие при этом активные силы трения суммарно должны быть равны силе прессования

$$\sum T_{тр.в} = P_{пр}, \quad (9.1)$$

где $T_{тр.в}$ – сила трения о вальки;

$P_{пр}$ – сила, необходимая для выдавливания.

ЭКСП – способ, расширяющий возможности КНФ. Недостатками обоих способов является необходимость вращательного движения задающих валков, при котором трудно создать значительное осевое усилие для прессования крупных профилей.

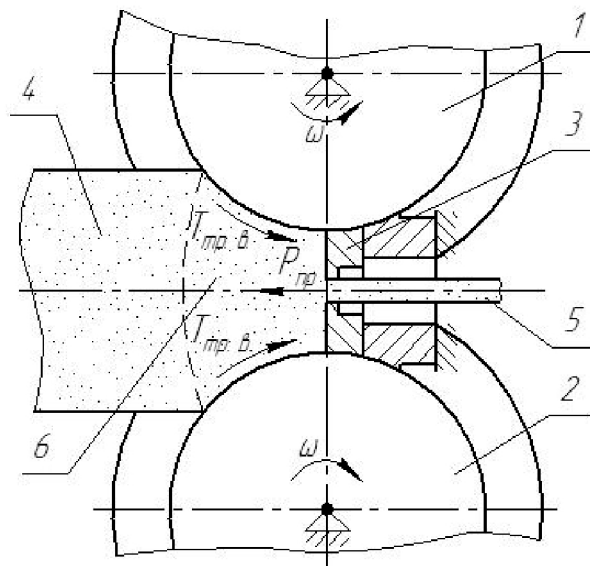


Рис. 11 Схема экстролинг-процесса: 1, 2 – подающие вальки; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – изделие; 6 – очаг пластической деформации

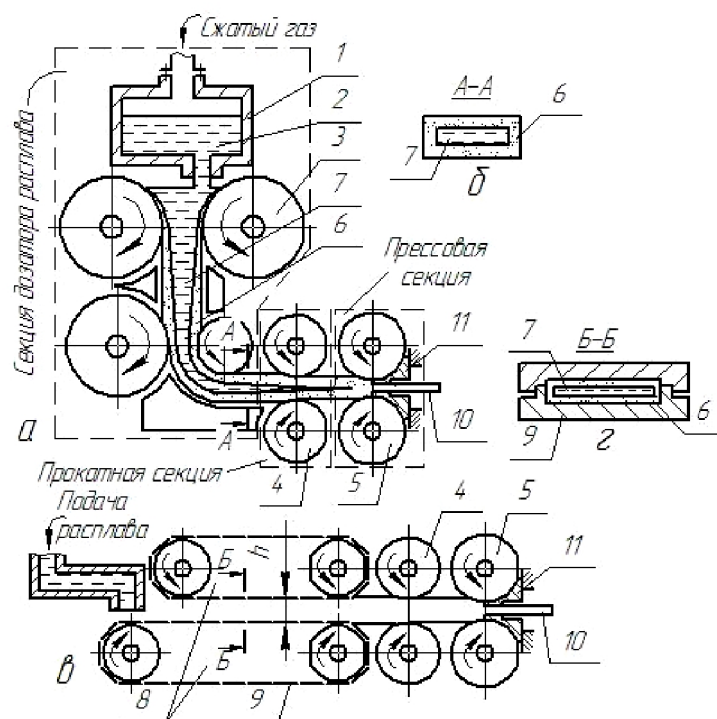


Рис. 12 Схема агрегата бесслитковой прокатки в технологической цепочке с секцией прессования (секцией экстролдинг-процесса): а – валковый кристаллизатор; б – сечение твердожидкой полосы; в – ленточный (траковый) кристаллизатор; г – сечение тракового замка с твердожидкой полосой; 1 – дозатор; 2 – расплав; 3 – валковый кристаллизатор; 4 – валки прокатной секции; 5 – валки секции экстролдинг-процесса; 6 – корка затвердевшего металла; 7 – жидкая сердцевина; 8 – ленточный кристаллизатор; 9 – траки непрерывной цепи; 10 – готовый профиль; 11 – матрицы прессовой секции

Наиболее эффективно использование ЭКСП может быть осуществлено при деформировании металла в твердожидком состоянии. В этом случае сопротивление деформации у металла незначительно (5-10 МПа): эффект тиксотропности [29, 30]. В случае предварительной обработки расплава ультразвуком [29] обеспечивается получение жидкой глобулированной микроструктуры, что дает повышенные свойства в твердом состоянии.

Устройство для "прессования прокаткой" устанавливают как завершающую секцию агрегата бесслитковой прокатки (АБП), приведенного на рис. 12. АБП заменяет прокатный стан горячей прокатки. Бесслитковая

прокатка является перспективным направлением, как с позиции изготовления листовой продукции, так и с позиции поставки заготовки для совмещенного процесса "прокатка – прессование". Совместно с экстролинг-секцией – АБП заменяет пресс высокой производительности.

Использование формообразования изделий из жидкого и твердожидкого состояния позволяет получать мелкозернистую структуру непосредственно из расплава, при этом исключается кристаллизация в крупном слитке с образованием крупных дендритов, которые затем требуется разрушить.

В АБП кристаллизация происходит с поверхности струи металла, соприкасающейся с валками (в валковом кристаллизаторе) либо с траками (звеньями) подвижной цепи (ленточный кристаллизатор). Охлаждение происходит с большой скоростью, поэтому образующаяся при охлаждении корка металла имеет мелкозернистую структуру. Последующая деформация дополнительно дробит зерна.

Особенно рациональна бесслитковая прокатка и "прокатка – прессование" (экстролинг-процесс) при обработке титановых сплавов, поскольку их прочность в твердом состоянии достаточно высока, что при традиционном прессовании приводит к износу и разрушению инструмента. При уменьшенных давлениях ЭКСП может быть использован инструмент из металлокерамики, проявивший достаточно высокую стойкость.

10 Прессование изделий из особо прочных алюминиевых сплавов

10.1 Получение сплавов нового поколения высокоскоростной кристаллизацией

Алюминиевые сплавы, получаемые и обрабатываемые по традиционной технологии, позволяют достичь прочности $\sigma_b \approx 700$ МПа. Дальнейшее усовершенствование состава металла и технологии не приводит к существенному росту прочностных показателей. Между тем требуются изделия со значительно большей прочностью при удельном весе, соответствующем алюминиевым сплавам. Создание таких сплавов стало возможным благодаря исследованиям в области литья слитков для химсостава расплава, включающего тугоплавкие и редкоземельные элементы.

Исчерпывание возможности повышения свойств алюминиевых сплавов за счет легирования объясняется ограниченной способностью алюминия образовывать твердые растворы в широком интервале кристаллизации [19]. Введение в сплав повышенных количеств легирующих элементов приводит к образованию первичных интерметаллидов и создает грубую структуру, снижающую свойства сплава.

Величина зерна существенно влияет на свойства сплава. Субмелкое зерно придает новые свойства материалу. Оказалось, что метод быстрой кристаллизации позволяет получать метастабильное пересыщение, образование метастабильных фаз и диспергирование структуры. Возникновение метастабильного пересыщения вызвано тем, что при слишком большой скорости охлаждения образование комплексов интерметаллидов не успевает происходить и протекает процесс бездиффузионной кристаллизации. Это вызывает создание субмелкой (диспергированной) структуры с размером зерна от 3 до 20 мкм.

Получение субмелкого зерна возможно, если скорость охлаждения составляет $V_{охл} = 10^5$ °C/сек. Столь высокие скорости охлаждения достижимы при распылении жидкого металла до капель диаметром 0,1-0,2 мм. Известно, что пыль алюминиевых сплавов с размерами фракций менее 100 мкм взрывается. Поэтому распыление металла до частиц требуемых размеров должно быть произведено в условиях, гарантирующих безопасность. Отечественными исследователями и изобретателями была создана такая безопасная технология – диспергирование производится в жидкость, что в принципе исключает взрыв и дает повышенную скорость охлаждения.

Дальнейшее увеличение скоростей охлаждения до $V_{охл} = 10^7$ °C/сек ведет к дополнительному росту механических свойств.

С учетом указанных особенностей созданы алюминиевые сплавы, обладающие уникальными свойствами, позволяющими [19]:

- снизить весовые характеристики узлов машин на 20%;
- уменьшить динамические нагрузки на узлы на 40%;
- повысить срок службы узлов в 1,5 раза.

Максимальные значения показателей сплавов нового поколения, полученных быстрой кристаллизацией, таковы: сплав $Al_{88}Ni_9Ce_2F$ (сплав системы алюминий – никель – церий – фтор) – $\sigma_b^{20^\circ C} = 1560$ МПа, $\sigma_b^{300^\circ C} = 970$ МПа; сплав $Al_{85}Y_8Ni_5$ (сплав системы алюминий – иттрий – никель) – $\sigma_b^{20^\circ C} = 1140$ МПа, $E = 71,2$ ГПа.

К сожалению, эти сплавы дороги, но, как показывают расчеты конструкторов самолетов и двигателей, улучшение свойств сплавов дает результаты, вполне окупающие их стоимость (за счет снижения веса, уменьшения габаритов и прочих факторов). Следовательно, предназначение этих сплавов – быть использованными в аэрокосмической технике. Очевидно, со временем подобные сплавы будут удешевлены и найдут более широкое применение.

10.2 Технология получения изделий

Поскольку обеспечить высокую скорость охлаждения можно при быстром теплосъеме с единицы площади поверхности охлаждаемого тела, сплавы с уникальными свойствами получают в виде объектов с предельно развитой поверхностью при минимальной массе (порошок, гранулы).

Порошок высушивают, производят дегазацию от газов в микрообъемах микрорельефа поверхности частиц (более подробно процесс изготовления порошка и дегазации описан в п. 11). Затем порошок засыпают в тонкостенные алюминиевые гильзы и подвергают вакуумированию при высокой температуре. Вакуумирование представляет собой процесс выдержки в условиях глубокого вакуума, во время которой молекулы любых газов отрываются от поверхности твердого тела, переходят через микропоры в отсасываемую атмосферу и выбрасываются во внешнюю среду. В процессе вакуумирования за счет диффузионных явлений происходит спекание частиц в единый монолит. Следующей операцией является заваривание лазерной сваркой гильз крышками с целью не допустить попадания в них воздуха из атмосферы.

Выдавливание изделий производят из заготовок в гильзах. Тонкостенные гильзы не являются факторами, препятствующими прессованию. Гильзы имеют механические свойства, значительно меньшие, чем основная заготовка. Поэтому металл гильзы (чистый алюминий) является смазочным слоем при выдавливании и покрывает тонким слоем поверхность

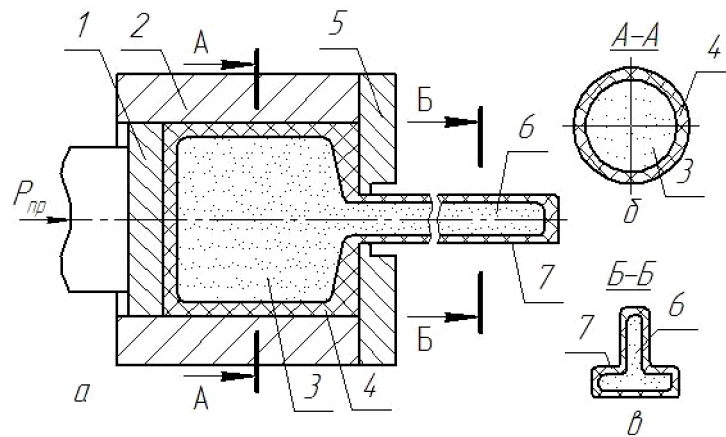


Рис. 13 Прессование скомпактированной из гранул (порошка) заготовки: а - процесс выдавливания; б - заготовка в оболочке; в - изделие с плакировкой; 1 - пресс-шайба; 2 - контейнер; 3 - заготовка из скомпактированных гранул; 4 - исходная гильза; 5 - матрица; 6 - отпрессованный профиль; 7 - слой плакировки

изделия. Тонкослойная плакировка защищает изделие от возможной коррозии, но при этом не сказывается на механических свойствах изделия из-за малой толщины.

Процесс выдавливания скомпактированной в гильзе заготовки аналогичен процессу прессования биметаллического прутка (рис. 13).

11 Изостатическое прессование

Изостатическое прессование осуществляется в составе "технологии гранул". Прессование заключается в выдерживании на протяжении длительного времени металла под большим постоянным давлением. В качестве объекта, подвергаемого давлению, может быть также кристаллизующийся жидкий металл. Газостат "выжимает" из жидкого металла пузырьки газов, предотвращая образование пористости внутри отливок.

Естественно, газостатическое устройство (газостатическое прессование) может быть использовано для многообразных целей преобразования различных объектов, помимо металлургического производства. Это создает большой простор для изобретательства. Однако данный аспект нами не рассматривается.

В связи со сказанным, изостатическое прессование рассматривается, как отдельная технология, более общего характера, чем "технология гранул".

Упрощенные схемы стадий обработки при изостатическом прессовании показаны на рис. 14-24 [6-9, 20]. Приведем краткое описание стадий.

1. *Изготовление гранул.* Схема установки для изготовления гранул показана на рис. 14. Вся установка помещается в герметичный бокс 1, заполненный азотом (аргоном либо другим инертным газом). Жидкий металл 3 подается из ковша 2 в промежуточную воронку 4. Далее расплав попадает на вращающийся распылитель 5. Скорость вращения может быть подобрана так, чтобы капли металла, скатывающиеся по поверхности распылителя вниз и приобретающие все более увеличивающуюся линейную скорость, распадались на частицы размером 30-150 мкм. Для увеличения теплосъема с частиц металла внутри камеры с распылителем установлен вентилятор 6, создающий мощные потоки газовой среды внутри камеры. Затвердевшие в состоянии полета гранулы попадают в периферийные сборники 9. В случае распыления алюминиевых сплавов сборники готовых гранул наполняют водой, устраняющей возможность взрыва.

Производительность установки составляет до 200 кг гранул в час. Размер гранул соответствует целесообразным для прессования значениям.

2. *Сушка гранул* (рис. 15) – предпринимается при извлечении гранул из воды (при отсутствии водяного охлаждения сушка не проводится).

3. *Калибровка гранул по размерам* (рис. 16) – необходима для оптимизации условий производства качественных заготовок, поскольку наи-

лучшие результаты получены для определенных размеров гранул (70-150 мкм).

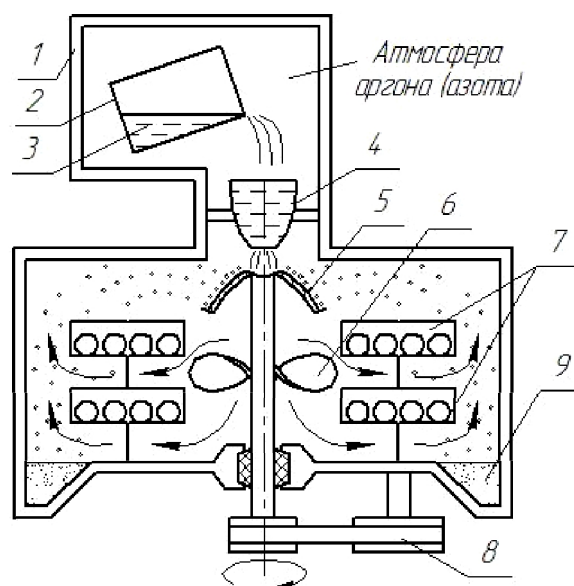


Рис. 14 Схема изготовления гранул: 1 – герметичный бокс гранулирования; 2 – ковш разливки металла; 3 – жидкий металл; 4 – промежуточная воронка; 5 – вращающийся распылитель; 6 – вентилятор; 7 – теплообменники; 8 – привод распылителя; 9 – сборник гранул

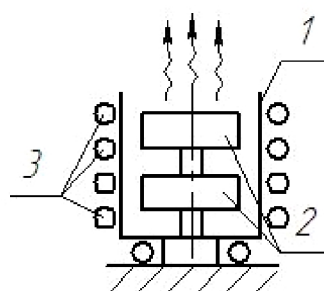


Рис. 15 Схема сушки гранул: 1 – сушильный резервуар; 2 – емкости с гранулами; 3 – нагреватели

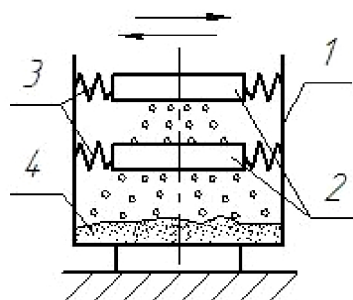


Рис. 16 Схема калибровки гранул по размерам: 1 – резервуар для сортировки; 2 – сита; 3 – упругие элементы; 4 – калиброванные гранулы

4. *Дегазация гранул* (рис. 17). Эта стадия обеспечивает удаление газов с поверхности микрорельефа гранул, что возможно лишь при создании глубокого вакуума. Поэтому создают вакуум как в камере дегазации 1, так и в капсуле 6, наполненной порошком 7, прошедшим дегазатор "зигзаг" 3. Для облегчения засыпки порошка в капсулу верхние крышки капсулы 5 вначале не фиксируют, а после заполнения объема капсулы приваривают.

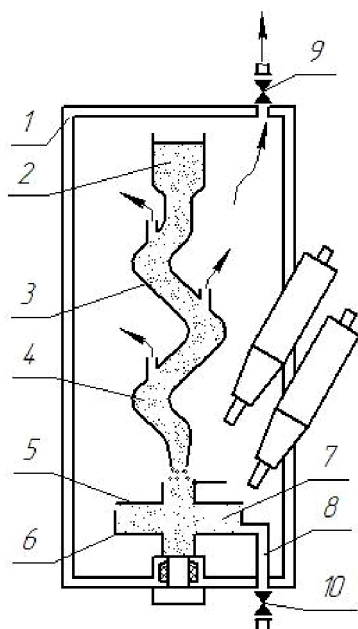


Рис. 17 Схема дегазации гранул: 1 – камера дегазации; 2 – приемник исходного материала; 3 – дегазатор "зигзаг"; 4 – гранульная масса; 5 – верхняя крышка; 6 – формирующая капсула; 7 – засыпка по форме детали; 8 – отводящий дегазационный патрубок изделия; 9 – отводящий общекамерный вентиль; 10 – отводящий вентиль изделия

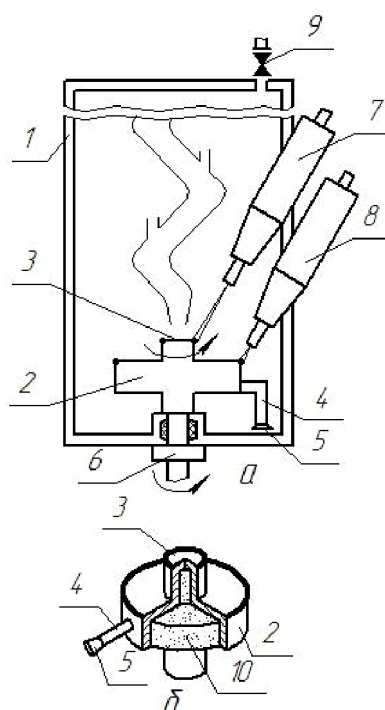


Рис. 18 Схема лазерной сварки капсулы: а – сварка капсулы; б – капсула со сформированным изделием; 1 – камера дегазации; 2 – капсула, заполненная порошком; 3 – верхняя крышка вала; 4 – отводящий дегазационный патрубок изделия; 5 – запорная пробка капсулы; 6 – сварочное поворотное устройство; 7, 8 – сварочные лазерные пучки; 9 – общекамерный вентиль газоотвода; 10 – порошковая засыпка внутреннего объема капсулы

5. *Лазерная приварка крышек капсулы* (рис. 18, а) – сварку производят плазмотронами либо лазерными пушками 7, 8 (в это же время закрывают отводящий дегазационный патрубок 4).

Сформованная из порошка заготовка в обечайке (капсуле) показана на рис. 18, б. Следует отметить, что капсула играет важную роль в формировании детали. Поэтому проектирование капсулы является сложной задачей, в которой должны быть учтены: термическая усадка порошка; место для образца-спутника, по которому определяют мехсвойства изделий; форма оболочки, определяющая удобство и быстроту заполнения объема капсулы и др. Толщина капсулы является определяющим фактором для дальнейшего компактирования. Материалом капсул служит мягкая нержавеющая сталь типа Х18Н10Т. Материал должен быть достаточно податлив для реализации давления газа на порошок через стенку капсулы. Слишком жесткая капсула ухудшает свойства изделия.

6. *Изостатическое прессование*. На рис. 19 изображен пресс изостатического прессования. Изделия 1 помещают внутрь нагревательного цилиндра 3, снабженного электронагревателями 4. Температура внутри нагревательного цилиндра достигает 1200°С. Указанные элементы закрывают колпаком 5, выполненным из огнеупорного материала. Вместе с тем колпак должен выдерживать давления внутри него (до 2000 атм.). Поэтому колпак по керамике покрывают слоем теплостойкой стали, обеспечивающим его прочность.

Колпак помещают в контейнер, который смонтирован, как силовой элемент прессы: через него усилие, развиваемое главным цилиндром 10 и сообщаемое главному плунжеру 9, передается на переднюю траверсу 17 и на колонны прессы 11. Один торец контейнера опирается на переднюю поперечину (траверсу), другой закрыт крышкой 8, на которую давит главный плунжер, передавая все усилие прессования. Крышка плотно прижата к контейнеру, с обеспечением беззазорного соединения, удерживающего давление газа внутри контейнера (до 2000 атм.).

Таким образом в рабочем пространстве изостата образовано два замкнутых пространства: одно – внутри колпака, другое – между колпаком и контейнером. В эти объемы подается газ, инертный к образцам (например, азот). Магистрали подачи газа имеют индивидуальные трубопроводы и вентили. После подачи газа вентили 14 и 15 закрывают.

Газ под давлением (до 2000 атм.) действует на детали в капсулах, которые выдерживают в течение 4-5 часов при заданной температуре (до 1200°С). Все это время пресс держит систему под давлением. Мощность прессов-изостатов достигает 400 МН (при этом планируется строительство прессов еще большей мощности).

После выдерживания заданного режима давление газа из полостей рабочего пространства "сбрасывают", а газ удаляют. Давление жидкости

(320 атм.) из главного цилиндра и плунжера снимают, жидкость высокого давления 16 удаляют. Поднимают крышку контейнера и снимают колпак термофиксации, извлекают изделия.

Порошок (гранулы) деталей под действием высокой температуры и давления спекаются в монолитную деталь.

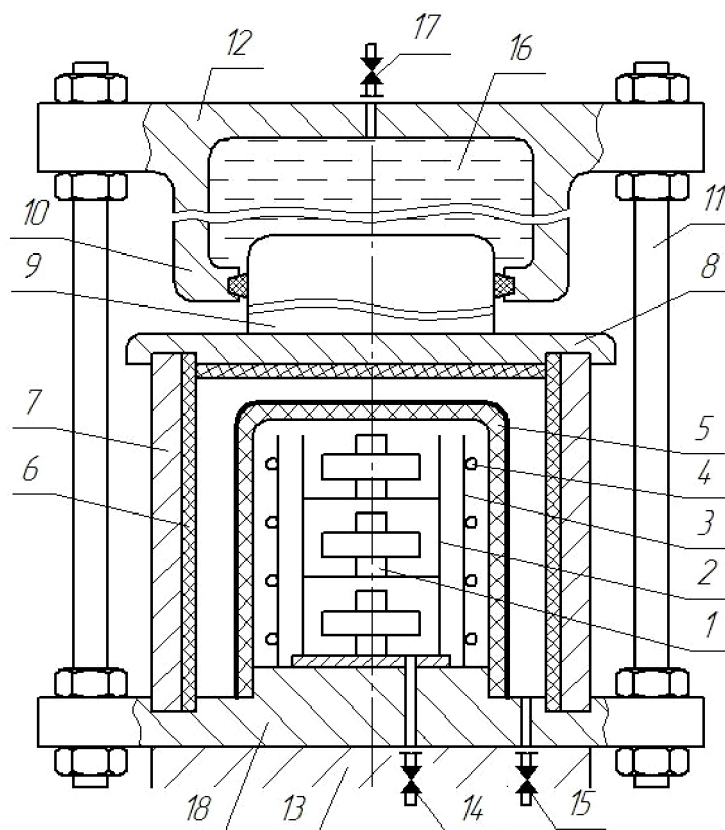


Рис. 19 Схема процесса изостатического прессования: 1 – обрабатываемые детали; 2 – кассета размещения; 3 – установочный цилиндр; 4 – нагреватели; 5 – термоколпак; 6 – внутренняя (силовая) втулка контейнера; 7 – наружная (термозащитная) втулка контейнера; 8 – крышка контейнера; 9 – главный плунжер; 10 – главный цилиндр изостата; 11 – колонны изостата; 12 – задняя траверса; 13 – фундаментная плита; 14, 15 – вентили управления внутренней атмосферой; 16 – жидкость высокого давления; 17 – вентиль подачи жидкости высокого давления; 18 – передняя траверса

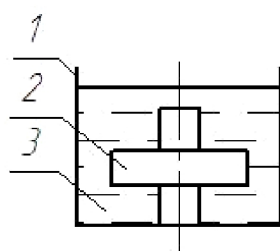


Рис. 20 Схема стравливания капсулы:
1 – резервуар травления; 2 – деталь в оболочке; 3 – травитель

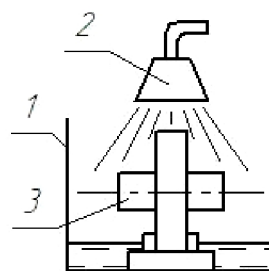


Рис. 21 Схема промывки изделия:
1 – промывочная ванна; 2 – душирующее устройство; 3 – изделие

7. *Стравливание капсулы* (рис. 20) – производится в азотной кислоте, требует строгого соблюдения норм обработки и утилизации отходов во избежание экологического ущерба.

8. *Промывка изделия* (рис. 21) – как и предыдущая стадия, требует жесткого выполнения экологических норм.

9. *Сушка изделия* (рис. 22) – осуществляется в технологической цепочке по известным режимам с температурой нагретого воздуха 80-120°C.

10. *Закалка изделия* (рис. 23) – осуществляется для получения наибольшей прочности; проводится по режимам, соответствующим закалкаемым сплавам.

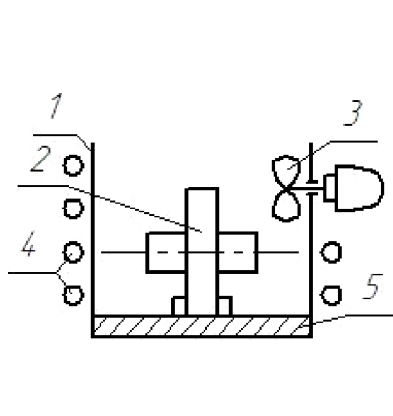


Рис. 22 Схема сушки изделия:
1 – сушильная камера; 2 – изделие;
3 – вентилятор; 4 – нагреватели;
5 – съемный поддон

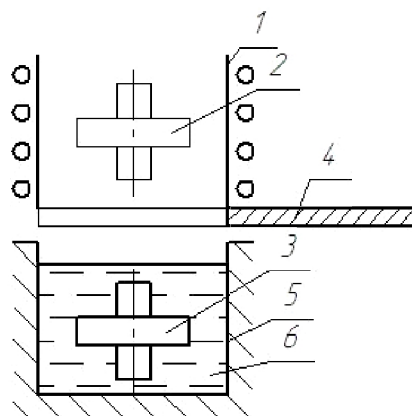


Рис. 23 Схема закалки изделия: 1 – печь нагрева под закалку; 2 – нагреваемое изделие; 3 – охлаждаемое изделие; 4 – снятый поддон; 5 – емкость закалочной среды; 6 – закалочная среда

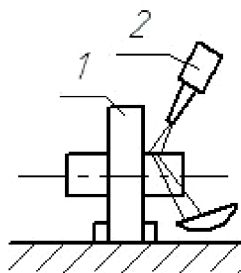


Рис. 24 Схема ультразвукового контроля изделия: 1 – изделие; 2 – прибор ультразвукового контроля

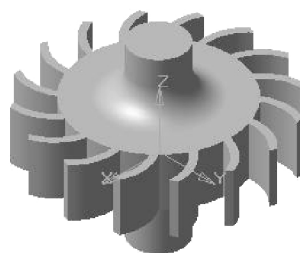


Рис. 25 Монолитный диск с лопатками ("блиск")

11. *Проверка и контроль изделия* (рис. 24) – проводится методами ультразвукового, акустического, рентгеновского контроля и другими видами контроля.

Профили и детали, полученные после изостатического прессования, обладают наилучшими свойствами и качеством из всех известных способов изготовления аналогичных изделий. Прочность дисков и валов из гранул, обработанных в газостате, составляет для жаропрочных сплавов, например, ЭП741НП на никелевой основе – $\sigma_b = 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1020$ МПа. Эти изделия используют для основных опорных деталей авиационных двигателей типа РД33, Д30Ф6 и двигателей 5-го поколения типа АИ222-15С [20].

Изостатическое прессование гранул позволяет отказаться от традиционного крепления лопаток турбин в виде "ласточкина хвоста" и выполнять прессованием диски с лопатками, как единое целое (рис. 25) – "блиски" [20].

Изостатическое прессование гранул позволяет производить биметаллические изделия. Манипулируя распределением гранул (порошка) разных сплавов по толщине капсулы, получают различные соединения: сталь – никелевые, сталь – титановые, никель – титановые и другие.

Дополнительно мощным направлением технологии является применение изостатов в литейном производстве. Известно, что газовые пузыри внутри литых деталей являются распространенной причиной брака литья. Выдерживание отливок в зоне изостата устраняет внутреннюю пористость, повышает механические свойства и ставит литье в число конкурентов на замену технологий, базирующихся на обработке металлов давлением. Для конструкторов это позволяет убрать крепежные детали и снизить вес конструкции, что важно для летательных аппаратов.

Достоинства описанной технологии изостатического прессования дают основание считать, что на ближайшие 30-40 лет технология будет оставаться лидирующей в производстве профилей из труднодеформируемых сплавов на основе алюминия, никеля, титана и железа. У технологии гранул и изостатического прессования – большое будущее.

Технологические линии завода будущего должны строиться по принципу цехов полупроводников – высочайшая культура труда, соблюдение вакуумной гигиены, постоянный контроль за чистотой воздуха и помещений.

12 Прессование титановых сплавов

12.1 Особенности и инновационность проблемы

Титан и его сплавы являются признанными конструкционными материалами, которым свойственны:

- прочность порядка $\sigma_b \approx 1600$ МПа;
- высокая коррозионная стойкость;
- теплостойкость (сохранение высокого уровня прочности) до 800-850°C;
- относительно низкая плотность ($\gamma = 4,5$ г/см³);
- лучшие среди конструкционных материалов удельные прочностные показатели (σ_b/γ);
- низкая теплопроводность, близкая к бетону.

Эти важнейшие особенности определили целесообразность использования титановых сплавов в следующих комплексах и областях: газотурбинные двигатели, конструкции военных и гражданских самолетов, ракеты и космические аппараты, подводные лодки, надводные суда, автомобилестроение, строительство, медицинские имплантаты, оборудование для химических и пищевых производств, бытовая техника.

Производство прессованных профилей из титана началось с середины XX века. С учетом высокой потребности на изделия из титана, инвестирование в титановую отрасль считается весьма перспективным и нарастает как в технически развитых странах (США, Япония), так и в развивающихся (Тайвань, Китай). Так, в США в каждом из новых самолетов (рис. 26) для вооруженных сил предполагается использовать от семи до шестидесяти тонн титана. Также намечается широкое применение титана в автомобилестроении: в США рассматривается возможность выпуска полностью титанового автомобиля [5].



Рис. 26 Новый американский истребитель-бомбардировщик F-22 с большим количеством титана в конструкции

Титановые сплавы находят широкое применение в различных нержавеющих предметах быта. Так, государство Тайвань на небольших предприятиях осваивает технологии обработки титановых сплавов и заполняет во всем современном мире нишу производства товаров бытового назначения, пользующихся повышенным спросом. Крупным потребителем титана для энергетического машиностроения выступает Китай.

Получение металлического титана из руды является энергоемким и трудоемким процессом, поэтому титан вплоть до настоящего времени считался "экзотическим" металлом. Однако появились сообщения [5] о технологиях, существенно облегчающих получение металлического титана из руд.

Запасы титановой руды имеются в России в достаточном количестве, хотя разработка их ведется слабо, поскольку до последнего времени титановую руду получали с Украины.

В связи с тем, что "титановая отрасль" находится в авангарде, на острие развития современной авиационно-космической и машиностроительной отрасли, производство изделий из титана реально важнейшая крупная инновационная идея для машиностроительных регионов страны, в том числе для Самарского региона.

12.2 Титановые сплавы как материал для прессования

Особенности прессования титановых сплавов обусловлены свойствами титана и его сплавов и заключаются в следующем.

1. Титан имеет два полиморфных состояния: α -состояние при температуре ниже 882°C с гексагональной плотноупакованной кристаллической

решеткой и β -состояние при температуре выше 882°C с кубической объемно центрированной кристаллической решеткой.

α -состояние характеризуется низкой пластичностью, β -состояние – высокой. Поэтому прессование следует вести в области температур, где присутствует ($\alpha + \beta$)-структура – при 800-1000°C.

Охлаждение после прессования приводит к нестабильности свойств, т.к. у β -фазы продолжается фазовый переход. Поэтому для сохранения стабильности титановых сплавов при соответствующей температуре используют металлы-стабилизаторы, добавляемые в небольших количествах в расплав. Например: алюминий, олово, цирконий стабилизируют α -состояние; молибден, вольфрам, ванадий – β -состояние. Совместная добавка α - и β -стабилизаторов удерживает от распада ($\alpha + \beta$)-модификацию как комплекс. В промышленно применяемых сплавах чаще всего используется именно ($\alpha + \beta$)-структурное состояние.

Таким образом, первой особенностью титановых сплавов как материала для прессования является поддержание ($\alpha + \beta$)-структуры посредством необходимого химсостава и выдерживание температурного интервала прессования в пределах 800-1000°C.

2. Титан и его сплавы налипают на инструмент, поэтому требуется применение смазок. В качестве смазок используют расплавы солей хлористого бария и натрия, а также стеклянную крошку.

3. Вследствие низкой теплопроводности течение титановых сплавов при прессовании отличается сильной неравномерностью, что вызывает образование значительной пресс-утяжины, приводящей к недопустимо высоким технологическим отходам и экономической неэффективности процесса.

Для уменьшения пресс-утяжины и создания экономически приемлемого процесса увеличивают скорость деформации. Для этого доводят давление в контейнере до предельно возможного по условию прочности контейнерных сталей. В настоящее время для горячих процессов это давление составляет примерно 800 МПа.

Скорость истечения титановых сплавов достигает 15-20 м/мин, что можно оценить в сравнении с труднодеформируемыми алюминиевыми сплавами как высокую.

4. Прессование титановых сплавов сопровождается интенсивным износом инструмента: стойкость матриц не превышает 2-3 прессовок.

Традиционные подходы по увеличению износостойкости инструмента – упрочнение поверхностного слоя инструмента износостойкими покрытиями и разработка более теплостойкой матричной стали – дороги, но применимы в связи с особой важностью решаемой проблемы.

12.3 Объекты инновационной привлекательности в технологии производства титановых профилей

Производство профилей из титановых сплавов является объективной необходимостью современности в связи с развитием космонавтики и сверхзвуковой авиации, а также перспективности в автомобилестроении.

12.3.1 Толстостенные профили и панели

Эти профили применяют в силовом каркасе самолетов и двигателей, в компрессорах тепловых и газовых турбин, в нефтеперерабатывающих и химических производствах. Типы размеров освоенных профилей приведены на рис. 27.

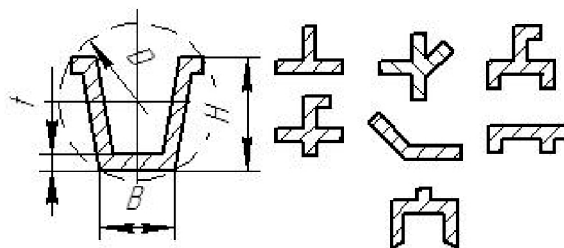


Рис. 27 Толстостенные профили из титановых сплавов ВТ6 и ВТ22:
 $t = 6-50$ мм, $H = 100-250$ мм, $B = 100-250$ мм, $D = 340$ мм, длина – до 6,5 м

Особенностью профилей является значительная толщина и широкое поле допусков элементов, т.к. профили у заказчика подвергаются механической обработке. Допуски на размеры позволяют использовать в качестве материала матриц теплоустойчивые инструментальные стали.

Прессование осуществляют прямым методом через плоские матрицы. В качестве смазки при прессовании используется стеклянная крошка, мас-сой которой обмазывают слиток либо применяют в виде скомпактированных шайб. После прессования затвердевшую хрупкую смазку удаляют с поверхности профилей механическим скалыванием.

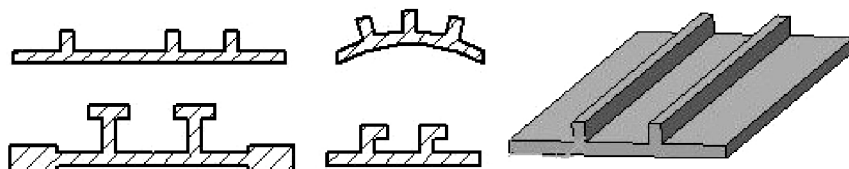


Рис. 28 Прессованные панели из титанового сплава ВТ20:
толщина полотна, высота стрингера – 6-30 мм, ширина полотна – до 400 мм

Прессованные панели приведены на рис. 28. Особенности их изготовления в основном совпадают с технологией прессования толстостенных профилей.

12.3.2 Тонкостенные профили

Потребность в тонкостенных профилях постоянно увеличивается [5], их основными потребителями являются: аэрокосмический комплекс, автомобилестроение и строительство. На рис. 29 представлены некоторые типичные представители освоенного сортамента профилей [14].

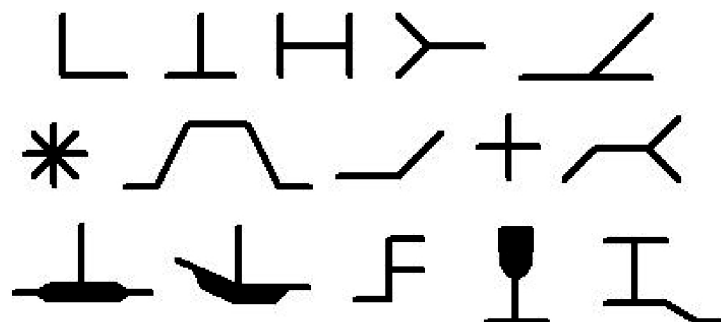


Рис. 29 Сечения тонкостенных профилей из титановых сплавов ОТ4, ВТ20: диаметр описанной окружности – до 180 мм; толщина полки – 1,2-1,5 мм; допуск на толщину – 0,15-0,25 мм; длина – 4 м

Повторение технологии, применяемой для изготовления толстостенных профилей, в случае тонкостенных невозможно по ряду технических обстоятельств.

1. Малый допуск на толщину полки профиля требует снижения интенсивности износа инструмента.

Повышение износостойкости возможно при использовании разработанной технологии плазменного напыления молибдена на поверхность матриц с последующим нанесением слоя двуокиси циркония. Основным металлом матриц является теплостойкая инструментальная сталь.

2. В связи с упругой деформацией матриц и инерционностью потока металла заполнение щели, формирующей полку профиля, затруднено, вследствие чего происходит неполное формирование полок. Решение было достигнуто использованием профилированной заходной воронки очка матрицы.

3. Затрудненность отделения пресс-остатка.

Решение данной проблемы привело к разработке иного, чем традиционный, способа отделения пресс-остатка, который заключается в вытес-

нении объема пресс-остатка через канал матрицы посредством утолщенной смазочной шайбы, установленной на торце слитка. В качестве смазки используется вязкая масса, состоящая из стеклянного порошка со связующей. Схема прессования по описанной усовершенствованной технологии представлена на рис. 30.

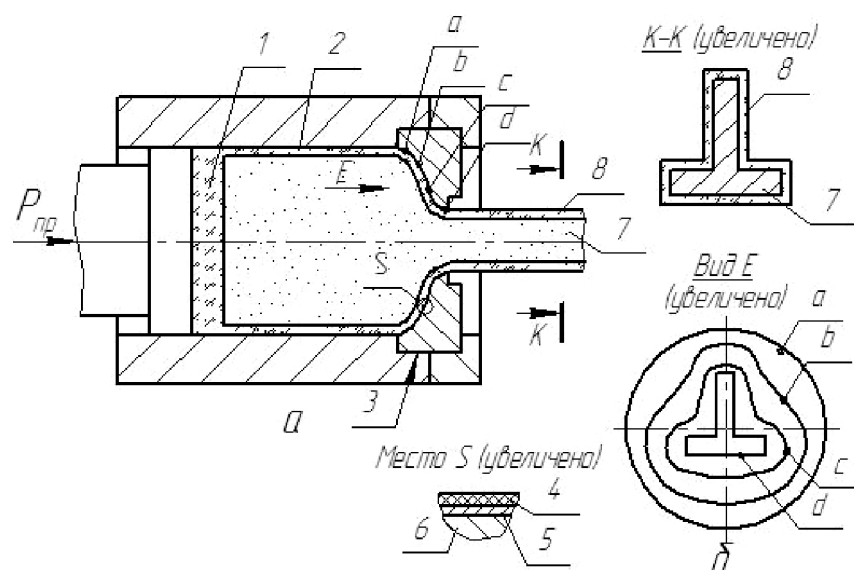


Рис. 30 Прессование тонкостенных титановых профилей: а – схема процесса; б – профилированное входное отверстие с поверхностным теплозащитным покрытием; 1 – смазочная стекло-шайба; 2 – слой смазки; 3 – плотная посадка; 4 – слой двуокси циркония; 5 – напыленный слой молибдена; 6 – металл матрицы; 7 – профиль; 8 – остаточный затвердевший смазочный слой

4. Повышенная точность размеров (полка толщиной 1,2 мм – допуск + 0,15 мм) – достигается использованием калибровки на специальном прессе пульсирующей нагрузки [15]. Схема деформации показана на рис. 31.

Пресс пульсирующего нагружения (ППН-3,15) представляет собой одноплунжерную радиальную ковочную машину усилием 3,15 МН с частотой перемещения плунжера 5-10 Гц. Обжатие длинномерной заготовки производится локально по всему периметру последовательно по всей длине.

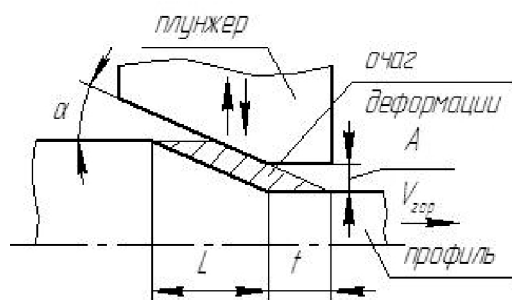


Рис. 31 Кинематическая схема обжатия профиля за один ход плунжера прессы пульсирующего нагружения: L – длина деформационной зоны; t – шаг подачи; A – амплитуда; α – угол штампа

Возникновение очага пластической деформации за счет локального нагружения происходит при относительно небольшой общей силе, что позволяет вести обработку в холодном состоянии. Горизонтальная скорость $V_{гор}$ деформированного профиля составляет 1-1,5 м/мин, что близко к скорости прессования [16]. При необходимости процесс можно вести в нагретом состоянии, что позволяет увеличить обжатия.

12.3.3 Полые и петельные профили

Изготовление полых и петельных профилей (рис. 32) стало возможным после освоения технологии прессования титановых сплавов со сваркой давлением. Этот способ прессования применительно к титановым сплавам является особенно сложным, поскольку процесс идет при высоких температурах (800-1000°C) и давлениях (800 МПа) на металле, склонном к схватыванию с инструментом.

Технология создана [17] на основе следующих технических решений:

- создание специализированного вертикального гидравлического прессы с двойной прошивной системой в комплексе с нагревательными печами;

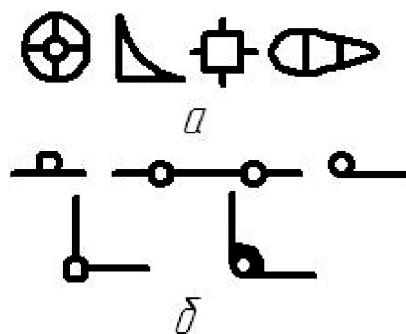


Рис. 32 Примеры сечений полых (а) и петельных (б) профилей

- освоение нанесения теплозащитного слоя керамики на рабочие поверхности комбинированной матрицы;
- применение в конструкции специальных профилированных полостей – форкамер;
- создание в инструменте расчетной зоны сварки на основе интегратора ЭГДА;
- ведение процесса с образованием "рубашки";
- разработка способа и устройства для удаления пресс-остатка методом отрыва из полости комбинированной матрицы.

Схема прессования профилей с полостями из титановых сплавов через комбинированную матрицу показана на рис. 33.

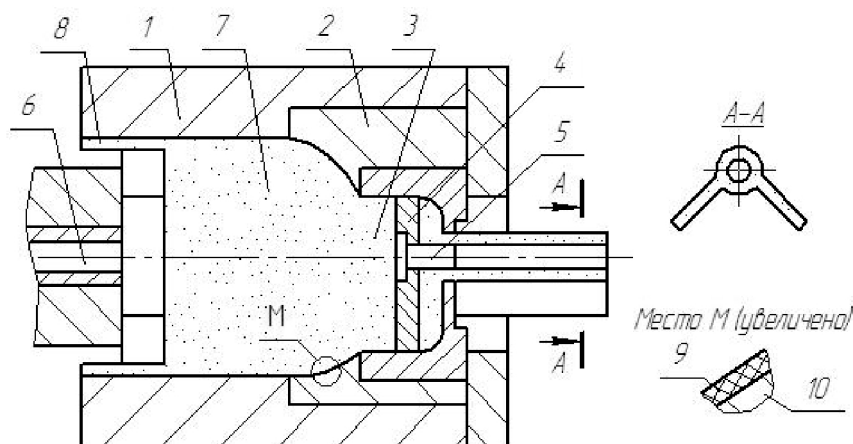


Рис. 33 Схема прессования титановых профилей через комбинированную матрицу: 1 – контейнер; 2 – профилированная воронка; 3 – профилированная форкамера; 4 – рассекатель; 5 – игла; 6 – дополнительная игла; 7 – заготовка; 8 – "рубашка"; 9 – теплозащитная керамика; 10 – тело инструмента

Все инновационные процессы получения титановых профилей на основе процессов выдавливания и пульсирующейковки являются "высокими технологиями" и при современном направлении развития аэрокосмического комплекса, транспорта, строительства, химического и пищевого машиностроения объективно необходимы и неотъемлемы от перспективы развития России как крупнейшей мировой державы. Поэтому изложенные технологии инвестиционно привлекательны с учетом будущего развития. Именно поэтому студентам – будущим специалистам в области обработки металлов давлением – следует тщательно изучать перечисленные техни-

ческие решения, поскольку их личная карьера в будущем напрямую зависит от компетентности в особенностях инноваций.

13 Производство биметаллов

Биметаллические элементы конструкций – весьма распространенное и все более расширяющееся явление современной техники. Это вызвано, как правило, стремлением удешевить продукцию, поскольку биметаллическая деталь выполняет те же функции, что и монометаллическая, но при меньших затратах дорогостоящего металла. Например, медно-стальные провода обеспечивают тот же поток электроэнергии при меньших затратах меди, чем чисто медные.

Основными способами получения биметаллических профилей и сложнопрофильных деталей являются: прессование, радиальное пульсирующее обжатие, термодиффузионная изостатическая сварка под давлением.

13.1 Плакирование прессованием

Плакирование (обволакивание тонким слоем) профилей и труб защитным слоем из антикоррозионного металла производится прессованием из заготовок с поперечно- либо продольно-размещенным плакирующим слоем (прокладкой).

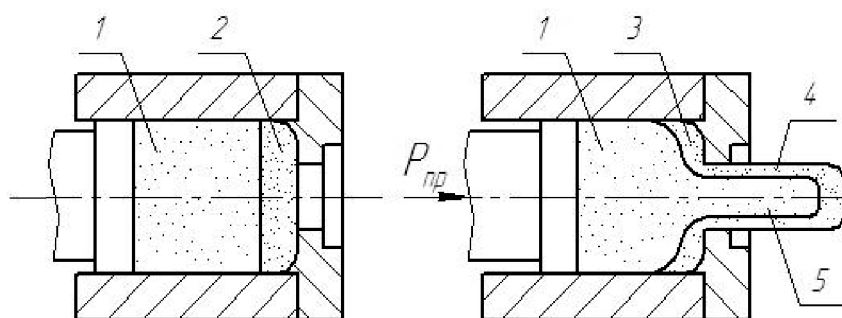


Рис. 34 Прессование с плакированием изделия из объема поперечной прокладки: 1 – основной металл; 2 – плакирующая прокладка; 3 – деформируемый объем плакировки; 4 – плакирующий слой; 5 – изделие

Схема прессования с плакированием изделия из объема поперечной прокладки показана на рис. 34. В процессе выдавливания первоначально истекает прокладка, образуя утолщение на конце изделия. Затем одновременно истекают сечения изделия и тонкий слой металла прокладки из зон затрудненной деформации. Этот слой по всему периметру покрывает по-

верхность изделия, при этом обеспечивается полная металлургическая сварка между металлом изделия и плакирующим слоем. Для облегчения истечения входную часть матрицы профилируют по линиям тока.

Способ относительно прост, однако недостатком является неравномерность плакирующего слоя по длине и разнотолщинность по сечению. Поэтому способ применяется при производстве изделий в случаях, когда на плакировку не требуется жестких допусков.

Более жесткие требования к плакировке обеспечиваются наложением наружного слоя из продольно-слоистой заготовки (рис. 35). Для повышения качества сварки слоев заготовку помещают в гильзу. Наилучших результатов добиваются в случаях дополнительного вакуумирования и заваривания комплекта крышкой.

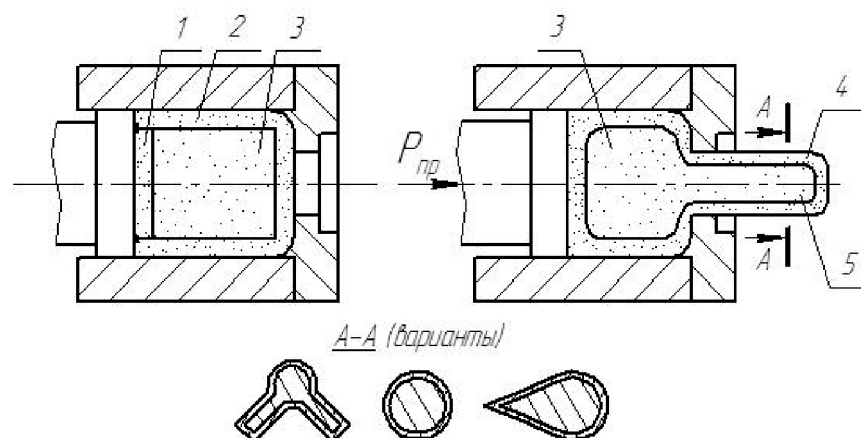


Рис. 35 Прессование биметалла с плакированием изделия из объема продольных слоев: 1 – крышка; 2 – плакирующая гильза; 3 – заготовка; 4 – плакировка; 5 – изделие

Зачастую эксплуатируемые детали из биметалла не требуют металлургической сварки слоев. В этом случае для круглых и осесимметричных деталей применяют метод наложения оболочки (рис. 36): в качестве заготовки используют полую заготовку, сердечник пропускают по оси через полую вмонтированную иглу. Наносимая оболочка может иметь ребра, например, для получения теплообменных элементов с коррозионно-стойкой вставкой.

В этом методе сердечник пластически не деформируется, поэтому металл наложенной оболочки не схватывается с металлом сердечника. Од-

нако за счет плотной посадки и сил трения элементы удерживаются без смещения даже при действии сдвигающих нагрузок.

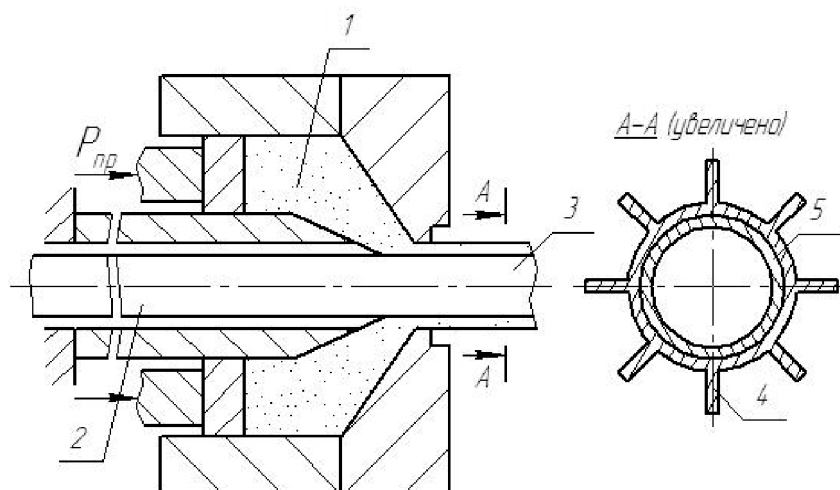


Рис. 36 Получение биметаллических изделий методом наложения оболочки:
1 – заготовка; 2 – сердечник; 3 – биметаллическое изделие; 4 – сплав 1; 5 – сплав 2

13.2 Изготовление биметаллических изделий радиальным пульсирующим обжатием

Деформация металла радиальным пульсирующим обжатием характеризуется локальным приложением нагрузки (рис. 38). Такое нагружение позволяет развить на малом участке деформируемого тела интенсивную пластическую деформацию, осуществляемую за короткое время (~0,1 с). Для соприкасающихся поверхностей разнородных металлов это важно, поскольку образовавшиеся ювенильные поверхности не успевают окислиться и схватываются, образуя прочное металлическое соединение.

Технология на основе прессы пульсирующего нагружения (ППН) с радиальным приложением нагрузки позволяет сваривать разнородные металлы практически в любом сочетании. Более того, данным методом возможно получение изделий разнообразных сечений (рис. 37).

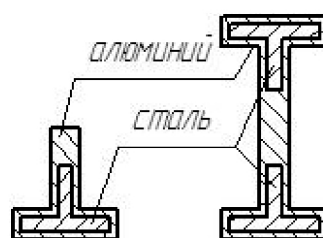


Рис. 37 Образцы биметаллических профилей "сталь"(сердечник) – "алюминиевый сплав" (основное сечение)

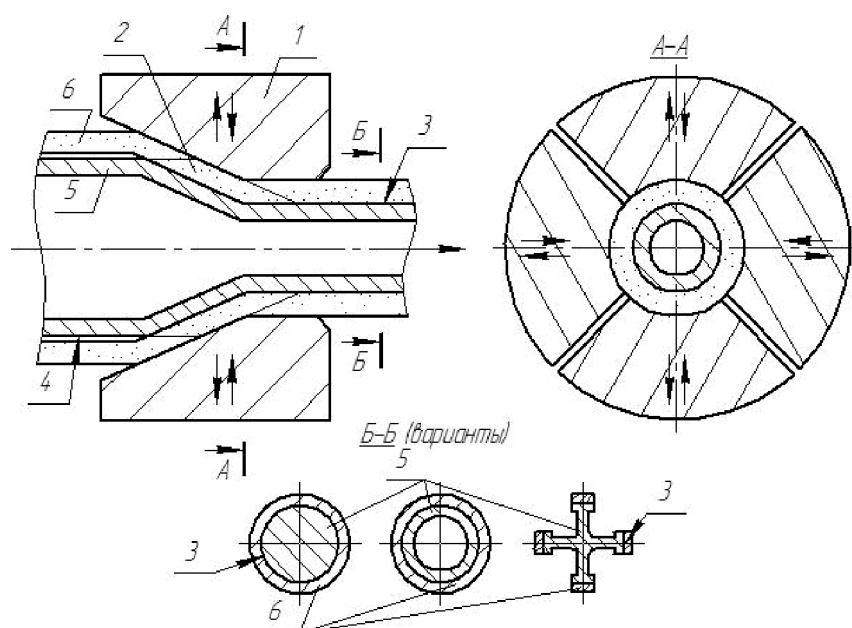


Рис. 38 Получение биметаллических соединений пластической деформацией разнородных металлов радиальным пульсирующим обжатием: 1 – плунжер; 2 – очаг деформации; 3 – металлическая связь; 4 – свободная посадка; 5 – сплав 1; 6 – сплав 2

Кинематика обжатия за один ход плунжера прессы следующая. После снятия рабочего усилия происходит полное раскрытие частей штампа на величину амплитуды его перемещения. Одновременно с помощью подающего устройства заготовку перемещают по оси на величину подачи до упора со штампом в его верхнем положении. Далее при движении штампа вниз, осуществляемого как рабочий ход, металл заготовки под действием радиально перемещающегося наклонного участка штампа получает сдвиговую деформацию и перемещается по оси. Значительная сдвиговая деформация способствует разрыву и дроблению поверхностных окисных плен и появлению ювенильных поверхностей обоих контактирующих элементов.

Особенностью способа, ограничивающей его возможности, является необходимость наличия на профилях участков, пригодных для радиального внешнего воздействия нагрузки.

Как известно из теории ОМД, создание интенсивной сдвиговой деформации в процессе нагружения способно привести к получению зерна с

мелкой структурой. Поэтому процесс деформации на ППН может быть эффективен для получения мелкого, супермелкого, а возможно, и наноразмерного зерна в изделиях промышленного изготовления.

Способ обработки металлов пульсирующей нагрузкой изучен недостаточно, его возможности раскрыты к настоящему времени неполно. Поэтому инновации, связанные с обработкой пульсирующей нагрузкой, способны принести приятные сюрпризы, как при холодной, так и при горячей обработке металлов.

13.3 Получение биметаллических изделий изостатической диффузионной сваркой

Изостатическое прессование для получения биметаллических изделий проводят так же, как для монометалла, которое описано в разделе "Изостатическое прессование". Особенностью процесса является подготовка заготовки: капсула для биметаллического изделия имеет два отдельных объема, заполняемых дозированно (рис. 39). После заполнения капсулы производится спекание в печи прессы изостатического прессования. Затем оболочку удаляют.

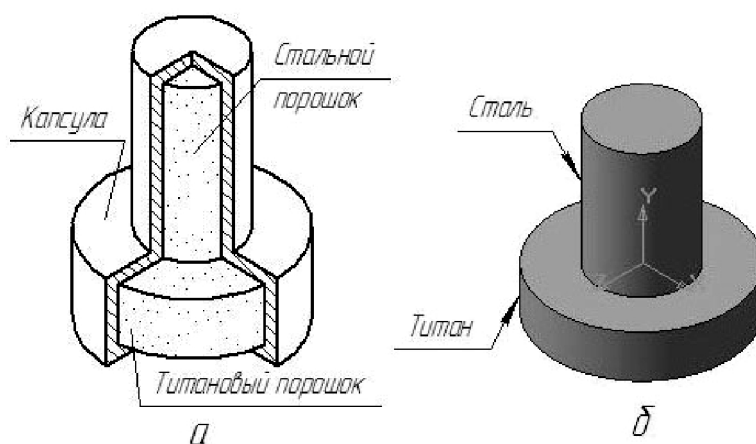


Рис. 39 Капсула, наполненная порошком разнородных металлов (а), и деталь в виде композиции "сталь – титан" (б)

Диффузионную сварку разнородных металлов проводят не только в прессе изостатического прессования, но и в специальном вакуумированном контейнере (рис. 40). Для сварки используют контейнер 1, снабженный оборудованием для глубокого вакуумирования 6. В контейнер поме-

щают элементы детали 2-4, подлежащие свариванию. Внутреннее пространство контейнера вакуумируют, при этом создаваемый вакуум должен обеспечивать полную дегазацию пространства контейнера. Все элементы контейнерной оснастки снабжают вакуумными уплотнениями 5. Свариваемые детали сдвигают незначительной силой, развиваемой тарированной пружиной 7. Развиваемая пружиной сила не должна вызывать в детали напряжения, превышающие расчетные.

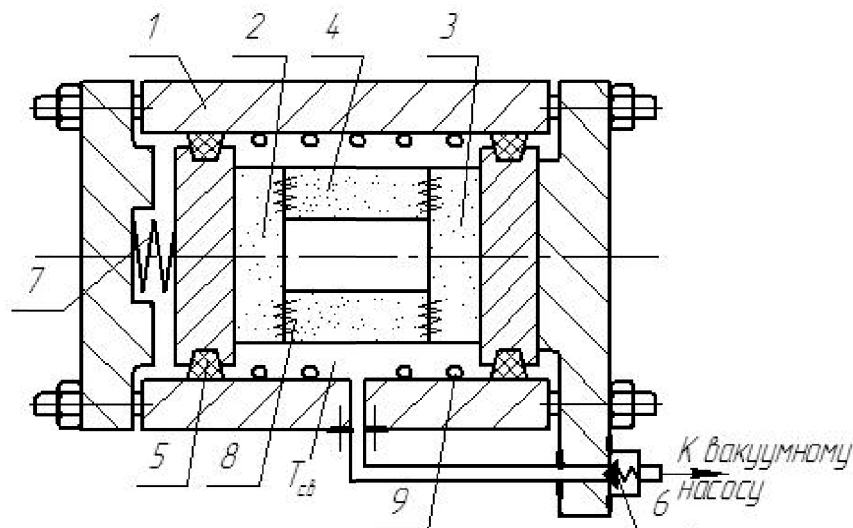


Рис. 40 Схема диффузионной сварки разнородных металлов в вакуумированном контейнере: 1 – контейнер; 2, 3 – элементы детали из сплава №1; 4 – элемент детали из сплава №2; 5 – вакуумные уплотнения; 6 – клапан вакуумирования контейнера; 7 – пружина; 8 – зоны сварки; 9 – нагреватели; $T_{св}$ – температура контейнерного пространства

Для улучшения диффузионных процессов температуру в зоне пространства контейнера повышают и поддерживают на уровне расчетных значений в течение нескольких часов. После окончания процесса контейнер разгерметизируют, детали извлекают и подвергают контролю.

Готовая деталь представляет собой монолитное изделие, у которого отсутствует зона сварки (свойства сварной зоны неотличимы от основного металла в его "мягком" представителе). Свойства материалов распределены по частям, составляющим деталь, совершенно равномерно.

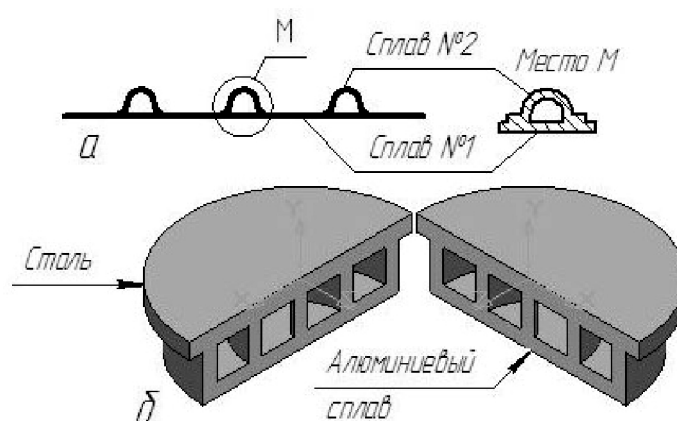


Рис. 41 Образцы деталей, получаемых диффузионной изостатической сваркой: панель (а) и деталь с внутренними полостями (б)

Диффузионная сварка применима также для получения тонколистовых и полых деталей (рис. 41) [21]. Это обстоятельство открывает широкие перспективы в двигателе- и самолетостроении:

- появляется возможность изготавливать полые и ячеисто-заполненные лопатки турбин из композиционных материалов;
- панели из особо прочных сплавов могут быть получены из тонкого и дешевого катаного листа (полотна) с использованием разнородных ему по металлу стрингеров.

Полые лопатки турбин, сообщение о которых исходят от всемирно известной фирмы Rolls-Royce, являются, несомненно, новым этапом в двигателестроении. Возможность получать полые детали, открываемая диффузионной изостатической сваркой, обеспечит возможность произвести существенные усовершенствования в самых различных областях техники. Например, изготовление точных панелей методом, отличным от прессования, может удешевить производство и уменьшить вес летательных аппаратов.

Посредством диффузионной сварки осуществляют сваривание материалов самых разнообразных композиций, в том числе "металл – керамика". Применение новых двухслойных композиций в двигателях позволяет поднять температуру их рабочей зоны и повысить КПД.

14 Получение композиционных материалов

Композиционные материалы (КМ) – материалы, образованные объемным сочетанием химически разнородных компонентов с четкой границей

раздела между ними, при этом характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из отдельно взятых компонентов. Композиты по прочности, жесткости и другим свойствам превосходят все конструкционные материалы.

В зависимости от способа изготовления и упрочнения композиционные материалы разделяют на волокнистые (упрочненные волокнами), дисперсно-упрочненные (упрочнитель – дисперсные частицы) и слоистые (полученные прессованием, либо совместной прокаткой разнородных материалов).

Изготовление слоистых композиционных материалов с использованием прессования – процесс, аналогичный получению биметалла методом нанесения оболочки.

Получение профилей из дисперсно-упрочненных и волокнистых материалов включает:

- 1) приготовление однородного состава в виде порошка основного металла ("матричная основа") с добавлением порошка (волокон) упрочнителя;
- 2) вакуумирование полученной смеси в гильзе;
- 3) удаление гильзы;
- 4) выдавливание заготовки из композиционного материала в профиль (схема процесса выдавливания аналогична прессованию цельного металла).

Примером дисперсно-упрочненного материала является спеченный алюминиевый порошок (САП), который широко применяется в аэрокосмической технике. Состав САП: 8-17% Al_2O_3 , остальное алюминий. Этот материал значительно превосходит алюминиевые сплавы по теплостойкости.

В композиционных материалах с волокнистым упрочнителем в качестве матричной основы применяют порошок металла, а в качестве наполнителя – металлические "усы" из углерода, бора, меди и др. Металлические "усы" – это вытянутые кристаллы с идеальной кристаллической решеткой, прочность которых на 2-3 порядка выше, чем у основного материала.

Материалы с волокнистым наполнителем характеризуются повышенной прочностью и упругостью. Как правило, эти композиты обладают значительной анизотропией и используются в основном в виде листов.

Обработка определяется свойствами соединяемых компонентов. В части, относящейся к прессованию, обработка волокнистых композиционных материалов аналогична обработке дисперсно-упрочненных материалов.

15 Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией (ИПД), обеспечивающие получение наноструктуры

Интенсивной пластической деформацией (ИПД) называют такую деформацию, которую можно свести к простому сдвигу [23].

Деформированное состояние, характеризуемое условиями, близкими к простому сдвигу, наблюдается в случаях плоской деформации в процессах: проглаживания поверхности твердым индентором (рис. 42, а), обработки дробью (рис. 42, б), кручения тонкого диска под давлением (рис. 42, в). Однако при плоском деформировании глубина проникновения пластической зоны внутрь металла – мала, поэтому для развития ИПД в больших объемах приведенные на рис. 42 способы не подходят.

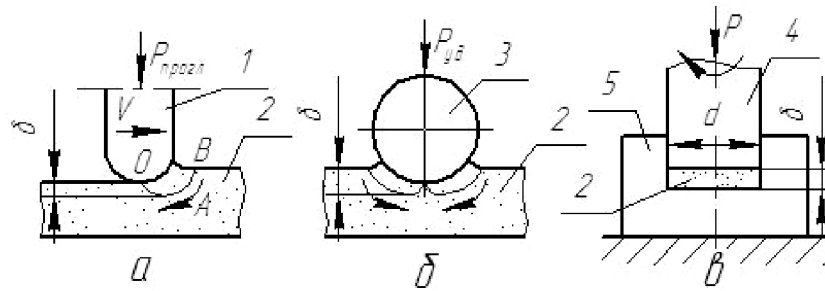


Рис. 42 Схемы плоского деформирования: прогладка (а), удар упругой дробью (б), кручение (в); 1 – индентор; 2 – образец; 3 – упругий шар; 4 – пуансон; 5 – опора

Деформация простого сдвига в объеме металла, достаточном для изготовления изделий, достигается: при осаживании цилиндра (рис. 43), равноканальном угловом прессовании (РКУП) (рис. 44), "винтовом" прессовании (рис. 45), "сдвиг"-прессовании (рис. 46), прессовании через матрицу с профилем "песочные часы" (рис. 47). Следует заметить, что эти способы прессования в настоящее время нуждаются в отработке на промышленном уровне и являются перспективными в реализации.

Чем же вызван интерес к ИПД? По информации исследователей [22, 23] металл, подвергнутый ИПД, позволяет получить супермелкое зерно – так называемую наноструктуру. Наноструктурой называют структуру с размером зерна 100 нм и менее ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, т.е. одна миллиардная доля метра). Соответственно зерно размером от 100 нм до 1000 нм (0,1-1 мкм, т.е. до одного микрона) считают ультрамелким; зерно от 1000 нм до 2000 нм (1-20 мкм) – мелким.

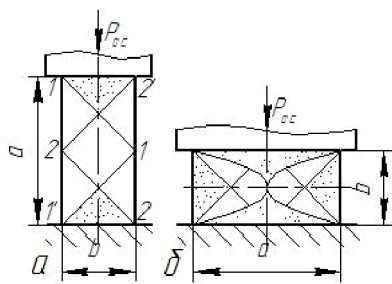


Рис. 43 Осаживание цилиндра (а) с кантовкой на 90° (б)

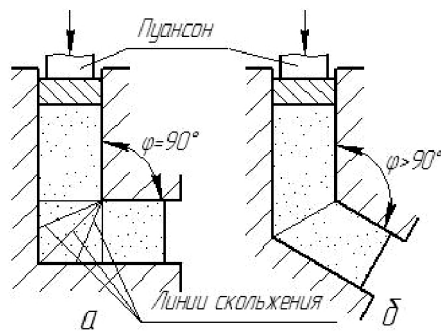


Рис. 44 Равноканальное угловое прессование

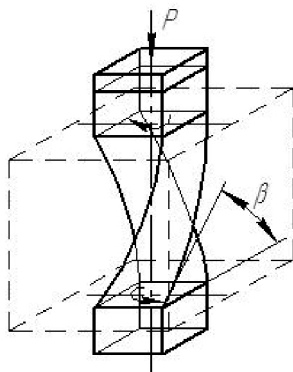


Рис. 45 Схема "винтового" прессования (пунктиром обозначена матрица)

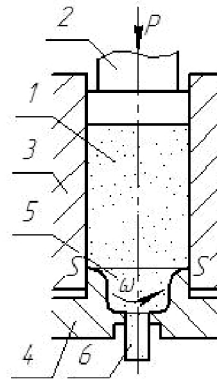


Рис. 46 Схема "сдви"-прессования: 1 – заготовка; 2 – пресс-пистон; 3 – контейнер; 4 – матрица; 5 – форкамера; 6 – изделие; S-S – плоскость простого сдвига металла

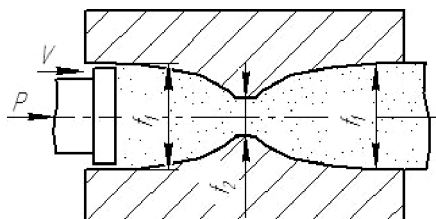


Рис. 47 Схема прессования через матрицу "песочные часы"

Известно, что мелкозернистая структура обеспечивает стабильность свойств. Кроме того, оказалось, что металлы, деформированные до состояния наноструктуры, приобретают новые для них свойства, в том числе – повышенные прочность, пластичность, упругость. В ряде случаев отмечена сверхпластичность (!). Было обнаружено, что некоторые металлы при отжиге в наноструктурном состоянии повышают свою прочность и пластичность одновременно, что является уникальным явлением в металловедении и дает основание предполагать о существовании и других, не раскрытых аномалий свойств у металлов.

Перечисленные перспективы выдвинули проблему получения наноматериалов в число ведущих в мировой науке. Подсчитано, что мировой рынок продукции на базе нанотехнологий через 10 лет будет представлен объемом более 1 триллиона долларов.

Получение металлических наноматериалов в виде заготовок с объемом, достаточным для производства изделий, может быть осуществлено тремя путями: компактированием порошков с наноразмерными частицами, деформированием цельного металла по схемам со сдвигающими напряжениями и вытягиванием изделий из жидкого металла.

Первый вариант имеет недостаток, заключающийся в возможном "загрязнении" основного металла частицами износа шаровых мельниц при подготовке порошка. Если на уровне субмикроструктуры такое "загрязнение" после просеивания и очистки не оказывает влияния на свойства металла, как показывает опыт изостатического прессования, то на уровне наноструктуры влияние частиц износа может быть заметным. Фактическое влияние определится после тщательной экспериментальной проверки.

Трудности второго способа (рис. 44) заключаются в том, что достижение чистого сдвига, четко определяемого теоретически, в реальных условиях неосуществимо. "Плоскость сдвига" в реальном измерении представляет собой (с учетом зеренного строения металла) некоторый объемный слой толщиной, сравнимой с макроразмерами зерна. Кроме того, поворот потока металла вокруг радиуса, приближенного к нулевому значению размера, невыполним по условиям изготовления инструмента и физическим условиям деформирования. Поворот потока производят исходя из возможности пропрессовки металла через канал, используя радиус минимально достижимого размера и с учетом сил трения металла о стенки канала. Вследствие существенного отклонения от теоретических (расчетных) условий крупное зерно заготовки может быть измельчено не за один, а за несколько пропусков металла через канал (от 4 до 50).

Таким образом, получение наноструктуры методом РКУП является трудоемким процессом. Его освоение требует решения конструкционных и деформационных вопросов. После чего может быть получена наност-

руктура с новыми, до настоящего времени часто неизвестными свойствами материалов.

Измельчение зерна происходит при холодной деформации. Деформация же с нагревом одновременно вызывает рост зерен вследствие рекристаллизации. Вместе с тем холодная деформация ограничена исчерпыванием ресурса пластичности, вследствие чего деформирование прекращают из-за появления в некоторых местах трещин разрушения. При этом ресурс пластичности по изделию в целом к моменту местного трещинообразования не достигает предела. На физическом уровне холодную деформацию традиционно заканчивают после насыщения плоскостей скольжения зерен дислокациями.

Применение простого сдвига для сильно нагартованного металла позволяет продолжать деформирование и не только избежать разрушения, но и добиться включения нового механизма деформации – ротационного гранично-зеренного перемещения. Деформация простого сдвига после исчерпывания плоскостей легкого скольжения дислокаций приводит к фрагментации (дроблению) зерен путем отрыва по дислокационным границам. После этого вступает в действие механизм ротационного перемещения фрагментов зерен в веществе межзеренных прослоек. Дальнейшая деформация на микроуровне происходит за счет продолжающегося дробления зерен при их ротационном зернограничном перемещении.

Изложенный упрощенный механизм пластической деформации, приводящий к образованию наноструктурного состояния, изображен на рис. 48.

В настоящее время металлы в наноструктурном состоянии расцениваются, как конструкционные материалы нового поколения [5]. Наноструктурное состояние металла – это обширная область для исследований с перспективой выхода результатов в ведущие отрасли техники с большим эффектом.

Поиск способа измельчения зерна при использовании РКУП с одновременным уменьшением трудоемкости получения изделий привел к появлению модернизированного способа: РКУП с параллельными каналами [26] (рис. 49). В новом инструменте берут: угол поворота потока $\Phi \approx 100-110^\circ$; расстояние между осями каналов $K \approx D_K$. Это позволяет снизить усилие прессования и обеспечивает уменьшение отходов на продавленные концевые участки.

Уменьшение силы прессования позволило получать за 4 прохода выпрессованные изделия из меди в наноструктурном состоянии диаметром 60 мм и длиной 240 мм. Такие размеры уже приемлемы к использованию в качестве заготовок для производства реальных промышленных полуфабрикатов (или деталей).

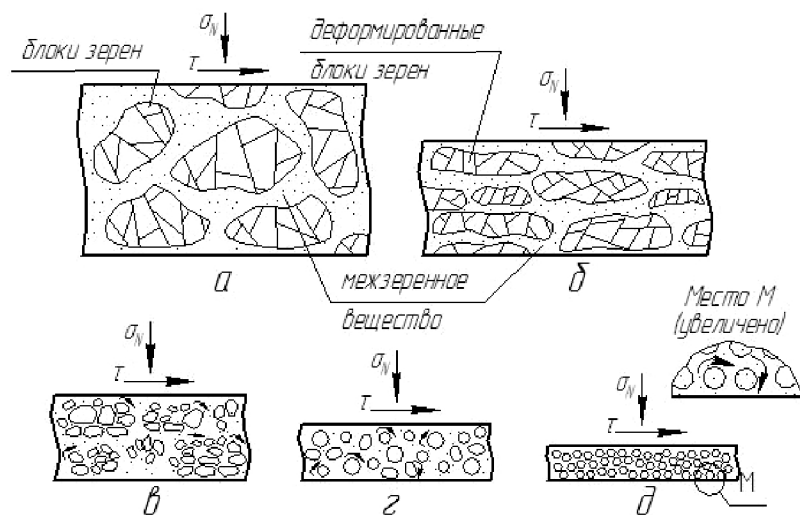


Рис. 48 Схема механизма деформации при получении наноструктурного состояния: а – начало деформационного процесса (деформация по плоскостям скольжения); б – внутриблочная и внутризеренная деформация дислокаций; в – фрагментация зерен разрывом по дислокационным границам; г – ротационная деформация зерен по механизму зернограницного перемещения с продолжающейся фрагментацией; д – предел деформационного измельчения зерен

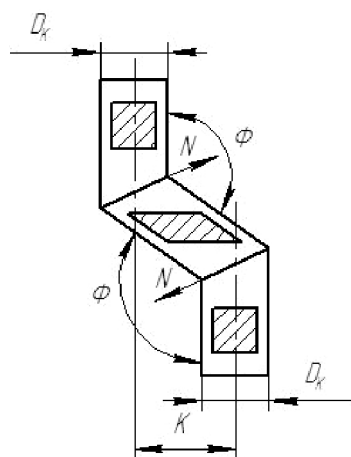


Рис. 49 Схема равноканального углового прессования с параллельными каналами: N – направление сдвига

Перспективным направлением развития является встраивание матрицы РКУП в механизм конформ-прессования (рис. 50). Это позволяет увеличить выход годного и существенно поднять производительность получения полуфабрикатов в наноструктурном состоянии [26].

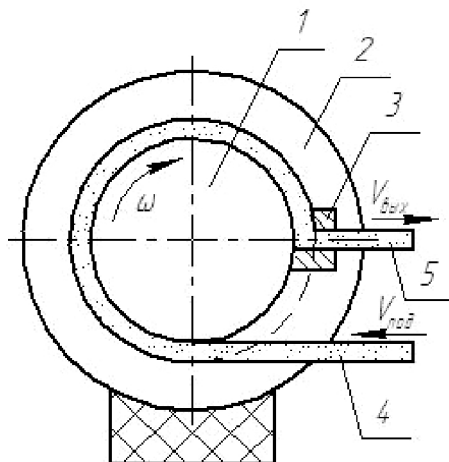


Рис. 50 Принципиальная схема РКУП-конформ-процесс: 1 – подвижный барабан; 2 – неподвижный корпус; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – изделие

В работе [27] сообщено о создании специализированного нового гидропресса с подвижным контейнером для прессования изделий из железных порошков с использованием активных сил трения. Этот пресс может быть использован для осуществления встречно-возвратного прессования через матрицу типа "песочные часы". Схема процесса показана на рис. 51.

Заготовка 5 выпрессовывается через матрицу с плавно сужающимся, а затем расширяющимся каналом (типа "песочные часы") в изделие 6 (рис. 51, а). Затем движением встречного пуансона 4 "изделие" 6, становящееся заготовкой 7, вновь выдавливается в левую часть контейнера и становится изделием 8 (рис. 51, б). Это прессование методом "туда – обратно" обеспечивает глубокую проработку металла и при многократном повторении способно приводить к ультрамелкой структуре. Предполагают, что такая технология позволит получать наноструктурный материал в большом количестве и объеме.

Следующим перспективным для промышленности способом получения наноматериалов представляется предложение, описанное в работе [28]. Металлическую заготовку помещают в матрицу, установленную на плите с большой шероховатостью. На заготовку давят полым пуансоном,

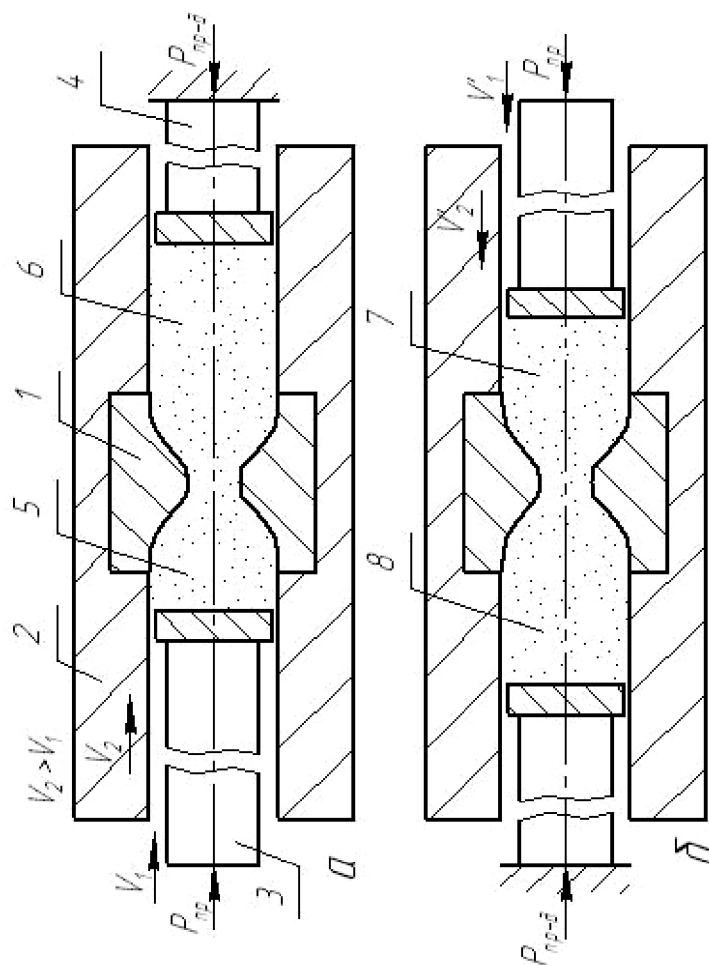


Рис. 51 Схема многократного встречно-возвратного прессования с активным трением через матрицу типа "песочные часы" для получения наноструктуры: а – первоначальное прессование; б – последующее (встречное) прессование; 1 – матрица "песочные часы"; 2 – подвижный контейнер; 3, 4 – встречные пуансоны; 5 – прессуемый металл заготовки; 6 – металл изделия; 7 – металл заготовки в последующем цикле; 8 – металл изделия последующего цикла

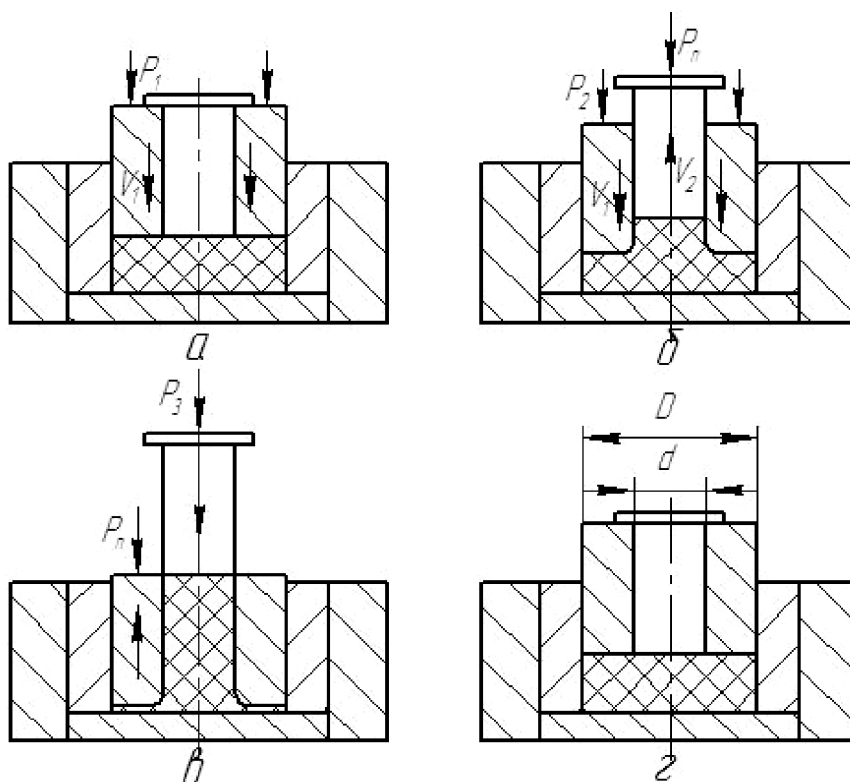


Рис. 52 Схема процесса структурообразования многократным продавливанием: P_1 - P_3 – силы выдавливания на разных стадиях; P_{Π} – сила противодействия ($0 < P_{\Pi} < P_2$, $0 < P_{\Pi} < P_3$); D , d – диаметры пуансонов; V_1 , V_2 – скорости движения инструмента

внутри которого помещен еще один пуансон, не нагруженный давлением. В результате заготовка выдавливается в полость пуансона, затем внутренним пуансоном "перепрессовывают" цилиндрическое изделие из полого пуансона в изделие, соответствующее первоначальной заготовке. Так повторяют несколько раз. В результате получают ультра- и наномелкое зерно. Схема процесса проведена на рис. 52.

Полученные в результате обработки материалы в наноструктурном состоянии имеют самые разнообразные свойства:

– традиционные твердые сплавы на алюминиевой основе (Д16) имеют повышенную прочность, но низкую пластичность [24], поэтому

целесообразность их обработки до наноструктуры требует дальнейшего исследования;

- мягкие сплавы системы Al-Mg-Mn, наоборот, приобретают повышенную прочность (до $\sigma_b = 560$ МПа) при удовлетворительной пластичности, что позволяет рекомендовать их применение в силовых элементах конструкций;

- чистый титан приобретает свойства высокопрочных сплавов, поэтому используется уже в настоящее время взамен их в различных областях медицинского протезирования.

Предложены следующие схемы и производства по изготовлению титановых изделий в наноструктурном состоянии, которые уже в настоящее время рекламируются для использования в коммерческих целях.

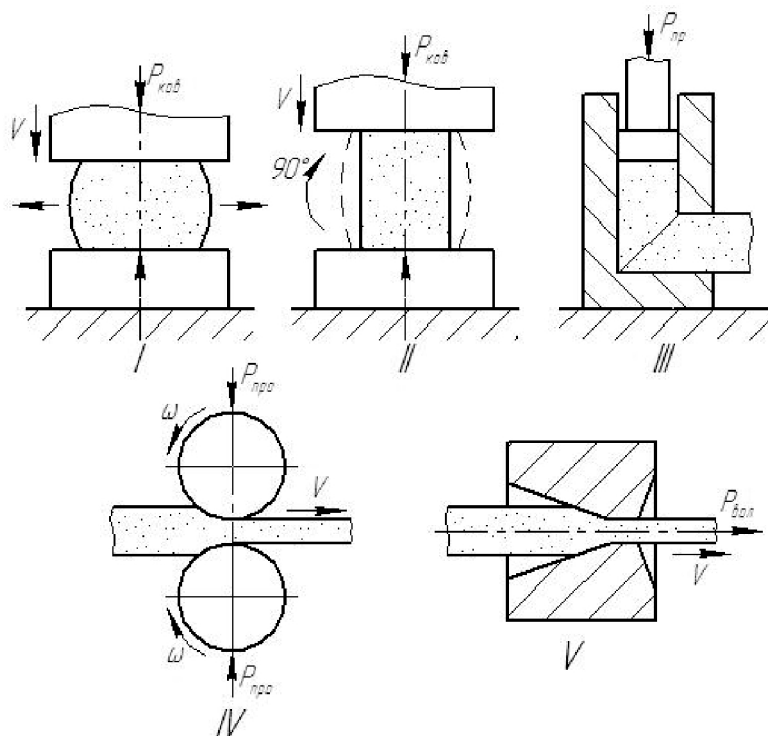


Рис. 53 Универсальная схема получения наноструктурных полуфабрикатов из титана: I, II – деформационная обработка перед ИПД (осадка ковкой); III – ИПД (РКУП); IV – деформационное упрочнение; V – конечная деформационная обработка поверхности

1. Комбинированный технологический процесс и производственный участок (рис. 53) для промышленного производства массивных длинномерных полуфабрикатов и изделий из них с ультрамелким зерном и наноструктурой, включающий: осадку ковкой (с последующей кантовкой для второй осадки); равноканальное угловое прессование (РКУП); прокатку; волочение.

РКУП служит для формирования субструктуры, при необходимости производят многократное выдавливание деформированного прутка (от 2 до 16 раз). Прокатка служит для снятия внутренних напряжений; волочение – для выравнивания поверхности.

Участок производит медицинский имплантат и инструментарий.

2. Линия по изготовлению изделий из титана, включающая: всестороннюю ковку; многопроходную холодную прокатку.

На линии изготавливают: прутки диаметром 5 мм и длиной 150 мм; пластины толщиной 5 мм, шириной 7 мм и длиной 200 мм. Получаемые полуфабрикаты имеют структуру с зерном диаметром $d < 1$ мкм (1000 нм). Прочность обработанного чистого титана превышает прочность титановых сплавов, пластичность полученного металла – удовлетворительная.

Линия позволяет избежать равноканального углового прессования, отказаться от использования крупных прессов; доступна в условиях небольших помещений.

Заключение

Из краткого обзора существующих тенденций развития технологий производства полуфабрикатов из алюминиевых и титановых сплавов, проведенного в данном учебном пособии на основе литературных источников и прогнозов на ближайшие 25 лет специалистами ведущих центров по обработке рассмотренных металлов, видно:

- предполагается осуществить значительное увеличение механических свойств алюминиевых сплавов, для чего разработаны способы и устройства интенсификации литья и обработки;
- происходит широкое внедрение титановых сплавов в самолето- и двигателестроение;
- сложность деталей привела к необходимости замены цельноштампованных деталей продукцией из спеченных порошков;
- дальнейшее развитие прессового производства будет происходить на базе новых процессов и компьютеризации управления прессом;
- как потребность в удешевлении деталей, развивается производство биметаллических изделий и композиционных материалов, получаемых прессованием, изостатическим прессованием и диффузионной сваркой;

– необходимость повышения качества металла в изделиях требует производить изделия в наноструктурном состоянии, что позволяет придать изделиям из них новые, улучшенные качества.

С учетом перечисленных задач студент, подготавливающий себя к творческой работе, должен знать тенденции дальнейшего развития производства, понимать эволюцию технологий и учитывать ее в своей будущей работе.

Список литературы

1. Ковалев, Г.Д. Эволюция технологий / Г.Д. Ковалев // Технология легких сплавов. 2006. №1-2. – С. 11-21.
2. Бережной, В.Л. Базовые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. 2006. №5-6. – С. 52-61.
3. Кручер, Г.Н. Промышленность по обработке цветных металлов США: обзор / Г.Н. Кручер – М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1991. – 68 с.
4. Kennedy J.A. The Extrusion Press Line for 2024: Forecast / Proc. of 8th intern. Alum. Extr. Techn. Seminar. V.1. – May 18-21, 2004. Orinado, FL, USA, p. 345-352.
5. Аношкин, Н.Ф. Современное состояние и проблемы производства титана в России / Н.Ф. Аношкин, В.С. Лобанов, А.В. Александров // Технология легких сплавов. 2001. №5-6.
6. Гарибов, Г.С. Будущее технологии гранул / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. 2006. №1-2. – С. 27-51.
7. Белов, А.Ф. Металлургия гранул – новый путь повышения качества конструкционных материалов / А.Ф. Белов // Вестник АН СССР. 1975. №5. – С. 78-84.
8. Гарибов, Г.С. Новые материалы для дисков и лопаток газотурбинных установок систем перекачки нефти и газа / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. 1997. №6. – С. 38-45.
9. Кононов, И.А. Технологическое оборудование для производства новых конструкционных материалов методом металлургии гранул: сб. / И.А. Кононов // Металлургия гранул – М.: ВИЛС. 1984. Вып. №2. – С. 226-237.
10. Гарибов, Г.С. Развитие высокотемпературной газостатической обработки титановых сплавов / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. 2006. №1-2. – С. 120-133.
11. Бережной, В.Л. Рациональная система изотермического прессования профилей из алюминиевых сплавов / В.Л. Бережной, А. Сала // Технология легких сплавов. 2006. №1-2. – С. 190-197.
12. Жолобов, В.В. Прессование металлов / В.В. Жолобов, Г.И. Зверев – М.: Металлургия, 1971 – 455 с.
13. Белозеров, А.П. Создание производства прессованных полуфабрикатов из титановых сплавов и специальных сталей / А.П. Белозеров, М.З. Ерманок // Технология легких сплавов. 2006. №1-2.
14. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, А.П. Белозеров [и др.] – М.: ВИЛС, 1996.
15. Аргунов, В.Н. Калибрование фасонных профилей / В.Н. Аргунов – М.: Металлургия, 1989.
16. Гуляев, В.В. Развитие технологии изготовления точных тонкостенных профилей из высокопрочных сталей и титановых сплавов / В.В. Гуляев, В.Н. Аргунов // Технология легких сплавов. 1999. №4.
17. Ерманок, М.З. Освоение прессованных полых профилей из титановых сплавов / М.З. Ерманок, А.П. Белозеров // Технология легких сплавов. 2006. №6.

18. Гуляев, В.В. Совместная пластическая деформация разнородных материалов радиальным обжатием на прессах пульсирующего нагружения / В.В. Гуляев, В.Н. Аргунов // Технология легких сплавов. 2001. №5-6.
19. Шмаков, Ю.В. Высокоскоростная кристаллизация – путь для создания алюминиевых сплавов нового поколения / Ю.В. Шмаков // Технология легких сплавов. 2001. №5-6.
20. Гарибов, Г.С. Будущие технологии металлургии гранул / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. 2006. №1-2.
21. Гельман, А.А. Технология диффузионной сварки легких сплавов и сталей: тенденции развития и перспективы / А.А. Гельман // Технология легких сплавов. 2001. №5-6.
22. Валиев, Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации / Р.З. Валиев // Российские нанотехнологии. 2006. Том 1. №1-2. – С. 208-216.
23. Сегал, В.М. Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией / В.М. Сегал // Металлы. 2006. №5.
24. Добаткин, С.В. Формирование нано- и субмикроструктурной структуры в алюминиевом сплаве Д16 в ходе интенсивной пластической деформации / С.В. Добаткин // Технология легких сплавов. 2006. №1-2.
25. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.А. Александров – М.: ИЦК "Академкнига", 2007. – 398 с.
26. Разработка новых методов получения объемных наноструктурных металлических материалов интенсивной пластической деформацией: тр. междунар. науч.-техн. конф., 2007 / Г.И. Рааб, Р.З. Валиев, В.М. Капитонов [и др.] – СПб.: Изд-во Политехнического университета. – С. 385-388.
27. Дмитриев, А.М. Проблемы производства деталей из порошков на железной основе и их решение: сб. тр. междунар. конф. "Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов" / А.М. Дмитриев – СПб.: С.-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. – С. 193-199.
28. Габдулхаков, М.Х. Получение наноструктурного состояния металлов и сплавов выдавливанием: сб. тез. междунар. науч.-техн. конф. "Высокоэнергетические устройства автоматических систем" / М.Х. Габдулхаков, И.О. Жигулев – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2005. – С. 49-53.
29. Эскин, Г.И. Перспективы развития тиксотропной деформации алюминиевых сплавов / Г.И. Эскин, В.Н. Серебряный // Технология легких сплавов. 2001. №5-6.
30. Хижнякова, Л.В. Разработка технологических параметров штамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 в твердодожидком состоянии (тиксостамповки): автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.В. Хижнякова – М.: МГТУ, 2007.

Учебное издание

Старостин Юрий Степанович

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
НА ОСНОВЕ ПРЕССОВАНИЯ**

Учебное пособие

Редакторская обработка Т.К. Кретицина
Компьютерная верстка
Доверстка

Подписано в печать _____ г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0.

Тираж 120 экз. Заказ _____ . Арт. ИП-ж101/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.