

УДК . 669.2/8.018 (088.8)

ВЛИЯНИЕ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

© 1999 Г.В. Черепок, М.В. Федоров

Волжский филиал Института металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН, г. Самара

Исследовано влияние наследственности на деформированные алюминиевые сплавы. С этой целью изучен процесс литья и затвердевания сплавов. Отмечены работы многих ученых в данной области. Особое внимание уделено свойствам шихты. Показаны режимы получения слитков.

Благодаря постоянно растущим требованиям к деталям машин, конструкциям и изделиям из металлических сплавов, металлургам приходится все глубже познавать теорию строения металлов, учиться управлять процессами формирования регламентированной структуры твердых сплавов.

Введение новых эксплуатационных характеристик для металлических изделий, таких как малоцикловая усталость, скорость распространения трещины, изменение прочностных характеристик при повышенных и криогенных температурах и целый ряд других специальных характеристик диктует необходимость более детального исследования структуры и свойств металла по технологическим переделам.

В последние годы значительно расширился объем исследований о структурной наследственности металлов при переходе из жидкого в твердое состояние, появилась научная школа генной инженерии в сплавах. Выполнен целый ряд исследований металлических расплавов, выявлены явления образования ассоциаций атомных группировок возле активных центров в виде взвесей металлических включений (оксиды, карбиды, интерметаллиды) (1).

Исследование наследственности строения жидких расплавов на структуру и свойства твердых металлов позволяют в значительной степени облегчить решение задачи получения отливок с регламентируемой структурой.

Процесс затвердевания отливок в общем плане достаточно подробно исследован, в последние 30-40 лет выполнен ряд фундаментальных исследований процесса затвердевания, построены математические модели и произведены расчеты температурных полей и напряжений в процессе перехода от жидкого к твердому состоянию [2,3,4,5].

Прикладную (промышленную) часть исследований формирования структуры и свойств при затвердевании расплавов, по нашему мнению надо разделить на два направления.

Первое-это литейное производство, то есть получение из жидкого расплава деталей заданной геометрической формы со свойствами, необходимыми для эксплуатации, то есть структура и свойства литой детали может изменяться Т.О. ХТО, нанесением поверхностного упрочнения, но наследственная структура отливки имеет определяющее значение.

Это целое направление науки о металлах часто называемое литейной наукой [6], которая определяет не только долговечность литых деталей машин, но и позволяет создавать машины с новыми эксплуатационными параметрами.

Второе направление-это заготовительное литье, то есть производство заготовок для обработки металлов давлением.

Здесь также как и в первом случае влияние жидкого расплава на структуру и свойства отливки несомненно, однако задачи формирования структуры и условия перехода из

жидкого в твердое состояние имеют существенное различие.

Во-первых, структура и свойства слитка должны обеспечить получение после деформации заданные характеристики изделий. При этом для различных видов обработки давлением предпочтительна та или другая структура, обеспечивающая формирование текстуры деформации с максимальными эксплуатационными характеристиками готового изделия. Для алюминиевых сплавов, как литейных, так и деформируемых существует ряд общих проблем наследственности расплавов, это, прежде всего, газонасыщенность, наличие окислов металлов или их соединений не растворимых в алюминии. Эти проблемы существуют для всех металлов, однако, наиболее ярко выражена отрицательная наследственность этих дефектов именно в расплавах алюминия, из-за высокой растворимости водорода в жидком алюминии и окисляемости его с образованием устойчивого окисла Al_2O_3 . В тоже время при разработке технологических процессов, направленных на повышение качества расплавов алюминиевых сплавов необходимо знать и планировать наследственные параметры расплавов. Например, длительное время в качестве дегазатора алюминиевых расплавов использовались смеси хлористых и фтористых солей щелочно - земельных металлов. Для литейных сплавов эти процессы используются до настоящего времени, одновременно производится модифицирование расплава натрием. Для алюминиевых деформируемых сплавов, особенно систем алюминий-магний, алюминий -цинк - магний присутствие в расплаве натрия в концентрациях выше 0,0005% крайне не желательно.

Для ряда расплавов свариваемых с высокой удельной прочностью ставится задача снижения натрия до 0,00002%, то есть необходимо значительно снизить наследственное от электролиза глинозема в расплаве криолитовых солей количество растворенного натрия в первичном алюминии. Можно привести и другие примеры, подтверждающие известную во всех естественных науках истину для создания той

или иной модели на базе природной материи, мы, прежде всего, должны поставить реальную цель, что мы хотим развить или затормозить в природном материале, явлениях.

Поэтому переходя от общих терминов “генная инженерия”, “наследственность металлов и сплавов”, “синтезируемые технологии” к производственным технологиям, необходимо четко ставить задачу какие естественные качества, явления физико – химических процессов мы должны развить и какие затормозить. Для того чтобы ясно представить себе эти задачи, надо реанимировать несколько забытую часть металлургической науки – теорию металлургических процессов.

Исследованиям процесса формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов посвящено большое количество работ крупнейших ученых – металлургов. В работах С.М. Воронова, В.И. Добаткина, Барбанеля, В.И. Ливанова, И.Н. Фридляндера и многих других [3,4,7,8] заложены основы закономерностей взаимодействия расплава алюминия и его сплавов с атмосферой печи, футеровкой печи, процессов затвердевания слитка, изменения структуры и свойств при деформации и термообработке.

Главной особенностью этих исследований является то, что они выполнялись в производственных условиях, направлены, были на решение конкретных задач.

История развития производства заготовок для ОМД из алюминиевых деформируемых сплавов насчитывает немногим более полувека. Первые обобщенные и научно – обоснованные результаты исследования процессов плавки и непрерывного литья круглых слитков для прессования были выполнены С.М. Вороновым в 1940 ÷ 1953 гг. и изданы в 1957 году [8]. За прошедшие годы проведена очень большая работа по теоретическим основам и разработке технологии производства непрерывных слитков из алюминиевых деформируемых сплавов.

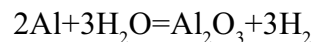
Тем не менее, нам представляется необходимым более внимательно рассмотреть

весь технологический процесс и обозначить влияние всех параметров на формирование структуры и свойств литой заготовки. Начнем с подбора оптимального подбора шихты. Довольно часто мы делаем ошибку, оценивая рациональный состав шихты по экономическим показателям. При детальном рассмотрении этого вопроса мы убеждаемся, что кроме очевидного требования получить заданный химический состав, в том числе оптимальное количество допускаемых вредных металлических примесей необходимо учитывать влияние структурного строения элементов шихты. Этому вопросу посвящено ряд исследований В.К. Никитина [6,9]. В практике производства установлено, что при приготовлении сложных высоколегированных сплавов на первичном алюминии качество металла хуже в сравнении с шихтой, содержащей отходы того же сплава. Объяснение этому очень простое – значительно увеличивается количество легирующих металлов, особенно имеющих большое сходство к кислороду и образующих устойчивые окислы. Например, присадка большого количества магния приводит к образованию MgO, который с Al образует шпинель $Al_2O_3 \cdot MgO$ отрицательное влияние которой общеизвестно. Перечень таких окислов очень велик это SiO_2 , PbO, Cu_2O , MnO и другие.

Поэтому наиболее рациональным является состав шихты, обеспечивающий оптимальное вовлечение отходов желательного того же сплава. Например, при производстве ленты для банок под напитки стабильные свойства ленты наряду с другими требованиями обеспечиваются стабильным составом шихты, в котором до 80% составляют оборотные и возвратные отходы баночной тары и только 20-25% первичные металлы.

Следующим важным фактором является взаимодействие металла при его плавке и нахождении в жидком состоянии с атмосферой и футеровкой печи. Атмосфера пламенной отражательной печи содержит продукты сжигания, как правило, высококалорийного природного газа, то есть состоит в основном из окислов углерода, уг-

леводородов, азота, влаги и водорода. Наиболее активно алюминий взаимодействует с водяным паром так при 1000 °K реакция



начинается уже при $P_{H_2O} = 2.59 \cdot 10^{-19}$ ат.

В равновесной системе Al-H₂O-H₂ парциальное давление водорода может достигнуть высокого уровня при малых значениях P_{H_2O} .

Если поддерживать $P_{H_2O} = 0,01288$ ат (среднее парциальное давление водяного пара в воздухе) при 1000°K, то равновесное парциальное давление водорода и равновесная концентрация водорода в алюминии (на границе металл-газ) может достигнуть $P_{H_2} \sim 8,87 \cdot 10^{10}$ ат и $S_H = 3.24 \cdot 10^5$ см³/100г.

Химическая активность углеводородов по отношению к алюминию много слабее. Так при реакции с метаном (1000 °K и $P_{сн_4} = 1$ ат) $P_{H_2} \approx 62$ ат и $S_H = 8,6$ см³/100г.

Поскольку соединения алюминия с кислородом представляют твердую пленку на металле, они образуются преимущественно в поверхностных зонах. Количество кислорода, присоединенного к металлу, прямо пропорционально удельной поверхности его.

Растворимость азота в алюминии незначительна, однако нитрид алюминия образуется уже при 660 °C, с повышением температуры интенсивность реакции увеличивается.

Жидкий алюминий начинает взаимодействовать с углеродом, окисью углерода уже при температуре плавления. При плавке и литье алюминиевых сплавов могут создаваться благоприятные условия для протекания реакции между карбидом и нитридом алюминия с водяным паром, однако эти процессы идут крайне медленно и при высоких температурах. Основной причиной образования неметаллических включений при плавке алюминия и его сплавов могут быть водород, кислород и водяной пар. Наличие в алюминиевых сплавах ак-

тивных металлов таких как магний значительно повышают интенсивность окислительных реакций. Исследования кинетики окисления /10/ алюминия показывает, что зависимость окисления от времени может быть выражена уравнением

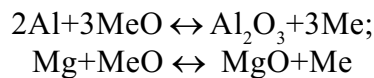
$$W^2 = k \cdot dt$$

где w – масса окислившегося алюминия;

k – коэффициент пропорциональности;
 t – время.

Необходимо подчеркнуть адсорбционную способность ν Al_2O_3 , которая способна удерживать некоторое количество H_2O даже после прокаливания при $900^\circ C$.

Процессы взаимодействия расплава с футеровкой печи так же существенно влияет на качественные характеристики наследственности в отливках. Химические реакции, сопровождающие разрушение футеровки и загрязнения расплава шлаковыми включениями в общем виде можно представить как:



и так далее.

В результате длительной эксплуатации значительно изменяется состав футеровки, особенно в рабочей зоне. Большинство огнеупорных материалов представляют собой смесь окислов различных металлов (Al, Si, Mg, Fe, Cr и т.д.). Если эти окислы в ряду теплот образования расположены ниже глинозема, то футеровка будет разлагаться с выделением металла менее активного, чем алюминий.

Например, анализ химического состава продуктов взаимодействия алюминиевого расплава с шамотной футеровкой печи показал присутствие в наружном слое кладки, контактирующем с расплавом: 3.6% Si; 0.65% Fe; 0.13% Mn; 0.33% Zn; 63.3% Al_2O_3 и так далее.

Для уменьшения взаимодействия расплава с футеровкой печей необходимо изготавливать ее из окислов не подверженных взаимодействию алюминия. Например, замена шамота и магнезита высокоглиноземистым или корундовым кирпичом. Исходя из вышеизложенного, на основе много-

летнего опыта производства алюминиевых расплавов в газовых отражательных печах емкостью 30-50 т, а также ряда исследований [11, 12, 13, 14, 15] проведенных под руководством и при участии автора разработаны и внедрены оптимальные технологические режимы плавки алюминиевых сплавов.

Основными из них можно считать:

1. При проектировании плавильной печи необходимо стремиться к оптимальному (ограниченному) соотношению площади зеркала расплава к емкости печи, оно должно быть 2,5 – 4,0.

2. Мощность и расположение газогорелочных устройств должны обеспечить максимально равномерное температурное поле в ванне печи и обеспечивать максимальную скорость плавления.

3. Объем рабочего пространства печи должен обеспечить максимальную разовую загрузку шихты. Сократить время полного расплавления и выдержать требования диапазона температуры по ванне печи можно с помощью перемешивания расплава различного вида насосами.

4. Максимальная температура поверхностного слоя расплава не должна превышать $750^\circ C$.

5. Должно быть ограничено как общее время от начала загрузки до слива расплава из печи (12-16 час) так и время нахождения расплава в печи. На высоколегированных сплавах введено понятие “перестой” расплава и установлена прямая связь с технологичностью слитков и склонностью их к растрескиванию [16] в процессе литья и последующей обработке их давлением.

Вредное наследственное влияние окисления в процессе плавки, засорение шлаковыми и газовыми включениями, образование вредных химических соединений можно значительно уменьшить за счет проведения целого ряда технологических операций. Однако главной задачей металлургов остается приготовить расплав с минимальными включениями. В то же время уже в расплаве необходимо иметь достаточное количество центров кристаллизации, которые позволяют получить при затвердевании мелкозернистую рав-

ноосную структуру.

Это достигается модифицированием расплавов. Исследование этого процесса достаточно подробно исследовано [17].

Наиболее эффективным приемом, широко используемым в производстве алюминиевых деформируемых сплавов является введение прутка лигатуры Al5Ti1B в расплав непосредственно перед его затвердеванием. Использование этого модификатора не только наиболее эффективно, но и требует значительно меньшего расхода модификатора. Это важно, так как при модифицировании титаном в количестве 0,02-0,05% содержание Ti накапливается в связи с повторным использованием отходов, а повышенное содержание титана 0,05-0,1% уже приводит к возможности образования интерметаллидов в сложных многокомпонентных сплавах.

Что касается имеющих в расплаве неметаллических включений и не растворенного водорода, даже при использовании всех известных технологических приемов в процессе плавления, в настоящее время наиболее эффективными мерами являются:

а) Внепечное рафинирование расплавов смесью 2-5% хлора и 98-95% аргона в специальных установках типа "Альпюр" и др. основной задачей становится максимальная проработка всего объема расплава этой смесью;

б) Фильтрация расплава перед его подачей в кристаллизатор через пенокерамические фильтры в комбинации с фильтрами из стеклянных сеток.

Использование как приведенных выше, так и других технологических приемов приготовления расплавов обеспечивает необходимые условия для получения слитка необходимого качества.

Главной задачей теперь становится создание таких параметров затвердевания слитка, которые обеспечат сохранение чистоты металла по газовым и неметаллическим включениям и получить структурное строение слитка наиболее приемлемое для ОМД и эксплуатационных характеристик продукции.

Составной частью технологии литья слитка является система подачи расплава из раздаточной печи к кристаллизатору. Проектирование и изготовление устройств для подачи расплава решаются технологами в каждом конкретном случае, однако, есть ряд обязательных условий, не исполнение которых может привести к потере качества расплава.

Основными из них являются:

1. Скорость движения расплава должна обеспечить отсутствие порыва окисной пленки на поверхности расплава и одновременно минимальную потерю температуры.

2. Теплопередача через стенки желобов должна быть минимальной.

3. В систему подачи расплава должны быть включены – установка внепечного рафинирования:

- фильтр – бокс с пенокерамическими фильтрами;

- подача модифицирующего прутка;

- регулятор уровня расплава в желобе связанный с подачей расплава из раздаточной печи (миксера);

- дозирующее устройство подачи расплава в кристаллизатор связанное с датчиком уровня расплава в кристаллизаторе.

4. Потери температуры расплава на пути от раздаточной печи до кристаллизатора не должны превышать 25°.

5. В системе должна использоваться шиберное устройство для быстрого наполнения желобов, а также возможность быстрого слива расплава из всей системы.

6. Футеровка лотков должна быть нейтральной к расплаву, не смачиваться им и иметь хорошую прочность и низкую теплопроводность.

Большое наследственное значение на качество слитков и и произведенные из него обработкой металлов давлением полуфабрикаты имеет правильно выбранный способ подачи расплава и распределение его непосредственно в жидкой зоне слитка. Формирование структуры непрерывного слитка определяется температурным полем в процессе его затвердевания, формой и глубиной жидкой и твердожидкой зон. При-

способления для подачи расплава в жидкую зону слитка должны обеспечить:

- 1.) Равномерное распределение подаваемого расплава к фронту кристаллизации.
- 2.) Отсутствие застойных зон, ведущих к понижению температуры и образованию настывлей, которые затем приводят к образованию дефектов типа “светловин”.
- 3.) Отсутствие объемной кристаллизации в лунке.
- 4.) Потоки расплава не должны нарушать окисную пленку на мениске металла в кристаллизаторе.

При правильно выбранных параметрах приготовления расплава, его подготовке и подаче в жидкую зону непрерывного слитка создаются условия для получения слитка с регламентированной структурой, минимальной газонасыщенности и высокой степени чистоты по неметаллическим включениям.

Далее наступает очень ответственный этап технологического цикла – организация процесса затвердевания (кристаллизации) расплава, то есть переход из жидкого в твердое (для металлов кристаллическое) состояние. Исследование процесса затвердевания непрерывного слитка из алюминиевых деформируемых сплавов ведется на протяжении последних 70 лет несколькими поколениями ученых и инженеров металлургов. За эти годы накоплен огромный опыт, установлены закономерности, созданы математические модели расчета параметров затвердевания непрерывного слитка, изучены зависимости температурного поля слитка от условий теплоотвода, скорости литья, температуры расплава и т. д.

Постоянное стремление повысить скорость кристаллизации для получения мелкокристаллической структуры, выравнивание фронта кристаллизации, уменьшения твердожидкой фазы, создания условий наилучшего питания расплавом фронта кристаллизации приводило к необходимости уменьшения высоты кристаллизатора. Так при литье высоколегированных сплавов (Д16, В95 и т. д.) еще в 50 – е годы применялись кристаллизаторы высотой 300 – 400 мм при литье плоского слитка сечением

300x1200 мм, в настоящее время слиток сечением 500x1600 мм из этих же сплавов отливается в кристаллизатор высотой 80 – 100 мм. Это стремление привело к созданию и широкому распространению новых способов отливки непрерывного слитка в электромагнитный кристаллизатор, Air Slip и другие.

Суть этих способов заключается в том, что расплав принимает форму слитка без контакта с формообразователем за счет электромагнитного поля или воздушной подушки”.

Исследованиям затвердевания непрерывного слитка и разработке способов управления процессом кристаллизации как в целом слитке, так и в различных его зонах посвящено большое количество работ. В разработку основ теории и практики непрерывного слитка внесли огромный вклад целый ряд ученых и инженеров: С.М. Воронов, В.И. Добаткин, В.А. Ливанов, И.Н. Фридляндер, Р.М. Габитуллин, В.С. Шипилов, А.Д. Андреев, Г.А. Балахонцев и многие другие.

Все работы сводятся к одной задаче научиться управлять процессом затвердевания слитка с максимальными показателями плотности, минимальной ликвацией легирующих компонентов, равноосной мелкозернистой структурой по всему сечению.

По нашему мнению можно выделить пять основных слагаемых условий затвердевания непрерывного слитка:

- скорость слитка,
- температура расплава,
- теплофизические свойства расплава, зависящие от химического состава и условий приготовления расплава,
- распределение расплава вводимого в лунку слитка и регулирование его постоянного уровня,
- организация отвода тепла от поверхности непрерывного слитка по высоте мениска металла до затвердевания центральных зон слитка и охлаждения его до температуры окружающей среды.

Суммирующим показателем условий затвердевания непрерывного слитка является температурное поле, включающее в

себя понятия формы и глубины лунки жидкого расплава, качественные и количественные характеристики твердо – жидкой (переходной) фазы.

Для формирования структуры слитка очень важно иметь стабильный фронт кристаллизации, описываемый изотермой солидуса. Существенное влияние на глубину и форму жидкой зоны непрерывного слитка оказывает система теплоотвода.

При литье слитков в кристаллизатор скольжения из-зи образования при усадке слитка зазора между кристаллизатором и слитком резко уменьшается теплоотвод от поверхности слитка, что приводит к искажению фронта кристаллизации и как следствие к росту обратной ликвации на поверхности слитка, росту зерна и т. д.

При литье в ЭМК такого изменения теплоотвода не наблюдается, фронт кристаллизации не искажается, резко уменьшается обратная ликвация, зерно в приповерхностной и поверхностной зоне равноосное и мелкое, за счет чего значительно улучшается технологичность слитка при обработке его давлением, особенно при прокатке.

Для многокомпонентных, высоколегированных сплавов имеющих интервал кристаллизации до 100^oC особое влияние на формирование структуры слитка оказывает, наряду с глубиной и формой лунки, величина твердожидкой переходной области в различных сечениях слитка.

Именно в этой зоне непрерывного слитка формируется структура, здесь создаются определенные условия для зарождения и роста “дендрита” формирования равноосных или столбчатых кристаллов.

Проблема создания условий для получения равноосной, мелкозернистой структуры остается актуальной и в настоящее время. С ростом лигирования алюминиевых деформируемых сплавов и увеличением габаритов слитков эта задача постоянно осложняется и находится в поле внимания исследователей [18, 19, 20].

Конечным процессом формирования структуры непрерывного слитка перед ОМД является гомогенизирующий обжиг. Температура нагрева слитка, выдержка при

заданной температуре, а также регламентированное охлаждение после выдержки выбираются в зависимости от сплава и сечения слитка, они также должны учитывать вид последующей обработки металлов давлением.

Несмотря на большое количество исследований влияния режимов гомогенизирующего отжига на структурное строение слитка, систематизированных работ очень мало. Поэтому технологам приходится либо принимать традиционно сложившиеся режимы, либо проводить подбор режимов по результатам обработки металлов давлением без детального изучения закономерностей изменения структурного строения слитка.

Исходя из вышесказанного можно сделать следующий вывод:

Структура и свойства непрерывного слитка формируются на всех стадиях технологического процесса от набора шихтовых материалов до гомогенизирующего отжига. Ни один из технологических переделов нельзя считать второстепенным, и только комплексное решение всех этапов технологии позволяет управлять и прогнозировать качество слитка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Д.П. Ловцов* О механизме проявления наследственности при физических методах воздействия на расплав //Тезисы докладов к VI Международной конференции “Генная инженерия в сплавах” ИТЦМ “Металлург”, Самара, 1998
2. *А.И Вейник* Теория затвердевания отливки. М.: Машгиз, 1960.
3. *Р.И. Барбанель* Некоторые закономерности непрерывного литья слитков алюминия и его сплавов //Технология легких сплавов.-1964, №3.
4. *В.А. Ливанов* Литье плоских слитков для производства листов из алюминиевых сплавов //В сб. “Алюминиевые сплавы”. М.: Оборонгиз, 1955.
5. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор /*З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Г.В. Черепок и др.* М.: Metallurgia, 1983.

6. *В.И. Никитин* Наследственность в литых сплавах. СГТУ.: Самара, 1995.
7. *В.И. Добаткин* Слитки алюминиевых сплавов. М.: Metallurgizdat, 1960.
8. *С.М. Воронов* Избранные труды по легким сплавам. М.: Оборонгиз, 1957.
9. *В.И. Никитин* Управление структурной наследственностью в литых сплавах // Тезисы докладов V научно – технической конференции. СГТУ, Самара, 1993.
10. *М.Б.Альтман* Плавка и литье легких сплавов. М.: Metallurgia, 1969.
11. *Г.В. Черепок, А.М. Босов, В.К. Зиновьев* Влияние технологии производства алюминиевых сплавов на газонасыщенность расплава //Технология легких сплавов.-1965, №5.
12. *Г.Д. Дымов, Г.В. Черепок* Выбор типа плавильной печи для производства алюминиевых деформируемых сплавов //Цветные металлы.-1983, №6.
13. Исследование кинетики процесса дегазации нейтральными газами /*В.Б. Гогин, Г.В. Черепок и др.* //Технология легких сплавов.-1971, №5.
14. *Г.Д. Дымов, Г.В. Черепок* Окисление жидкого алюминия и его сплавов //Технология легких сплавов.-1964, №5.
15. Водород в расплаве и чистота слитков / *Г.В. Черепок, А.М. Босов, Г.В. Рючина и др.* //Технология легких сплавов.-1969, №5.
16. *Г.Г. Шадрин, Г.В. Черепок* Разработка промышленной технологии производства крупногабаритных слитков //Технология легких сплавов.-1966, №3.
17. *Б.И. Бондарев, В.И. Напалков, В.И. Тарарышкин* Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М.: Metallurgia, 1979.
18. *Г.В. Черепок* Затвердевание непрерывного слитка //Цветные металлы.-1991, №2.
19. *Г.В. Черепок, З.Н. Гецелев* Гидродинамические процессы в жидкой фазе слитка //Цветные металлы.-1993, №6.
20. *Л.Г. Березин* Развитие метода литья слитков в электромагнитный кристаллизатор //Цветные металлы.-1993, №6.

INFLUENCE OF HEREDITY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEFORMED ALUMINIUM ALLOY INGOTS

© 1999 G.V. Cherepock, M.V. Fedorov

Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baykov
of Russian Academy of Sciences, Samara

The influence of heredity on deformed aluminium alloys is investigated in this paper. The alloys casting and hardening process is studied. The works of many scientists in this field are noted. Special attention is paid to the stock properties. The production modes of ingots are shown.

УДК 621.981.213(088.8)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОУПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБТЯЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ПК, ПЛК SMART2 И СЕТИ PROFIBUS

© 1999 В.А. Михеев¹, Б.С. Малышев², И.П. Попов¹, А.В. Логвинов³, С.Ю. Боровик³,
С.Д. Смольников¹, А.А. Хритин⁴

¹Волжский филиал Института металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН, г. Самара

²Кумертауское авиационное производственное предприятие

³Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

⁴СКБ “Самаранефтехимавтоматика”

Предлагается система автоуправления, которая использует передовые достижения технологии в сочетании со стандартной системой управления на базе персонального компьютера ПК и программируемого логического контроллера ПЛК. В статье показана структура системы автоуправления на базе ПК, ПЛК SMART2 и сети PROFIBUS, которая позволяет реализовать автоматический режим работы на “ниатовских” обтяжных прессах без значительной их переделки. В результате обеспечивается устойчивая воспроизводимость формующих движений пресса, а также изготавливаемых деталей. Система автоуправления легко вписывается в систему автоматизированной подготовки производства летательных аппаратов.

Формообразование деталей на обтяжном оборудовании – весьма сложный технологический процесс. Он зависит не только от геометрических точностных параметров обтяжного пуансона, условий трения, скоростного режима, но и от последовательности и кинематики приложения деформирующих усилий. Учитывая это, при разработке системы автоуправления основное внимание следует уделять не столько вопросам автоматизации всего технологического цикла (операции подачи заготовок, удаление готовых деталей целесообразно только механизировать), сколько автоматизации самого процесса формоизменения заготовки и поддержания заданных технологических параметров.

Над решением этих задач в последнее десятилетие активно работают ряд зарубежных фирм. В частности, французская фирма АСВ на основе накопленного опыта эксплуатации обтяжных прессов на авиационных предприятиях компаний AEROSPATIALE (Франция), BOING, LOCHID (США) и других, создала новую серию обтяжных прессов с торговой маркой LOIRE и систем управления к ним [1]. Обтяжные прессы FEKD фирмы АСВ имеют более современную конструкцию, чем “ниатовские” прессы типа РО и ОП, имеют числовое программное управление по

четырем и более координатам и реализуют схему нагружения, при которой осуществляется постоянное огибание заготовки рабочей поверхности пуансона одновременно с растяжением.

Учитывая реальное состояние Российской экономики, альтернативой приобретения новых прессов зарубежных фирм остается пока модернизация отечественных и оснащение их системами автоуправления. Такие системы позволят реализовать автоматический режим работы на прессах РО-1600, РО-630, РО-3М, РО-3, ОП-3, ОП-5к, ПГР-6, ПГР-7 и др. без значительной их переделки. Авторами на протяжении ряда лет были выполнены приоритетные разработки нового оборудования и модернизация существующего, оснащенного средствами автоуправления [2...10].*

Алгоритм работы системы автоуправления для обтяжного оборудования в обобщенном виде представлен на рис.1.

Техническая реализация каждого из этапов представленного алгоритма в настоящее время не вызывает больших трудностей. На практике для решения подобных задач широко используются программируемые контроллеры. В частности, фирмой АСВ-ALSTHOM создана специализированная для гидравли-

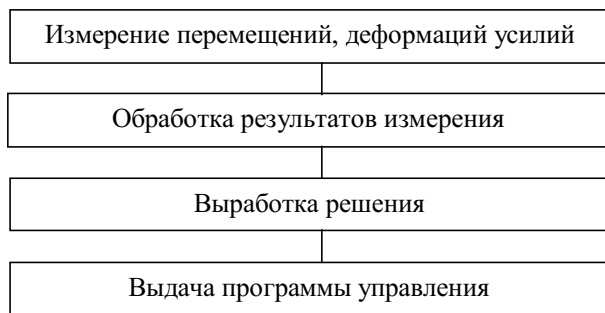


Рис. 1. Обобщенный алгоритм системы автоуправления для обтяжного оборудования

ческих прессов система управления “CIMER” на основе мощных высокоскоростных контроллеров в стандарте VME.

В последние годы все большее распространение для решения задач автоматизации технологических процессов получают относительно недорогие и компактные программируемые логические контроллеры (ПЛК), предназначенные для использования в промышленных условиях непосредственно на объектах, и обладающие, несмотря на свои малые габариты, мощными вычислительными и коммуникационными возможностями. Например, фирма PEP Modular Computers, являющаяся крупнейшим производителем модулей и систем в стандарте VME, выпустила новый модульный ПЛК SMART2 сочетающий преимущества операционной системы (ОС) реального времени OS-9 и функциональные возможности промышленного контроллера.

Несмотря на конструктивные различия, контроллеры серии VME и SMART2 программируются по единой технологии, базирующейся на стандарте IEC 1131-3 (инструментальная система программирования ISaGRAF). Пользователь может программировать ПЛК SMART2 не изучая языков программирования. Он использует интуитивно понятные инструментальные средства программирования ISaGRAF на персональном компьютере (ПК) с ОС Windows.

ПЛК SMART2 имеет модульную структуру, позволяющую легко изменять конфигурацию. Его основой является базовый модуль SMART-BASE, который содержит 32-разрядный микропроцессор MC68302 фирмы Motorola и три посадочных места для уста-

новки модулей ввода-вывода. Расширение возможностей ввода-вывода достигается добавлением к SMART-BASE до пяти модулей расширения SMART-EXT, каждый из которых поддерживает до трех модулей ввода-вывода. Контроллер снабжен энергонезависимым статическим ОЗУ и Flash ПЗУ большого объема, что обеспечивает надежное и длительное хранение прикладных программ и данных.

Для объединения ПЛК SMART2 и ПК в сеть используется стандартная высокоскоростная локальная шина PROFIBUS, базирующаяся на принципе шинного маркера реального времени. Сеть PROFIBUS позволяет интегрировать в единую систему обтяжное оборудование, контроллер и вычислительные средства с элементами связи процессов, а также обеспечивает возможность дистанционной загрузки и отладки программ. Структура системы автоуправления на базе ПЛК SMART2, ПК и сети PROFIBUS приведена на рис.2.

Кинематика указанных выше обтяжных прессов отечественного производства является подходящей для оснащения их системами автоуправления на основе ПК и ПЛК SMART2. При этом конфигурация систем автоуправления зависит не только от конструктивно-кинематических особенностей пресса, но и от технологических особенностей процесса обтяжки. Настройка системы на конкретный тип пресса и процесс обтяжки производится путем загрузки соответствующей программы управления в ПЛК.

На прессах PO-630 и PO-1600 система автоуправления выполнит следующие задачи:

- обеспечение стабилизации продольного угла облегания заготовкой обтяжного пуансона;
- прекращение растяжения при достижении критических деформаций;
- реализацию комбинированного метода обработки, в котором сочетаются схемы простой обтяжки и обтяжки с растяжением.
- создание условий синхронной работы левого и правого растяжных цилиндров по заданной программе;

На прессах PO-3M и PO-3 система автоуправления выполняет те же задачи, кото-

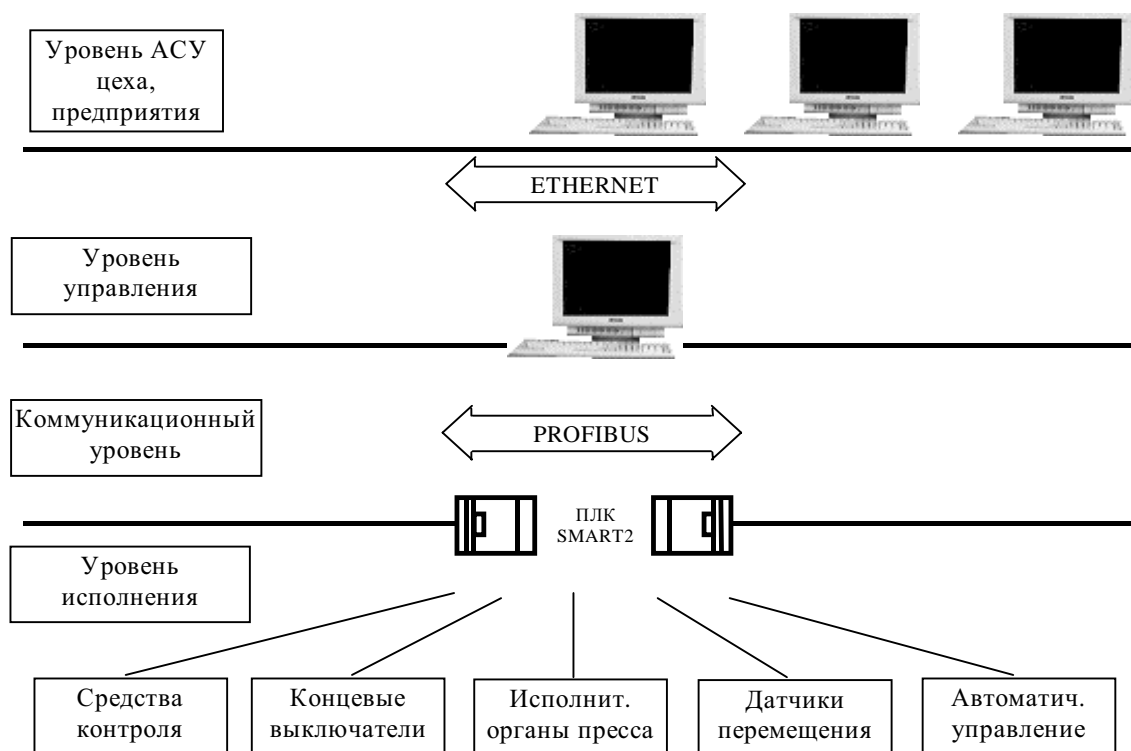


Рис. 2. Структура системы автоуправления

рые приведены для прессов РО-630 и РО-1600 за исключением последней.

На прессе ОП-3 система автоуправления реализует новые способы обтяжки с догрузкой угловых зон заготовки двояковыпуклых деталей и обтяжку деталей знакопеременной кривизны. Для этого предполагается пресс ОП-3 оборудовать верхним порталом, работающим в автоматическом режиме с основными силовыми приводами.

На прессе ОП-5к система автоуправления реализует следующие его особенности по сравнению с другими прессами:

- возможность выполнения простой обтяжки и обтяжки с растяжением;
- поворот стола в горизонтальной плоскости до 90°;
- режим работы движением зажимов и стола (оба режима не зависят друг от друга и могут осуществляться как одновременно, так и раздельно);
- изгиб детали по винтовой линии с углом закрутки до 30°.

На прессах ПГР-7 и ПГР-6 система автоуправления разбивает процесс формообразования профиля на значительное количество

стадий. Каждой стадии соответствует определенное положение штоков гибочных и растяжных гидроцилиндров прессы.

Другими словами, конструкции прессов и используемая на них система автоуправления обеспечивает получение как симметричных, так и несимметричных обшивочных деталей сравнительно большой двойной кривизны, а также сложных профильных деталей.

При этом достигается необходимая точность детали при условиях минимально необходимых деформаций заготовки, что сокращает количество переходов и уменьшает неравномерность толщины или поперечного сечения. Такие условия в достаточной мере выполнены в новых способах: ступенчатая и комбинированная обтяжка, обтяжка по двум пуансонам, обтяжка уширенной заготовки, обтяжка с догрузкой угловых зон заготовок и др. [10...13].

Новые способы были реализованы на некоторых указанных выше обтяжных прессах после установки системы автоуправления и подключения к внешней САПР для автоматического задания программы нагружения

при обтяжке. В результате была обеспечена устойчивая воспроизводимость формирующих движений, а также изготавливаемых деталей. При этом на работу позиционной сервоустановки пресса не влияют ни силы трения между заготовкой и обтяжным пуансоном, ни изменение характеристик материала заготовки.

Кроме того разработанная система автоуправления на базе ПК и ПЛК SMART2 легко связывается с системой автоматизированной подготовки производства летательных аппаратов (ЛА), что позволяет сформировать математические модели аэродинамической поверхности детали и использовать их для разработки оптимальной программы нагружения заготовки при обтяжке, а также при изготовлении обтяжных пуансонов. На уровне автоматизированной системы управления (АСУ) цеха и предприятия эта связь реализуется с помощью сети ETHERNET (см. рис. 2).

До настоящего времени традиционным подходом при изготовлении обтяжных пуансонов остается предварительное изготовление слепка и контрслепка по эталонам аэродинамической поверхности. Слепки и контрслепки являются средством увязки и переноса указанных размеров и форм элементов конструкции ЛА с эталонов поверхности на технологическую заготовительно-штамповочную оснастку. Однако при изготовлении обтяжного пуансона фрезерный станок с ЧПУ служит не только средством изготовления, но и средством увязки изготавливаемых деталей, а управляющая программа для станка с ЧПУ является носителем увязанных геометрических параметров поверхности детали обшивок [14].

Многие из деталей обшивок имеют сложные трехмерные поверхности, трудно поддающиеся измерению обычными средствами. Тем не менее, на стадии подготовки производства необходимо внести в компьютер подробную геометрическую информацию о детали.

Лучшим решением является оцифровка или сканирование подобных деталей и использование ПК для упорядочения большого объема геометрических данных для последующей их обработки на координатографах и на фрезерных станках с ЧПУ. С учетом этого выполнено сопряжение с фирменными про-

граммными пакетами Power Solution (DelCam, Англия) конструктивно-технологического назначения для моделирования, изготовления и контроля сложных по форме деталей и технологической оснастки [15]. Система автоуправления на базе ПК и ПЛК SMART2 совместима с большинством программных пакетов и других CAD-систем независимо от того, на какой аппаратной платформе они были получены.

Предложенные технические, технологические и программные разработки впервые обеспечивают условия функционирования программных методов увязки технологической оснастки.

Программные методы увязки обеспечивают:

- применение математической модели поверхности деталей, кодирования геометрической информации и воспроизведения контуров поверхностей в стандартных программных системах;
- возможность использования геометрической информации как на стадии проектирования и технологической подготовки, так и при изготовлении в металле на обтяжном оборудовании, оснащенном системой автоуправления;
- точность увязки сопрягаемых элементов конструкции ЛА, получаемых обтяжкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LOIRE PRESSES SEMINAR Металлоформовочные прессы LOIRE компании АСВ – М.: Каталог, 1994.
2. А.С. №1738426 СССР, МКИ² В21D11/20 Растяжно-обтяжной пресс./ В.П. Чистяков, В.А. Михеев и др. (СССР). №4766087/27; Заявлено 06.12.89; Опубл. 07.06.92, Бюл. №21. –7с.: ил.
3. Чистяков В.П., Хасьянов М.И., Пименов Ю.Н., Михеев В.А. Автоуправление процессом обтяжки.// *Авиационная промышленность*, 1990, №7.
4. А.С. №1107927 СССР, МКИ² В21D11/20 Пресс для гибки заготовок с растяжением./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №3523865/25-27; Заявлено 21.12.82; Опубл. 15.04.84, Бюл. №30. –4с.: ил.

5. А.С. №940411 СССР, МКИ² В21D11/20 Способ контроля деформации удлинения./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №2972455/25-27; Заявлено 15.08.80; Оpubл. 23.02.82, Бюл. №53. -5с.: ил.
 6. А.С. №878391 СССР, МКИ² В21D/20 Устройство для контроля удлинения на обтяжных прессах./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №2882277/27; Заявлено 15.02.80; Оpubл. 7.07.81, Бюл. №41. -5с.: ил.
 7. А.С. №776707 СССР, МКИ² В21D11/20 Способ контроля за деформациями при обтяжке деталей двойной кривизны./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №2458191/25-27; Заявлено 01.03.77; Оpubл. 07.11.80, Бюл. №41. -3с.: ил.
 8. А.С. №538764 СССР, МКИ² В21D11/20 Растяжно-обтяжной пресс./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №2169706/27; Заявлено 03.09.75; Оpubл. 15.12.76, Бюл. №46. -6с.: ил.
 9. А.С. №472250 СССР, МКИ G01BD7/16 Устройство для контроля деформации растяжения профильных деталей./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №1723902/25-28; Заявлено 13.12.71; Оpubл. 30.05.75, Бюл. №20. -3с.: ил.
 10. А.С. №659238 СССР, МКИ² В21D11/20 Способ формообразования деталей двойной кривизны./ В.П. Чистяков, В.А. Михеев и др. (СССР). - №2459522/25-27; Заявлено 04.03.77; Оpubл. 30.04.79, Бюл. №16. -2с.: ил.
 11. А.С. №707647 СССР, МКИ² В21D11/20 Способ обтяжки при формообразовании деталей двойной кривизны./ В.П. Чистяков и др. (СССР). - №2472489/25-27; Заявлено 11.04.77; Оpubл. 14.09.79, Бюл. №1. -3с.: ил.
 12. Чистяков В.П., Михеев В.А. Интенсификация процессов обтяжки обшивок летательных аппаратов двойной кривизны. - В сб.: Вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов. - Куйбышев, 1979, с.90-96.
 13. Чистяков В.П., Михеев В.А. Исследование процесса обтяжки вогнутых обшивок двойной кривизны. - В сб.: Теория и технология ОМД. - Куйбышев, 1977, с.83-93.
 14. Пытьев П.Я. Технологические методы взаимозаменяемости элементов конструкции летательных аппаратов и увязки технологической оснастки. - Куйбышев, 1989. КуАИ.
 15. CADD Magazine, Vol. 18, Num. 2, February 1998, "Power Ranger".
-
- * Приведенные разработки выполнены под руководством В.П. Чистякова.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR PULLING-OVER EQUIPMENT ON THE BASE OF PC, PLC SMART2 AND PROFIBUS NETWORK

© 1999 V.A. Mikheev¹, B.S. Malyshev², I.P. Popov¹, A.V. Logvinov³, S.Yu. Borovik³, S.D. Smolnikov¹, A.A. Khritin⁴

¹Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baykov of Russian Academy of Sciences, Samara

²Kumertau Air Industrial Enterprise,

³Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara,

⁴Special Design Office "Samaraneftehimavtomatika"

This paper considers automatic control system, which uses technology advances that are combined with a standard control system based on personal computer (PC) and programmed logical controller PLC. The structure of the automatic control system, which based on PC, PLC SMART2 and PROFIBUS network is shown. The system allows to use automatic mode of pulling-over operation on NIAT pressed without their significant modification. In the result steadiness of press molding movement and components reproducibility is provided. The automatic control system fits the preparatory systems aircraft manufacture.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ СБОРНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ

© 1999 В.Р. Каргин, М.В. Федоров, В.С. Феоктистов

Волжский филиал Института металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН, г. Самара

Рассмотрен процесс волочения сборных труб сложных поперечных сечений. Показано применение тензометрического метода для определения остаточных сборочных напряжений. Даны технологические рекомендации по выбору параметров волочения, обеспечивающие требуемый натяг.

Проблема создания высокоэффективных теплообменных аппаратов неразрывно связана с разработкой и освоением технологии производства новых труб сложной формы с развитой поверхностью, позволяющей резко увеличивать эффективность теплообмена. Одним из перспективных способов их производства является холодное волочение [1].

Волочение позволяет получать различные трубы сложных сечений (многоканальные, двустенные и т.д.) и широкого сортамента с наружным диаметром 12-40 мм и толщиной стенки ребер и оболочки 1-2 мм (рис. 1). При этом наружную и внутреннюю части сборных труб изготавливают в виде прессованной оболочки и ребристого сердечника чаще всего из разнородных металлов. Оболочку, надетую с зазором на ребристый сердечник или трубу, осаживают через специальные фильеры методом волочения. После волочения сердечник расположен внутри оболочки с натягом.

Основное требование, предъявляемое к сборным многоканальным трубам - наличие прочной связи ребристой вставки с оболочкой по длине и периметру трубы. Это обеспечивает герметичность зоны контакта и минимальное термическое сопротивление, а также гарантирует высокие эксплуатационные свойства теплообменных труб [2].

Прочность связи ребристой вставки с оболочкой можно оценить величиной контактного давления q на границе ребро-оболочка, для нахождения которого чаще всего применяют тензометрический метод [3].

Для определения контактных давлений

в сборных трубах были проведены эксперименты в лабораторных условиях. Использовали гладкие оболочки из МЗ диаметром 22 мм и толщиной стенки $h = 1.5$ мм. В оболочки были свободно вставлены звездообразные сердечники с диаметром описанной окружности 18.5 мм из алюминиевого сплава АД31Т1 с числом ребер, равным десяти.

Вытяжка при сборке волочением по оболочке составляла 1.2; 1.34; 1.45. Волочение труб (рис. 1а), осуществляли на универсальной испытательной установке ЦДМУ-30 через конические волокнистые фильеры с полууглом 12° и диаметрами 20, 19 и 18 мм. После волочения трубы были нарезаны на длины, кратные трем диаметрам готовой трубы. Внешняя поверхность исследуемых образцов труб тщательно обезжиривалась спиртом. На нее наклеивались электрические тензодатчики сопротивления с базой 1 мм. Наклейку тензодатчиков производили клеем «Циокрин». Тензодатчики накладывали на нанесенный слой клея и тщательно прижимали, через 2-3 минуты клей высыхает и тензодатчики являются приготовленными к эксперименту. При

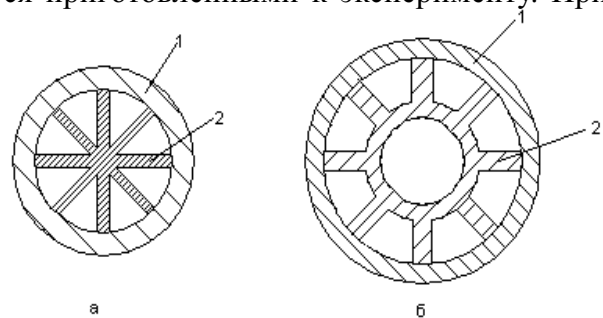


Рис. 1 - Виды сборных труб
а - многоканальная труба, б - двустенная труба
1 - оболочка, 2 - ребристый сердечник (труба)

этом исключается необходимость сушки клея при повышенных температурах, и в длительной выдержке образцов на воздухе. Все это позволяет избежать снятия (релаксации) напряжений в исследуемом образце, тем самым повысить точность эксперимента. Тензодатчики клеились в следующем порядке: три тензодатчика над ребрами сердечника, три между ними.

Выводы каждого тензодатчика подсоединяли к тензометрической аппаратуре (тензомост ВСТ-4, гальванометр, источник тока). Показания гальванометра фиксировали величину электрического тока, проходящего через тензодатчик. Затем оболочку образца аккуратно распиливали в продольном направлении между ребрами. После чего вновь измеряли электрический ток, проходящий через соответствующий тензодатчик. При этом в следствии снятия остаточных напряжений оболочка получала деформацию, фиксируемую посредством изменения сопротивления тензодатчика. Разницу между первым и вторым показанием гальванометра ΔA использовали для определения по тарировочному графику деформации ε . Затем по приведенным ниже формулам посчитывали контактное давление q и окружное напряжение σ_t .

Многоканальную трубу можно представить в виде оболочки, на внутреннюю поверхность которой в дискретных точках действует погонная нагрузка ребер P .

Нормальная сила N и момент M , появляющиеся в оболочке при разгрузке над ребрами после распилки:

$$\begin{aligned} N &= \frac{P}{2tg \frac{\pi}{n}}; \\ M &= PR \left(\frac{n}{2\pi} - \frac{1}{2tg \frac{\pi}{n}} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

R - средний радиус оболочки.

Окружное напряжение

$$\sigma_t^I = \frac{N}{F} - \frac{My}{J}, \quad (2)$$

где $F = h * 1$; $J = \frac{1 * h^3}{12}$; $y = 0,5h$.

После подстановки (2) в (1), получим

$$\sigma_t^I = \frac{P}{2htg \frac{\pi}{n}} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} tg \frac{\pi}{n} - 1 \right). \quad (3)$$

Упругая деформация разгрузки

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_t^I}{E} = \frac{P}{2htg \frac{\pi}{n}} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} tg \frac{\pi}{n} - 1 \right),$$

откуда погонная нагрузка

$$P = \frac{2\varepsilon_i h E tg \frac{\pi}{n}}{\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} tg \frac{\pi}{n} - 1}. \quad (4)$$

Контактное давление легко найти по формуле Лапласа

$$q^I = \frac{h}{R} \sigma_t^I. \quad (5)$$

Расчетные формулы для датчиков, расположенных между ребрами при разгрузке имеют аналогичный вид:

$$N = - \frac{P}{2 \sin \frac{\pi}{n}};$$

$$M = \frac{PR}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \left(\frac{\pi}{n} \sin \frac{\pi}{n} - 1 \right);$$

$$\sigma_t^{II} = \frac{P}{2h \sin \frac{\pi}{n}} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{h\pi} \sin \frac{\pi}{n} - 1 \right);$$

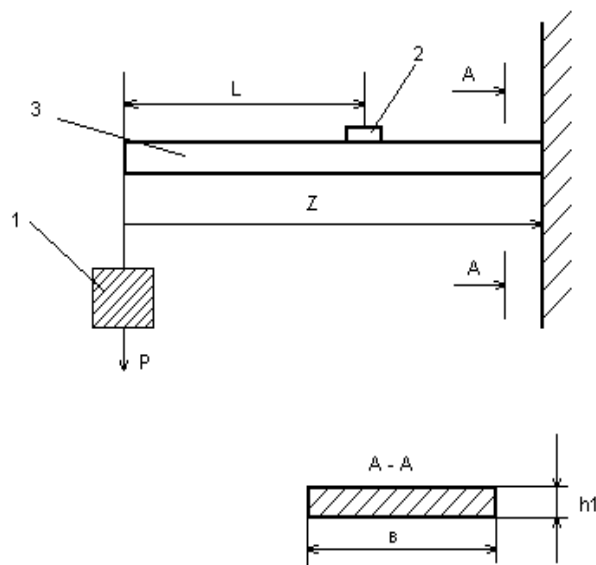


Рис. 2 - Схема нагружения тарировочного образца
1 - нагрузка, 2 - тензодатчик, 3 - консоль:
 $b=20\text{мм}$; $h=3\text{мм}$; $L=54\text{мм}$, $Z=80\text{мм}$

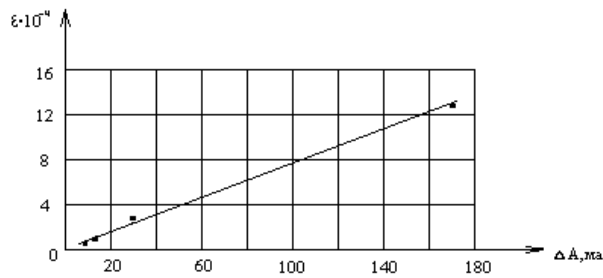


Рис. 3. Тарировочный график

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_i^{11}}{E};$$

$$q^{11} = \frac{h}{R} \sigma_i^{11}$$

Для построения тарировочного графика проводились эксперименты на стальном образце прямоугольного сечения (рис. 2).

На образец приклеивались тензодатчики. Тарировочный образец жестко закрепляли одним концом в зажиме, другой конец оставляли свободным (консоль). Свободный конец консоли нагружали усилиями 0.5кг; 1.5кг; 3.5кг, являвшимися нагрузкой тарировки P . Для каждого усилия нагружение консоли проводили три раза.

По результатам экспериментов построен тарировочный график (рис. 3).

Расчет величин контактных давлений над ребрами и между ребрами показали их близкую сходимость. Такое явление вполне допустимо, так как при большом числе ребер тонкостенную оболочку можно принять равномерно нагруженной внутренним q .

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований контактных давлений q и окружных остаточных напряжений σ . Как следует из графика, с увеличением вытяжки σ и соответственно контактное давление возрастают.

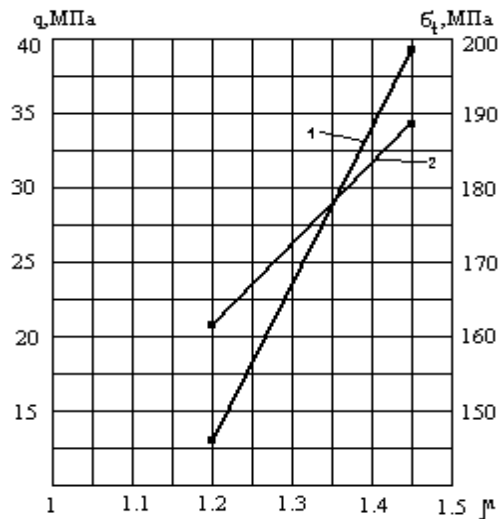


Рис. 4 - График зависимости контактного давления и окружного напряжения от вытяжки
1 - окружное напряжение σ_t ,
2 - контактное давление q

Таким образом, вытяжку при сборке труб необходимо назначать с учетом натяга, обеспечивающего возникновение контактного давления q , вследствие разной величины упругой отдачи сочленяемых элементов. Тензометрический метод позволяет найти необходимое давление, обеспечивающее прочную связь ребристой вставки с оболочкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старостин Ю.С., Голованов М.Ф., Кargin В.Р. ребристые трубы из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 134с.
2. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971, 216с.
3. Годерзиан К.К. Внутренние напряжения в металлах и сплавах, методы их измерения и устройства. М.: ЦИИИЦМ, 1962. 25с.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN CONSTRUCTIONS OF ASSEMBLED HEAT-EXCHANGE TUBES BY A STRAIN-GAUGE METHOD

© 1999 V.R. Kargin, M.V. Fedorov, V.S. Feoktistov

Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baykov
of Russian Academy of Sciences, Samara

The paper considers the process of drawing of modular tubes of solid cross-sections. Application of strain-gauge method for definition of residual assembly stresses is described. The technological guidelines to select the drawing parameters, which provide the necessary pull, are given.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ С ТЕКСТУРОЙ В ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 1999 Ф.В. Гречников¹, В.М. Зайцев¹, В.Н. Самонин², И.В. Осиновская²

¹ Волжский филиал Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены проблемы учета и использования природной и приобретенной анизотропии пластических свойств при решении задач оптимизации и интенсификации процессов деформирования листовых материалов. В основе подхода положена взаимосвязь показателей пластической анизотропии с параметрами текстуры и характеристическими константами монокристалла. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие возможность использования предложенного подхода. Рассмотрен пример использования для расчета относительной полезной высоты деталей и направлений фестонообразования заготовок из Д16 и АД0.

Анизотропия свойств, являясь одной из фундаментальных характеристик вещества, определяется типом его кристаллической решетки. Хаотичное расположение кристаллов, формируемое в процессе заготовительного литья, позволяет получить квазиизотропный слиток. Затем, при последующей обработке давлением, в частности, при прокатке, пресовании, волочении или штамповке в поликристаллическом слитке происходит поворот зерен и расположение их кристаллографических осей вдоль направления максимальной деформации. Таким образом, возникает текстура, приближающая в той или иной мере анизотропию свойств металлургических полуфабрикатов и изделий к исходной анизотропии кристаллической решетки. В связи с этим, как отмечал еще Мортон К. Смит [1] для деформированных металлов и сплавов анизотропия физико-механических свойств является скорее правилом, чем исключением.

Однако до настоящего времени большинство конструкторских и проектировочных расчетов процессов ОМД, и особенно разработка направлений их интенсификации, проводятся в предположении о шаровой изотропии деформируемых материалов, т.е. свойства материала, его реакция принимаются инвариантными к действующему напряженному состоянию. В следствие этого при анализе взаимодействия в системе “инструмент-заготовка” основное внимание уделялось совершенствованию инструмента и спо-

собов его воздействия на заготовку, а строение металла, его свойства и деформационные возможности в различных направлениях выпадали из поля зрения исследователей. Хотя, как отмечается в работе [2], “интенсификация обработки и высокие параметры продукции достигаются в том случае, если при ее изготовлении используется вещественная основа, сочетание свойств которой полностью обеспечивает желаемый результат”.

Для того чтобы при разработке направлений интенсификации процессов деформирования учесть свойства материалов, рассмотрим взаимосвязь показателей напряженного V_{σ} и деформированного V_{ε} состояний в системе “инструмент-заготовка” основных листоштамповочных операций.

Как следует из работ [3,4], напряженное состояние в операциях листовой штамповки можно полностью охарактеризовать показателем напряженного состояния:

$$V_{\sigma} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_3 - \sigma_1},$$

$$(\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3)$$

или связанным с ним показателем деформированного состояния:

$$V_{\varepsilon} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1},$$

Если при анализе формоизменяющей операции заготовка принимается изотроп-

ной, то имеет место равенство:

$$v_\varepsilon = v_\sigma. \quad (1)$$

Для анизотропных материалов взаимосвязь (1) будет иметь следующий вид [3]:

$$v_\varepsilon = \frac{3(D_2 - v_\sigma)}{D_2 v_\sigma - C_2}, \quad (2)$$

где $D_2 = 2\mu_{12} - 1$;

$$C_2 = 1 - 4\mu_{12} + 4 \frac{\mu_{12}}{\mu_{21}};$$

μ_{ij} - коэффициенты поперечной деформации (показатели анизотропии), определяемые по следующему выражению:

$$\mu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j} = -\frac{K_{ijij}}{K_{jjij}}, \quad (3)$$

где ε_i - поперечная, конечная, пластическая деформация сжатия при одноосном растяжении плоского образца; ε_j - продольная, пластическая деформация растяжения; K_{ijkl} - компоненты материального пластического девiatorа; $i, j = 1, 2, 3$ ($i \neq j$); 1- направление проката; 2- поперечное направление; 3- направление по толщине листа.

Из выражений (1) и (2) следует, что благоприятные для повышения допустимого

формоизменения заготовок схемы деформированного состояния в различных процессах штамповки могут быть созданы двумя способами:

- 1) регулированием показателя v_σ путем изменения схемы силового воздействия на заготовку;
- 2) формированием в заготовках требуемых значений показателей анизотропии μ_{ij} , определяющих собой коэффициенты D_2 и C_2 .

Как показывает анализ, наиболее активно в предыдущие годы развивалось первое направление. Основываясь на равенстве (1) разработан, как следует, например, из работы [5], целый ряд простых и сложных способов интенсификации процессов штамповки, предусматривающих определенные изменения схемы напряжений (рис.1).

Однако, заложенный в формуле (1) принцип изотропии деформируемого материала изначально суживал задачу, не позволяя рассматривать направленность свойств заготовок тоже как средство интенсификации процессов формоизменения. Вследствие этого, общим недостатком разработанных на основе равенства (1) способов является то, что в них не задействован основной объект процесса штамповки, т.е. деформируемый материал.

В связи с этим представляется целесообразным, вытекающее из выражения (2), направление интенсификации, связанное с

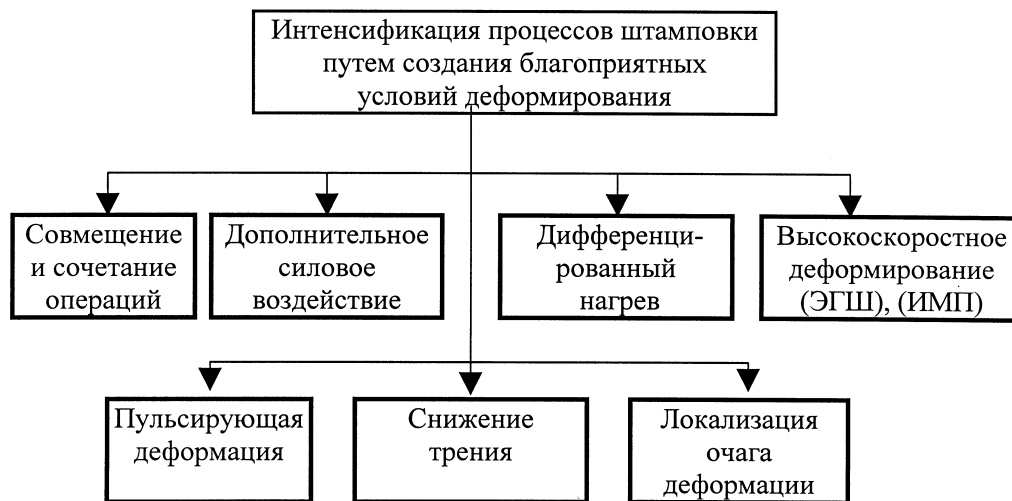


Рис.1. Способы интенсификации процессов листовой штамповки путем создания благоприятных условий деформирования

созданием в заготовках благоприятной направленности свойств, путем эффективного использования природной анизотропии кристаллов. Суть его заключается в том, что анизотропия свойств может изменять соотношение между деформациями при штамповке в пользу той, увеличение которой приведет к повышению предельных возможностей процесса в целом.

Схематично основные этапы реализации этого направления интенсификации представлены на рис.2. Как следует из представленной схемы, для разработки технологии производства листов с требуемой величиной анизотропии свойств необходимо с одной стороны для каждой схемы деформирования сформулировать требования к величине ее показателей, а с другой - иметь методику расчета состава текстуры, обеспечивающего получение в металле заданных характеристик анизотропии.

На основе представленных в работе [3] математических моделей проведен анализ влияния анизотропии на параметры процессов листовой штамповки и геометрию изде-

лий. При этом установлено, что для увеличения допустимой степени осесимметричной вытяжки, устранения явлений фестонообразования и разнотолщинности показатели анизотропии листовых заготовок должны быть максимальными по величине и одинаковыми в различных направлениях плоскости листа. Для коробчатых деталей, наоборот, предпочтительнее иметь разные в плоскости листа показатели анизотропии. Аналогичный анализ других процессов позволил сформулировать для ряда формоизменяющих операций нормативные требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии в плоскости листа в зависимости от вида операции, схемы деформирования и формы детали в следующем виде (табл.1). Представленные в табл.1 данные являются базой как для проведения технологических расчетов формообразующих операций с учетом заранее выбранных оптимальных значений анизотропии проектируемой заготовки, так и для целенаправленного формирования в листах требуемых значений анизотропии свойств.

Однако, для формирования в листовых



Рис.2. Схемы реализации направления интенсификации процессов листовой штамповки за счет создания в заготовках рациональной анизотропии свойств

Таблица 1. Обобщенные требования к величине и сочетаниям показателей анизотропии в плоскости листа

Операция	Вид деформирования	Форма детали	Рациональная величина показателей μ_{ij}		Ориентация заготовки в зоне штамповки
			Нормальная анизотропия	Плоскостная анизотропия	
Вытяжка	Осесимметричный	Цилиндрич. Коническ. Параболич.	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
	Асимметричный	Эллипсная	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_{21} (НП) Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_{12} (ПН) Большая полуось заготовки направлена вдоль μ_1 (под углом 45° к НП)
		Овальная		$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	
				$\mu_1 > \mu_{21} > \mu_{12}$ $\mu_1 > \mu_{12} > \mu_{21}$	
	Квадратная Прямоугольная	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$ $\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{12} = \mu_{21} > \mu_1$ $\mu_{12} = \mu_{21} < \mu_1$	Направление $\mu_{ij\max}$ совпадает с диагональю матрицы	
Гибка	Изгиб моментом	Не учитываются	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\min}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Линия гiba вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	
	Стестн. изгиб	--/--/--	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\min}$	--/--/--	--/--/--
Поперечн. обтяжка	Изгиб с растяжением	--/--/--	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Линия гiba вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	
			$\mu_1 > \mu_{21} \geq \mu_{12}$	Линия гiba под углом 45° к НП	
Обтяжка с растяжением	Изгиб с растяжением	--/--/--	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
				$\mu_{21} > \mu_1 > \mu_{12}$	Растягивать вдоль $\mu_{ij\max}$
				$\mu_{12} > \mu_1 > \mu_{21}$	
			$\mu_1 > \mu_{21} \geq \mu_{12}$	Растягивать вдоль 45° к НП	
Раздача	Осесимметричн.	цилиндрич.	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\min}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная
Обжим	--/--/--	--/--/--	$\bar{\mu} \rightarrow \bar{\mu}_{\max}$	$\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12}$	Произвольная

заготовках наперед заданной анизотропии физико-механических свойств необходимо прежде разработать методику предваритель-

ного расчета состава текстуры листа, который обеспечил бы требуемые значения ее показателей.

Для этого воспользуемся взаимосвязью показателей анизотропии μ_{ij} с ориентационными факторами текстуры Δ_i и упругими постоянными монокристалла S_{ijmn} в следующем виде [6]:

$$\mu_{ij} = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j};$$

$$\mu_i = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}}{2Q + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Здесь, μ_1 - коэффициент μ_{ij} под углом 45° к основным осям анизотропии;

$$\Delta_i = \langle \alpha_{i1}^2 \alpha_{i2}^2 + \alpha_{i2}^2 \alpha_{i3}^2 + \alpha_{i3}^2 \alpha_{i1}^2 \rangle;$$

α_{ij} - направляющие косинусы i -го направления в кристалле;

$\langle \dots \rangle$ - угловые скобки обозначают статистическое осреднение по всем кристаллитам, составляющим данный поликристалл;

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{S'_{11} - S'_{12}}{S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2} S'_{44}} - \text{характеристический параметр монокристалла; } S'_{ij} - \text{компоненты тензора податливости монокристалла } S_{ijmn}, \text{ записанные в матричной форме.}$$

Для определения параметров текстуры на основе заданных значений показателей анизотропии μ_{ij} представим соотношения (3) в виде следующей системы линейных уравнений:

После ряда преобразований системы (4)

$$\begin{cases} \Delta_1 + (1 - 2\mu_{12})\Delta_2 - \Delta_3 = (1 - 2\mu_{12})Q \\ (1 - 2\mu_{12})\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = (1 - 2\mu_{21})Q \\ (1 - \mu_1)(\Delta_1 + \Delta_2) + \frac{1}{2}(3\mu_1 - 1)\Delta_3 = \frac{1}{2}(1 - \mu_1) + (2\mu_1 - 1)Q \end{cases} \quad (4)$$

После ряда преобразований системы (4)

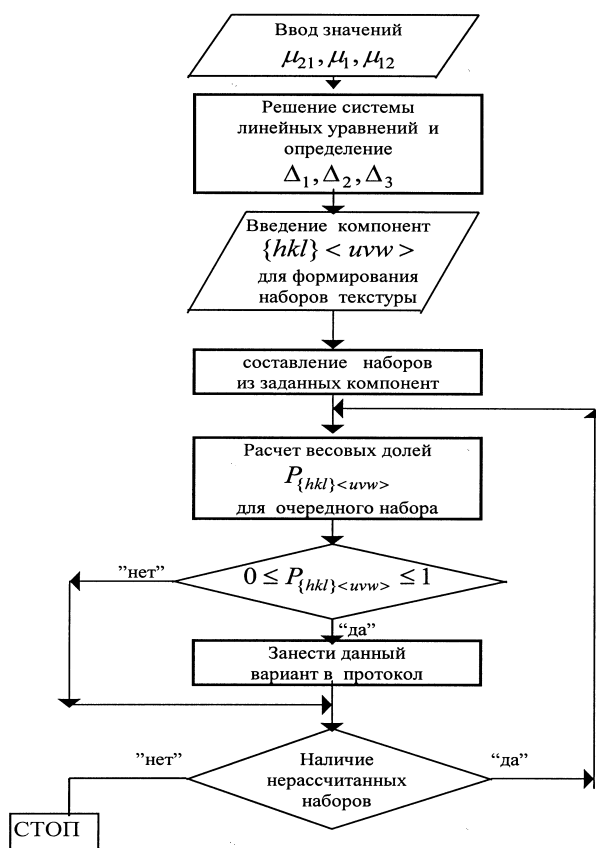


Рис. 3. Блок - схема расчета вариантов многокомпонентной текстуры

относительно трех неизвестных $\Delta_1^*; \Delta_2^*; \Delta_3^*$ - получим следующие выражения для искомых параметров текстуры:

$$\Delta_1^* = \left\{ \frac{1}{2} \mu_{12} (1 - \mu_1) + \left[\mu_{12} (3\mu_1 - 2) + \frac{1}{2} \mu_{21} (1 + \mu_1) + \mu_{12} \mu_{21} (1 - 3\mu_1) \right] Q \right\} / C;$$

$$\Delta_2^* = \left\{ \frac{1}{2} \mu_{21} (1 - \mu_1) + \left[\mu_{12} (3\mu_1 - 2) + \frac{1}{2} \mu_{21} (1 + \mu_1) + \mu_{12} \mu_{21} (1 - 3\mu_1) \right] Q \right\} / C;$$

$$\Delta_3^* = \left\{ \frac{1}{2} (1 - \mu_1) (\mu_{21} + \mu_{12} - 2\mu_{12} \mu_{21}) + \left[(\mu_{21} + \mu_{12}) (3\mu_1 - 2) + 2\mu_{12} \mu_{21} (3 - 4\mu_1) \right] Q \right\} / C, \quad (5)$$

где

$$C = \frac{1}{2} (\mu_{21} + \mu_{12}) (1 + \mu_1) + \mu_{12} \mu_{21} (1 - 3\mu_1)$$

Входящие в уравнения (5) показатели анизотропии выбираются по табл.1 с учетом вида последующего формоизменения и конкретной марки материала. Характеристичес-

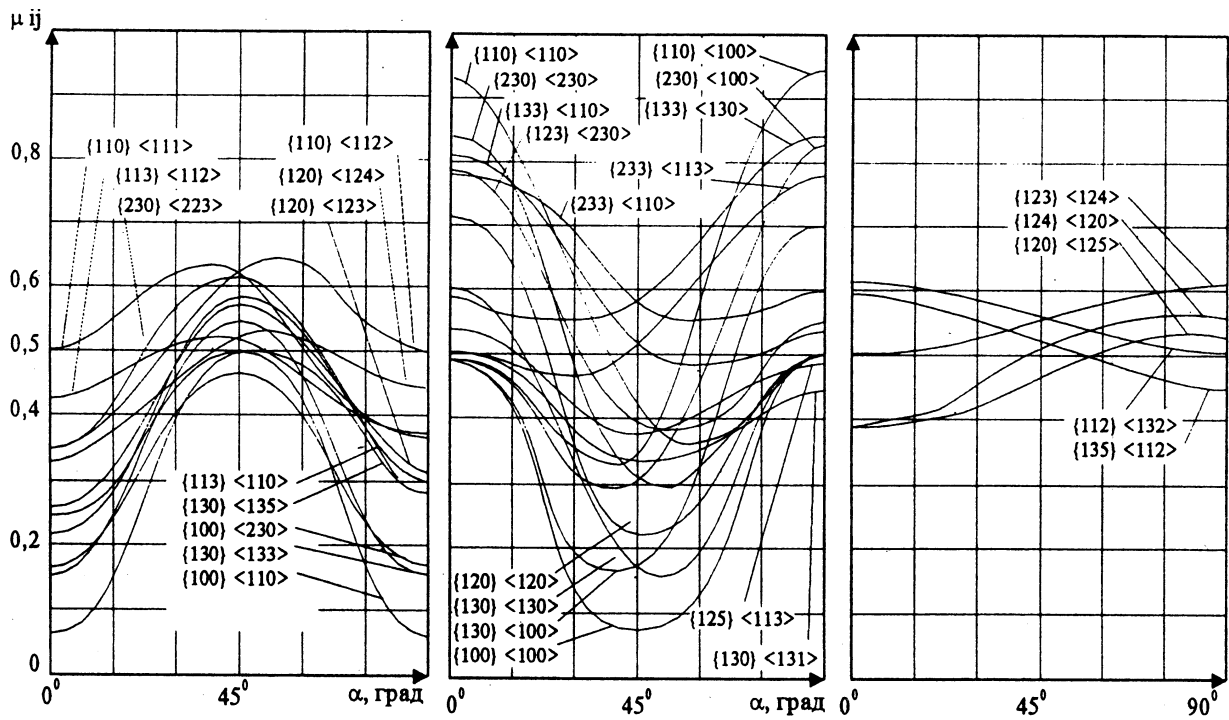


Рис.4. Значения показателей анизотропии различных типов идеальных ориентировок

кий параметр монокристалла Q определяется по справочнику и рассчитывается по вышеприведенной формуле.

Учитывая, что текстуры проката являются многокомпонентными, рассмотрим способ перехода от текстурных параметров Δ_i^* , характеризующих однокомпонентную текстуру, к многокомпонентной текстуре, состоящей из N кристаллографических ориентировок, входящих в текстуру листа с некоторыми весовыми долями P_i ($i=1, N$). С учетом этого в многокомпонентной текстуре ориентационные факторы будут определяться по следующему выражению:

$$\Delta_i = \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle}, \quad (6)$$

где $P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$ - весовая доля компоненты $\{hkl\}\langle uvw \rangle$; $\Delta_i^{\{hkl\}\langle uvw \rangle}$ - i -ый ориентационный фактор компоненты $\{hkl\}\langle uvw \rangle$.

Для определения весовых долей текстурных компонент, удовлетворяющих заданным в уравнениях (5) значениям показателей анизотропии, составим на основе формулы (6) следующую систему их четырех уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_1^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta^*_1; \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_2^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta^*_2; \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} \Delta_3^{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = \Delta^*_3; \\ \sum_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} P_{\{hkl\}\langle uvw \rangle} = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Блок-схема расчета состава текстуры по заданным значениям показателей анизотропии представлена на рис.3, а результаты расчета четырех основных компонент текстуры листов из сплава АМц - в табл.2. Из таблицы 2 видно, что одним и тем же значениям параметров текстуры Δ_i^* , определенным по

заданным значениям μ_{ij} могут соответствовать составы текстур с различным набором идеальных ориентировок и их весовых долей.

Как следует из представленных на рис.4 графиков, варьируя составом текстуры одного и того же сплава, можно в 2-3 раза изменять величину показателей анизотропии, а следовательно, и характерис-

Таблица 2. Определение по ориентационным факторам вариантов кристаллографических текстур для листов сплава АМц

Ориента	ционные	факторы	Варианты	текстуры
Δ_1	Δ_2	Δ_3	Идеальные ориентировки	Весовые доли
0.125	0.2	0.25	{011}<001>	0.517
			{011}<011>	0.228
			{233}<133>	0.177
			{139}<123>	0.078
			{011}<001>	0.460
			{123}<135>	0.345
			{233}<133>	0.135
			{139}<123>	0.059
			{011}<001>	0.468
{011}<011>	0.223			
{233}<023>	0.214			
{139}<123>	0.094			
0.19	0.26	0.13	{139}<123>	0.404
			{011}<001>	0.24
			{001}<011>	0.236
			{112}<011>	0.12
			{001}<011>	0.476
			{123}<139>	0.397
			{112}<011>	0.12
			{139}<123>	0.076
			{139}<123>	0.404
{001}<011>	0.236			
{011}<001>	0.24			
{011}<112>	0.12			
0.28	0.16	0.21	{113}<233>	0.516
			{011}<011>	0.36
			{111}<112>	0.096
			{123}<139>	0.027
			{113}<233>	0.430
			{011}<011>	0.360
			{112}<111>	0.142
			{123}<139>	0.068
			{112}<111>	0.437
{011}<011>	0.360			
{001}<011>	0.160			
{123}<139>	0.043			

тики допустимого формоизменения заготовок при штамповке.

Приведенные в табл.3 данные по изменению состава текстуры и показателей анизотропии на различных стадиях опытной прокатки сплава АМц и алюминия (А99) подтверждают приведенные на рис.4 результаты теоретического анализа выражений (3) и

(5). Как следует из табл.3 на всех этапах прокатки в составе текстуры проката присутствуют идеальные ориентировки, несвойственными для алюминиевых листов, высокими значениями показателей анизотропии ($\mu_{ij} \geq 0.65$). Однако их весовая доля в объеме материала не превышает ~15%, тогда как

Таблица 3. Изменение состава текстуры и показателей анизотропии в процессе прокатки литов

Сплав	Вид полуфабриката	Основные идеальные ориентировки	Весовые доли	Показатели анизотропии		
				μ_{21}	μ_1	μ_{12}
АМц	Слиток	{531}<123>	0.167	0.16	0.2	0.28
		{100}<010>	.082	.45	.15	.35
		{311}<233>	.073	.31	.52	.27
		{110}<001>	.06	.56	.43	.85
	Раскат	{139}<123>	.14	.28	.47	.28
		{100}<110>	.12	.14	.51	.14
		{123}<139>	.08	.52	.58	.71
	Горячекатаная полоса	{100}<100>	.10	.5	.14	.5
{113}<233>		.097	.33	.54	.27	
Холоднокатаный лист	{233}<110>	.05	.73	.56	.58	
	{100}<100>	.14	.5	.14	.5	
	{100}<110>	.094	.14	.51	.14	
А199	Слиток	{139}<123>	.093	.28	.47	.28
		{110}<533>	.05	.4	.65	.45
		{120}<112>	.54	.53	.43	.41
	Раскат	{123}<139>	.23	.52	.58	.71
		{110}<111>	.15	.5	.62	.38
		{139}<123>	.30	.28	.47	.28
		{100}<110>	.30	.14	.51	.14
	Горячекатаная полоса	{100}<100>	.22	.5	.14	.5
		{110}<100>	.15	.5	.43	.85
		{100}<010>	.11	.5	.14	.5
	Холоднокатаный лист	{139}<321>	.105	.28	.5	.28
		{320}<001>	.09	.52	.44	.78
{311}<233>		.06	.28	.52	.28	
{100}<010>		.13	.5	.14	.5	
		{311}<233>	.12	.28	.52	.28
		{123}<153>	.08	.71	.48	.54

весовая доля ориентировок с низкими значениями $\mu_{ij} \leq 0.35$ является преобладающей.

Это обстоятельство и определяет, в конечном итоге, низкие характеристики анизотропии у группы алюминиевых сплавов, а следовательно, их традиционную склонность к преимущественному развитию деформации по толщине листа, приводящему к преждевременному его утонению и снижению допустимого формоизменения, например, при вытяжке. Если же при прокатке листов получен состав текстуры, повышающий показатели анизотропии, то увеличивается и допустимое формоизменение при вытяжке (рис.5).

Таким образом, проведенный в статье анализ позволяет сформулировать следующий порядок формирования в листовых заготовках анизотропии свойств, отвечающей требованиям интенсификации листоштамповочных операций:

1. Определение для проектируемого процесса штамповки рациональной величины показателей анизотропии μ_{ij} .

2. Вычисление по формулам (5) значений ориентационных факторов текстуры Δ_i^* , удовлетворяющих заданным значениям анизотропии.

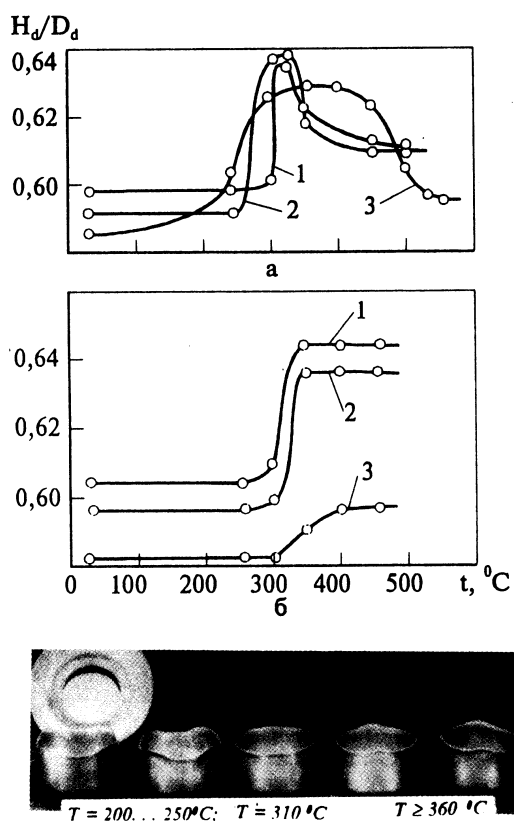


Рис. 5. Изменение относительной полезной высоты деталей и направлений фестонообразования в зависимости от сочетания степени обжатия и температуры отжига (созданной анизотропии) заготовок из Д16 (а) и АД0 (б):

Д16: 1- $\epsilon_h = 87\%$; 2- $\epsilon_h = 52\%$; 3- $\epsilon_h = 39\%$;

АД0: 1- $\epsilon_h = 38\%$; 2- $\epsilon_h = 64\%$; 3- $\epsilon_h = 89\%$

3. Определение на основе параметров Δ_i^* необходимых типов ориентировок $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ и их весовых долей.

4. Выбор схем прокатки и режимов термообработки, обеспечивающих получение в листах заданного состава текстуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мортон К. Смит. Основы физики металлов. /Пер. с англ. – М.: Metallurgizdat, 1962.-456с.
2. Материалы будущего. /Пер. с нем. – Л.: Химия, 1985.- 254с.
3. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов/ Под ред. Ф.В. Гречникова:- М.: Металлургия,1990.- 304с.
4. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов.- М.: Metallurgizdat, 1961. т.1-367с.
5. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки.- М.: Машиностроение.1989.- 304с.
6. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации).- М.: Машиностроение. 1998.- 448с.

USAGE OF INTERCONNECTION BETWEEN ANIZOTROPY FACTORS AND TEXTURE FOR OPTIMIZATION OF DEFORMATION PROCESSES

© 1999 F.V. Gretchnikov¹, V.M. Zaitzev¹, I.V. Osinovskaya², V.N. Samonin²

¹Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baykov of Russian Academy of Sciences, Samara

²Samara State Aerospace University

The paper considers the problems of registration and usage of natural and acquired plastic characteristic anisotropy for solving of optimization tasks and for intensification of sheet materials deforming processes. The approach is based on the relation between plastic anisotropy factors, texture parameters and characteristic monocrystal constants. The experimental data are given. The data confirm that it is possible to use suggested approach. This approach is applied for calculation of relative useful heights of components and for scallop formation directions of D16 and AD0 ingots.

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 1999 В.А. Барвинок¹, В.П. Самохвалов¹, А.Н. Кирилин²

¹ Научно-исследовательский институт технологий и проблем качества, г. Самара

² Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

В статье отмечено, что развитие машиностроения требует решения большого числа разнообразных задач, в числе которых одной из проблемных является задача интенсификации производства.

Применительно к производству тонкостенных деталей ЛА методами листовой штамповки задача интенсификации должна одновременно решаться на двух уровнях.

1. Интенсификация способа обработки как схемы энергетического воздействия на полуфабрикат.
2. Интенсификация технологического процесса как единства способа обработки материала и технических средств его реализации.

Рассмотрены факторы, посредством которых можно интенсифицировать процесс. По направлению и характеру их воздействия их можно разделить на два класса.

1. Факторы, приводящие к изменению физико-механических свойств обрабатываемого металла (термическое, магнитно- и электроимпульсное воздействие и т.п.).
2. Факторы, изменяющие энергосиловую схему деформационного процесса (силовая интенсификация, совмещение операций, локальное нагружение, активное использование или, напротив, исключение действия сил контактного трения и т.д.).

Приведены результаты промышленного внедрения разработанных методов интенсификации штамповки труднодеформируемых материалов с помощью энергии ИМП.

Развитие машиностроения требует решения большого числа разнообразных задач, в числе которых одной из проблемных является задача интенсификации производства, т.е. минимизации величины приведенных затрат на изготовление продукции. Анализ выполненных в этой области работ показал, что интенсификация производства является многоплановой проблемой.

Применительно к производству деталей ЛА методами обработки металлов давлением, задача интенсификации должна одновременно решаться на двух уровнях.

1. Интенсификация способа обработки, как схемы энергетического воздействия на полуфабрикат.
2. Интенсификация технологического процесса, как единства способа обработки материала и технических средств его реализации.

На первом этапе задача решается на базе разработок или использования различных схем энергетического воздействия на полуфабрикат, с целью интенсификации процесса пластического течения металла путем создания условий для наиболее полной реализации им своих потенциальных возможностей к пластической

деформации. Факторы, посредством которых можно интенсифицировать процесс, по направлению и характеру их воздействия можно разделить на два класса.

1. Факторы, приводящие к изменению физико-механических свойств обрабатываемого металла (термическое, магнитно- и электроимпульсное воздействие и т.п.).

2. Факторы, изменяющие энергосиловую схему деформационного процесса (силовая интенсификация, совмещение операций, локальное нагружение, активное использование или, напротив, исключение действия сил контактного трения и т.д.).

Одной из разновидностей обработки металлов давлением является листовая штамповка, которая позволяет получать плоские и пространственные детали самых разнообразных размеров и конфигураций с высоким коэффициентом использования металла при заданной их прочности и жесткости, а также обеспечивает высокую производительность труда и низкую себестоимость деталей в условиях различной серийности производства.

В значительной степени поставленным требованиям отвечают процессы динамичес-

кого формообразования деталей, обладающие рядом существенных преимуществ по сравнению с квазистатическими процессами штамповки деталей.

Одной из наиболее перспективных технологий динамической штамповки деталей в настоящее время, как показала практика, является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ), основанная на использовании больших электродинамических сил, возникающих в электропроводных материалах при взаимодействии внешнего импульсного магнитного поля с индуцированными им в материале вихревыми токами.

Одним из направлений интенсификации и расширения технологических возможностей МИОМ является обеспечение возможности обработки заготовок из материалов с низкой электропроводностью: коррозионностойких и специальных сталей, титановых сплавов и т.п., составляющих значительную часть номенклатуры тонколистовых и трубчатых деталей летательных аппаратов (до 10...20%) и других изделий машиностроительного производства. Вследствие сильной диффузии поля их обработка непосредственным воздействием ИМП возможна практически только при высоких частотах. При этом общий КПД процесса крайне низок, в связи с малой длительностью импульса давления, часто недостаточной для преодоления инерции заготовки. Эффективным средством интенсификации процессов магнитно-импульсной обработки этих материалов является штамповка с использованием передающих сред или технологических спутников.

Проведенные эксперименты подтверждают, что физико-механические свойства материала спутника, параметры его установки относительно заготовки определяют как кинематику деформационного процесса, так и характер ее взаимодействия с податливой оснасткой. В отличие от процессов магнитно-импульсной штамповки без спутников в рассматриваемом случае, при высокоскоростном взаимодействии оснастки и системы спутник-заготовка, упругая продольная волна сжатия, распространяющаяся от поверхности контакта заготовки с оснасткой, проходит по границе двух сред заготовки и спутника. Значение напряжений в отраженной волне будет зависеть от соотношения динамических жесткостей материалов за-

готовки и спутника:

$$\sigma_o = \sigma_n \frac{\rho_c C_c - \rho_3 C_3}{\rho_c C_c + \rho_3 C_3},$$

где σ_o , σ_n - напряжения в отраженной и падающей волнах; C_c , C_3 ρ_c , ρ_3 - скорости продольных упругих волн в материалах спутника и заготовки и их плотности.

Из результатов исследований процессов формовки-калибровки тонкостенных трубчатых заготовок получено, что большая динамическая жесткость материала медного спутника обеспечивает, при одной и той же скорости соударения заготовки с оснасткой, большую глубину распространения дополнительных пластических деформаций, чем в случае алюминиевого спутника. Это обуславливает значительно меньшее отклонение отформованной заготовки от оснастки. Однако, при постоянной энергии разряда МИУ, более тяжелый медный спутник обуславливает меньшую скорость разгона заготовки и скорость ее взаимодействия с оснасткой. Из полученных результатов следует, что с целью минимизации энергозатрат в процессах формовки следует использовать более легкие алюминиевые спутники, но при необходимости обеспечения высокой точности в операциях формовки-калибровки более предпочтительны медные спутники.

Большое влияние на кинематику процесса и величину энергозатрат при формоизменении заготовок оказывает величина предварительного зазора между спутником и заготовкой. Как показывают результаты экспериментов при малых заданных перемещениях стенки заготовки (0,1...0,5 мм, например в операциях калибровки) с целью уменьшения энергозатрат целесообразна установка спутника с зазором 0,5...1,0 мм относительно заготовки. В этом случае, за счет предварительного разгона спутника, заготовке передается достаточно большой запас кинетической энергии. При больших потребных степенях деформации установка спутника с зазором относительно заготовки не целесообразна, т.к. быстрое перемещение спутника до момента его касания с заготовкой приводит к резкому росту эквивалентного зазора, что снижает эффективность дальнейшего преобразования энергии заряда МИУ в работу пластического формоизменения заготовки.

Исходя из особенностей деформирования

двухслойной системы, возможна схема силовой интенсификации деформационного процесса магнитно-импульсной формовки на раздачу конических трубчатых деталей, путем использования спутника, защемленного по торцам заготовки. В этом случае, без применения каких-либо дополнительных средств или устройств обеспечивается непрерывное осевое нагружение торца заготовки в течение всего процесса ее деформирования. Действие осевого подпора, изменяя схему напряженного состояния в очаге деформации, приводит к увеличению возможностей деформирования заготовок (табл.1).

Величина усилия, действующего со стороны спутника на торец заготовки, в первом приближении без учета сил контактного трения между заготовкой и спутником, определяется через величину дополнительной осевой деформации заготовки ϵ при совместном деформировании со спутником:

$$\frac{b_3}{b_c} \epsilon^{n_3} + \epsilon - \frac{\alpha(S_3 + S_c)}{2l} = 0,$$

где b_c, b_3, n_c, n_3 - константы динамического деформационного упрочнения материалов спутника и заготовки, l - исходная длина заготовки, α - угол формуемого конуса, S_3, S_c - толщина стенок заготовки и спутника, ϵ - деформация заготовки.

В качестве спутников целесообразно использовать металлы и сплавы с высокой пластичностью и относительно низким пределом текучести: техническую медь М1, алюминиевые сплавы типа АД0, АМцМ, АМгЗМ, Д16М. Как показали исследования, при калибровке трубчатых заготовок, когда деформации не превышают 2%, целесообразно использование спутников из алюминиевой фольги АД0, АД1,

поскольку возможно их многократное использование до 10...15 раз, а при промежуточной доработке (разглаживании складок) и отжигах более 20 раз. Медная фольга сильно нагартовывается уже при двукратном использовании и жесткие гофры препятствуют ее последующей намотке. В результате исследования физики процесса взаимодействия спутника и заготовки при МИОМ и металлографических исследований, установлены три основных вида дефектов, возможных при штамповке со спутником: электрический прижег, холодная сварка спутника с заготовкой и наплавление материала спутника на заготовку. Для исключения всех этих явлений необходима плотная установка спутника на заготовке. При этом не следует использовать достаточно легкоплавкие спутники из алюминиевых сплавов толщиной менее 0,3...0,4 мм. В ряде случаев целесообразно нанесение слоя смазки на поверхность заготовки, контактирующую со спутником.

Экспериментально установлено, что наибольшей стойкостью при многократном использовании обладают спутники, наматываемые из фольги толщиной 0,2...0,3 мм. У спутников из фольги меньшей толщины на слоях со стороны индуктора (где имеет место максимальная плотность вихревых токов) образуются точечные прижоги, прогары и происходит сварка слоев спутника, что приводит к быстрому выходу спутника из строя. При использовании фольги толщиной более 0,3 мм на ней образуются жесткие гофры, затрудняющие ее плотную намотку при повторном использовании.

При раздаче трубчатых образцов на конус с углами 30°; 45°; 60°; 90° было установлено, что предельный коэффициент раздачи мало изменяется с углом конусности. Предельные возможнос-

Таблица 1. Предельные возможности деформирования трубчатых заготовок

Материал	Относительная толщина заготовки (S/D)·100%	Предельные коэффициенты раздачи		
		свободная раздача	формовка конусов	
			без осевого подпора	с подпором спутником
ОТ4-1	1,25	1,20	1,20	1,24
ОТ4-1	1,66	1,21	1,21	1,25
ОТ4-1	2,5	1,22	1,23	1,26
12Х18Н10Т	1,0	1,45	1,54	1,58
12Х18Н10Т	1,66	1,47	1,54	1,60

ти при формовке конических деталей существенно повышаются при силовой интенсификации процесса, путем осевого нагружения заготовки спутником. Здесь наибольший эффект дает применение трубчатых спутников из материалов с достаточно высоким пределом текучести и прочностю (но с сохранением достаточно высокой электропроводности), например, Д16Т или В95. Предельные коэффициенты раздачи за счет этого увеличиваются на 10...15%.

На точность деталей при формообразовании и калибровке заготовок с использованием спутников оказывает влияние большое число факторов: энергия разряда, частота разрядного тока, степень деформации заготовки, толщина спутника, соотношение динамических жесткостей материалов спутника, заготовки и оснастки. В связи с этим, при решении задачи оптимизации точностных возможностей процессов использовалась методика математического планирования экспериментов. Для построения математической модели был использован метод композиционного ротатбельного планирования второго порядка. После обработки результатов экспериментов и проведения статистического анализа, уравнение регрессии с учетом значимости коэффициентов имеет вид:

$$\Delta Y = 0,0201 - 0,004x_1 - 0,002x_2 - 0,012x_3 + 0,0075x_{23} + 0,0015x_1^2 + 0,0022x_2^2 + 0,0016x_3^2,$$

где x_1, x_2, x_3 - кодированные значения соответственно энергии разряда, толщины спутника и величины тангенциальной деформации заготовки.

Анализ уравнения регрессии показал, что наибольшее влияние на величину отклонения размеров детали от оснастки оказывает степень деформации заготовки, наименьшее - толщина спутника.

Управление кинематикой деформирования периферийных элементов заготовок достигается при варьировании величиной выступания спутника за торец заготовки. При этом установлено, что выступание спутников, намотанных из фольги, более чем на 1...1,5 мм приводит к их обрезке и недоформовке детали, вследствие сползания спутника. Прямолинейная форма образующей в процессе формовки, обеспечивающая наиболее высокое качество и точность детали, достигается при установке

трубчатого спутника с выступанием 1...1,5 мм относительно торца заготовки. При меньшей величине выступания возможна недоформовка борта, а при большей - отскок концевой его части. Как показали эксперименты, в диапазоне рабочих частот разрядного тока от 5 до 40 кГц, т.е. практически во всем диапазоне частот, оптимальных для штамповки со спутником, минимум энергозатрат на формовку имеет место при толщинах спутников 0,7...1,2 мм. При меньших толщинах к.п.д. процесса уменьшается вследствие просачивания поля за спутник, а при больших толщинах возрастает доля энергии, необходимой для деформирования самого спутника.

Магнитно-импульсное деформирование характеризуется воздействием на материал нестационарных магнитных полей напряженностью до $(2...3) \cdot 10^7$ А/м и импульсных токов до $5 \cdot 10^5$ А и обусловленным этим магнитно-импульсным воздействием (МИВ) и импульсным нагревом металла в процессе деформирования заготовки. В этих условиях значительно изменяются физико-механические свойства металлов и сплавов, МИВ накладывает отпечаток на сам механизм пластического течения. Магнитно-импульсное воздействие является постоянным сопутствующим фактором процессов магнитно-импульсной штамповки (за исключением случаев применения спутников), что обуславливает высокие предельные возможности метода и его интенсификацию.

Предварительный нагрев листовых заготовок из алюминиевых сплавов до 300°C позволяет повысить показатели штампуемости давлением ИМП на 5...15%. Предельные коэффициенты отбортовки отверстий для алюминиевых сплавов марок Д16АМ, АМг6М и В95 при комнатной температуре при штамповке энергией ИМП на 15...60% выше чем при обычных методах штамповки. Наибольший прирост значений коэффициентов получен на тонком материале ($S \leq 0,5$ мм). Предельные коэффициенты отбортовки наружных контуров при использовании энергии ИМП примерно в 2 раза превышают значения полученные при штамповке эластичной средой, что обусловлено высокоскоростной калибровкой деталей и разглаживанием гофров.

Штамповку деталей из сплава ВМД5 мож-

Таблица 2. Радиусыгиба листовых заготовок при штамповке ИМП с нагревом

Температура	20°C		200°C		300°C	
Марка сплава	r_{\min}	$r_{\text{раб}}$	r_{\min}	$r_{\text{раб}}$	r_{\min}	$r_{\text{раб}}$
Д16АМ	1,2	2,5	0,7	1,5	0,5	1,0
АМг6М	1,2	2,5	0,7	1,5	0,5	1,0
В95	1,0	2,5	0,7	1,5	0,5	1,0
ВМД5	0,75-2,0	1,5-4,0	0,5-1,0	1,0-2,0	---	---
МА2-1М	---	---	---	---	1,3-1,8	2,5-3,5
МА8М	---	---	---	---	1,2-1,6	2,5-3,5

но производить в холодном состоянии. Для заготовок из магниевых сплавов МА2-1М и МА8-М необходимо выдерживать температурный интервал 280...320 °С. Недостаточный нагрев листовых заготовок (ниже 280°C) при магнитно-импульсной штамповке приводит к образованию трещин или отрыву борта. Нагрев заготовок выше оптимальной температуры приводит к снижению прочности и уменьшению способности к пластической деформации. Суммарное время нагрева не должно превышать одного часа. При магнитно-импульсной штамповке магниевых сплавов предельные коэффициенты отбортовки повышаются на 5...10 % по сравнению с обычной штамповкой. Упругая отдача листовых алюминиевых сплавов при отбортовке отверстий и наружных контуров с помощью энергии ИМП при комнатной температуре в 2 раза меньше, чем при обычной штамповке. Неприлегание к штамповой оснастке при формовке деталей давлением ИМП не превышает 0,05...0,1 мм, а утонение в опасном сечении - 15...20%. При штамповке деталей из алюминиевых и магниевых сплавов с предварительным нагревом заготовок упругая отдача незначительна и точность формообразующих операций при оптимальной энергии разряда МИУ определяется только точностью инструмента и исходной заготовки.

С помощью энергии ИМП можно гнуть и формовать борта на деталях с любыми минимальными высотами (равными радиусу борта и менее). Основным показателем, определяющим технологические возможности процесса гибки, является минимальный относительный радиусгиба r_{\min} относительный рабочий радиус $r_{\text{раб}}$. Способность материала к отбортовке определяется коэффициентом отбортовки K_o . Величины вышеуказанных параметров при однопереходной штамповке, полученные в диапазоне оптимальных тем-

ператур, приведены в табл. 2 и 3.

Отработка технологических процессов проведены на Самарском заводе “Прогресс”, где освоены и внедрены в производство более 200 наименований промышленных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, коррозионно-стойких и специальных сталей и сплавов типа жесткостей, окантовок, корпусов, полупатрубок, переходников и др. из номенклатуры деталей каркаса ЛА. В освоенную номенклатуру вошли детали малых и средних размеров (от 40 до 1000 мм), довольно сложные по форме и конструкции. Изготавливаются эти детали с помощью операций гибки, отбортовки отверстий и наружных контуров различной формы, калибровки, формовки рифтов и т.п. Точность откалиброванных деталей соответствует 7...9 качеству.

Применение лазерной сварки требует особо высокой точности размеров сопрягаемых деталей, что трудно достижимо при использовании традиционных процессов получения тонкостенных деталей методами об работки металлов давлением. На заводе “Прогресс” совместно с Самарским государственным аэрокосмическим университетом проведены комплексные работы по созданию, исследованию и освоению технологических процессов прецизионной магнитно-импульсной калибровки тонкостенных оболочек. Полученные результаты были использованы при разработке технологического процесса прецизионной калибровки поясков сильфонов из сплава 08Х18Н10Т. Калибровка производилась при использовании индуктора с концентратором магнитного поля. В качестве спутника использовалась алюминиевая фольга толщиной 0,15 мм, наматываемая в 4...6 слоев. При энергии заряда магнитно-импульсной установки МИУ-20/1 равной 2,3 кДж был обеспечен разброс значений среднего ди-

Таблица 3. Коэффициенты отбортовки при штамповке ИМП с нагревом

Температура	20°C		200°C		300°C	
Марка сплава	$K_{0\text{ пр}}$	$K_{0\text{ раб}}$	$K_{0\text{ пр}}$	$K_{0\text{ раб}}$	$K_{0\text{ пр}}$	$K_{0\text{ раб}}$
Д16АМ	1,66-1,78	1,51-1,60	---	---	1,78-1,90	1,60-1,72
АМг6М	1,70-1,96	1,56-1,78	---	---	1,92-2,16	1,72-1,98
В95	1,44-1,56	1,26-1,38	---	---	1,65-1,75	1,50-1,65
ВМД5	0,75-2,0	1,5-4,0	0,5-1,0	1,0-2,0	---	---
МА2-1М	---	---	---	---	1,3-1,8	2,5-3,5
МА8М	---	---	---	---	1,2-1,6	2,5-3,5

аметра менее 0,03 мм при овальности деталей менее 0,05 мм.

Высокие технологические возможности магнитно-импульсной формовки-калибровки были подтверждены при обработке концевых участков трубчатых деталей из сплава ЭП-810ВД ($s_{0,2} = 800$ МПа) по схеме на обжим. Получены детали с отклонением размеров от номинала менее 0,1 мм.

Разработанный технологический процесс, штамповая и вспомогательная оснастка для магнитно-импульсной переформовки длинномерных трубчатых элементов датчиков уровня из алюминиевого сплава АМг3Н позволили получить детали со стрелкой прогиба менее 0,4 мм на длине 1040 мм при овальности менее 0,1 мм. При этом осуществлялась последовательная калибровка участков заготовки длиной 200 мм по оправке длиной 400 мм двукратным нагружением с поворотом заготовки на 90° при каждом переходе штамповки. При перемещении заготовки на длину равную половине ширины рабочей зоны индуктора стрелка прогиба уменьшалась до 0,25 мм.

Большой практический результат дал разработанный технологический процесс магнитно-импульсной калибровки под сварку концов

крутоизогнутых двухшовных сварных патрубков из сплава ДИ-52. Образцы имели исходную овальность до 1,2 мм. При однократном нагружении с энергией 9,85 кДж овальность концевых участков уменьшилась до 0,05...0,1 мм. Штамповка осуществлялась с применением спутника из алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А., Самохвалов В.Н., Родин Н.П., Кирилин А.Н. Расчет и моделирование процессов магнитно-импульсной формовки тонкостенных оболочек. - Машиностроение и автоматизация. - 1997.-№ 1-2.-С.64-66.
2. Самохвалов В.Н., Барвинок В.А., Родин Н.П., Кирилин А.Н. Интенсивные технологические процессы магнитно-импульсной обработки металлов. - Машиностроение и автоматизация. - 1997.-№ 1-2.- С.67-69.
3. Самохвалов В.Н., Родин Н.П., Кирилин А.Н. Совмещение операций и автоматизация процессов магнитно-импульсной штамповки тонкостенных деталей // Прогрессивные методы и технологии получения и обработки конструкционных материалов и покрытий. - Волгоград: ВГТУ, 1997.- С. 95-96.

MAGNETIC-DISCHARGE EXPANSION AND REDUCTION OF TUBE BLANKS THROUGH PULLS MAGNETIC FIELD PRESSURE

© 1999 V.A. Barvinok¹, V.P. Samokhvalov¹, A.N. Kirilin²

¹Institute of Technology and Problems of Quality, Samara

²State Research-Production Space-Rocket Centre "CSDO-Progress", Samara

This paper describes engineering method to calculate the values and distribution of effective strain inside dynamically deforming part depending on its shape. Relationship for calculation of energy consumption for magnetic-impulse stamping of parts with respect to energy loss during various stages of its transformation is presented. An analysis of means, which are developed to increase dimensional stability of parts produced for magnetic-impulse stamping, is also given.