

Обзор методов исследования схватывания металлов при совместном пластическом деформировании

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Приведены результаты исследования схватывания металлов при совместном пластическом деформировании методами: рекристаллизации, по линиям течения, при помощи координатной сетки. Приведен новый метод определения способности к схватыванию за одно испытание. Установлен характер прохождения пластических деформаций образцов из различных металлов.

Ключевые слова: схватывание металлов, пластическая деформация, метод рекристаллизации, пуансон, деформация образцов.

Введение

Непрерывное развитие, увеличение интенсивности и масштабов использования авиационной техники, рост конструктивной сложности и стоимости газотурбинных двигателей требует высокой надежности и долговечности деталей и узлов. По мере развития и совершенствования авиационной техники постоянно растут параметры двигателей, что приводит к увеличению температур и напряжений, воздействующих на детали, к возрастанию чувствительности этих деталей и различного рода повреждениям поверхностного слоя.

Поверхностный слой деталей в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному, механическому, тепловому, магнитно-электрическому и другим воздействиям. Потеря деталью своего служебного назначения и ее разрушение в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя [1]. Кроме того, интенсификация рабочих процессов авиационных двигателей требует от материалов сочетания свойств, в ряде случаев исключаящих друг друга.

Традиционные материалы, применяемые для изготовления деталей авиадвигателей, и методы упрочнения их термообработкой уже не могут, в ряде случаев удовлетворить требованиям современного авиадвигателестроения. В этом случае целесообразно использовать принципиально новый подход к выбору материалов уже на стадии проектирования. Основу детали изготавливать из одного материала, который обеспечит прочность и заданные параметры конструкции, а на поверхности, которые должны обладать специальными свойствами, наносить тонкие слои других материалов, покрытий, придавая поверхностным слоям необходимые свойства.

1. Схватывание разноименных металлов

Для определения способности к схватыванию разноименных металлов применялся тот же метод, что и для одноименных металлов. Чтобы деформация различных металлов, обладающих в отожженном состоянии сильно отличающимся сопротивлением деформированию, протекала примерно одинаково, более мягкий металл берется в наклепанном состоянии. Если же более мягкий металл не наклепывался или твердость его была намного ниже твердости металла, с которым он соединяется то мягкий металл, берется толщиной намного меньшей, чем толщина второго более твердого образца. При этом внешние силы трения между мягким металлом и пуансоном препятствуют его выдавливанию при увеличении давления, благодаря чему

могут быть достигнуты усилия, необходимые для достаточного деформирования более твердого образца и наступления схватывания.

Из проведенных опытов следует, что разноименные металлы также схватываются при комнатной температуре, причем в большинстве случаев способность к схватыванию определяется способностью к этому более легко схватывающегося металла. Нагартованный алюминий соединяется с медью и никелем при деформациях, характерных для алюминия, хотя для соединения двух образцов из меди или никеля требуются значительно большие деформации. Предварительный вывод из этих опытов сводится к тому, что соединяться при комнатной температуре может почти любая пара металлов, каждый из которых допускает пластическую деформацию. Схватывание разноименных металлов в основном определяется способностью к схватыванию металла, более активного в этом отношении.

Для определения условий, при которых происходит соединение, был испытан ряд парных комбинаций следующих металлов: меди МО, алюминиевого сплава АМц и алюминия марки АВ 000 (образцы толщиной 3 мм).

Удельные сопротивления деформированию и деформация схватывания меди намного превышают соответствующие значения для сплава АМц и особенно алюминия, находящихся в отожженном состоянии. Сопротивление деформированию этих металлов в наклепанном состоянии значительно повышается и для АМц приближается к отожженной меди (алюминий и АМц прокатывались в холодную с 10 до 3мм); деформации схватывания при этом несколько понижаются.

Наблюдаемое в некотором интервале деформаций понижение сопротивления деформированию наклепанных алюминия и сплава АМц объясняется, по-видимому, возникновением в образцах трещин, идущих от острых углов пуансонов (концентраторы напряжений). Если бы этого не происходило, кривые деформирования меди и АМц должны были бы сблизиться еще больше. Медь во всех случаях бралась в отожженном состоянии, АМц и алюминий — как в отожженном, так и в наклепанном состоянии. Значение деформации схватывания (66,2%) соответствует вырыву присоединившегося к меди участка АМц по всей толщине. На самом деле прочное соединение получается при деформациях, слегка превышающих 50%, но разрушение происходит на некоторой глубине в сплаве (на меди остается слой АМц значительной толщины). Такой характер разрушения является следствием отсутствия дополнительного упрочнения в процессе вдавливания пуансонов (сплав сильно наклепан уже перед испытанием), а также сравнительно высокой хрупкости наклепанного сплава.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наклеп и легирование алюминия повышают сопротивление деформированию, величина же деформации схватывания при наклепе понижается, а при легировании повышается. Из полученных данных также следует, что при комнатной температуре для получения соединения меди с алюминием необходимы деформации и удельные давления меньшей величины, чем в случае соединения меди со сплавом АМц. Это подтверждается и практикой получения биметаллов методом прокатки. Так, получение биметалла медь — сплав АМц значительно облегчается при введении прослойки алюминия предварительным плакированием меди.

2. Постановка проблемы и анализ исследований

Выявить при трении, какие явления и в какой степени действуют на процесс схватывания, очень трудно. Во-первых, схватывание при трении происходит в отдельных точках, и при дальнейшем смещении трущихся деталей одной относительно другой возникшие соединения металлов разрушаются с образованием новых соединений в других местах. Таким образом при трении можно наблюдать лишь статистическую картину образования и разрушения соединений металлов вследствие схватывания. При прекращении движения и снятия нормального давления большинство макроскопических участков соединения разрушается в результате упругого восстановления формы, и поэтому места, в которых произошло схватывание, трудно установить. Во-вторых, известна величина деформации на отдельных площадках непосредственного контакта в момент образования соединения. В-третьих, не известно истинное давление на отдельных площадках контакта в момент наступления схватывания и схемы напряженного состояния металла, соприкасающегося этими площадками. В четвертых, неизвестны температуры в местах образования соединений. В-пятых, на процесс схватывания влияют имеющиеся на поверхностях трения окисные и адсорбционные пленки, толщина и свойства которых могут изменяться в очень широких пределах.

Очевидно, что физическая сущность процесса схватывания при трении не может отличаться от соединения металлов при любых других видах совместного деформирования. Аналогичные взгляды высказали в своих работах В.Д. Кузнецов, Д.В. Конвисаров, Б.Д. Грозин[2-4] и др.[5-7]. Поэтому целесообразно изучать явление схватывания, моделируя его такими процессами совместного деформирования при которых можно получать соединения на достаточно больших участках и при которых достаточно большие объемы металла находятся в таком же состоянии, как и слои металла, непосредственно принимающие участие в соединении. Необходимым условием для проведения таких исследований является возможность количественной оценки деформаций, температур и давлений.

В соответствии с изложенным, для экспериментального исследования явления схватывания металлов был изучен процесс совместного деформирования листовых образцов симметрично-наклонными пуансонами и эксцентричными роликами и совместного деформирования цилиндрических образцов с цилиндрическими выступами. Такие испытания позволили установить условия, необходимые для появления схватывания, выявить влияние различных факторов на это явление и сопоставить наблюдаемое схватывание с процессами, происходящими при трении.

3. Методы исследования

Приспособление. Приспособление для одновременного деформирования двух листовых образцов состоит из неподвижной нижней плиты и подвижной верхней, перемещающейся относительно нижней по двум направляющим колоннам. Деформирующие детали сменные, что дает возможность при одном корпусе испытывать материалы различной толщины. Для проведения опытов с описанным приспособлением может быть применена любая машина, способная создать необходимые давления на испытываемые образцы.

После проведенных экспериментальных исследований форма пуансонов выбрана в виде достаточно длинных выступов с плоскими гранями, что обеспечивает неизменность механической схемы деформации в металле сдавливаемых образцов по длине пуансона. Ширина пуансонов выбрана равной толщине испытываемых листовых образцов.

Определение деформации. Так как длина пуансонов намного превышает их ширину, деформация в направлении пуансонов равна нулю. Поэтому изучение деформации может быть сведено к изучению деформации образцов в поперечном сечении. Для этого были применены три метода: рекристаллизационный, выявления линий течения и координатной сетки.

Исследования методом рекристаллизации. Суть метода заключается в исследовании рекристаллизационной картины на поперечных разрезах образцов, подвергнутых деформации различной величины, и дает лишь качественную картину распределения величин и развития пластических деформаций.

Рекристаллизационная картина изучалась на поперечных разрезах образцов, которые деформировались попарно вдавливанием плоских пуансонов на различную глубину от 10 до 90 % - через каждые 10 %. Листовые образцы из технического алюминия имели начальную толщину 3 мм каждый. Ширину пуансонов брали равной толщине образцов (3 мм).

После деформирования образцы подвергались рекристаллизационной термообработке, заключающейся в нагревании в течение 25 мин при 550°C.

Образцы в исходном состоянии имели мелкозернистую структуру. После рекристаллизации структура недеформированных участков образцов не изменялась, мало деформированные зоны приобрели крупнозернистую структуру, а сильно деформированные участки – мелкозернистую. Видно последовательное развитие деформации при постепенном увеличении глубины вдавливания пуансонов.

При глубине вдавливания, равной 10 %, почти весь металл, находящийся в объеме между пуансонами, получил после рекристаллизации крупнозернистую структуру. При глубине вдавливания в 20 % появились новые мелкозернистые зоны в виде полос сравнительно небольшой ширины, начинающиеся у краев пуансона и идущие вглубь металла образцов приблизительно под углом 45° к поверхности образца. Для глубины вдавливания пуансона 50 % включительно схватывание образцов еще не наступило, а при вдавливании пуансона на глубину 60 % и выше образцы уже соединяются попарно в результате деформирования. Мелкозернистая зона, соответствующая максимальным пластическим деформациям, расширяется, и зерно в ней становится мельче благодаря большим величинам пластической деформации.

Зоны крупных кристаллов, находящиеся снаружи зон мелких кристаллов, смещаются в стороны путем распространения в эти области пластической деформации, а также благодаря выдавливанию металла из объема, находящегося между деформирующимися плоскостями пуансонов.

Исследования по линиям течения. Суть метода заключается в рассмотрении линий течения на поперечных разрезах образцов и также дает лишь качественную картину, подтверждающую полученную рекристаллизационным методом.

Исследование при помощи координатной сетки. При сдавливании одинаковыми пуансонами двух листов образцов из одного и того же материала

равной толщины напряжения и деформации относительно плоскости раздела симметричны и на соответствующих поверхностях образцов не возникает касательных напряжений, то можно два соединяемых образца заменить одним, имеющим двойную толщину. Произведено деформирование алюминиевых образцов (99,95 % Al) двойной ширины 8 мм при ширине пуансонов 4 мм. Образцы предварительно разрезались в поперечном направлении на две части и на полированные поверхности каждой половинки образца наносили координатную сетку с шагом 0,5 мм. После этого половинки образцов попарно подвергали различным по величине деформациям. На полученных фотографиях ясно виден характер развития деформаций при постепенном увеличении глубины вдавливания пуансонов.

Аналогичную картину наблюдали И.М. Павлов и М.Н. Потоскуев. при исследовании с помощью ввинчиваемых пробок вынужденной поперечной деформации при прокатке в разрезных калибрах. В начальный период деформации образцов плоскими пуансонами возникают первые основные линии течения (по терминологии С.И. Губкина) вблизи точек периметра, ограничивающего поверхность соприкосновения металла с деформирующей плоскостью. Эти линии расположены под углом 45° к направлению приложенной сжимающей силы, и приближенно их можно считать прямыми. На глубине равной примерно половине ширины пуансона, основные линии течения встречаются одна с другой. Металл, расположенный в объеме, ограниченном основными линиями течения, находится, благодаря действию внешних сил трения, в условиях резко выраженного объемного сжатия. Поэтому при дальнейшем деформировании линии течения возникают значительно легче за пределами этого объема и деформации распространяются в глубину металла вне так называемых конусов деформации по внешним линиям течения.

Продольные линии, проходящие через конусы деформации, также прерываются в зоне основных линий течения, а линии, проходящие между пуансонами вне конусов, сближаются и образуют шейку.

При вдавливании пуансонов после встречи конусов деформация развивается далее уже внутри основных линий течения по так называемым внутренним линиям течения, проходящим внутри конусов деформации. Вдавливание пуансонов, ширина которых равна толщине испытываемых образцов, конусы деформации встречаются при глубине вдавливания пуансонов, приблизительно равной 50 %. В этот момент непосредственно наступает контакт чистых поверхностей металла. Однако прочного соединения двух образцов (схватывания) при комнатной температуре в указанный момент еще нет, оно наступает при больших глубинах вдавливания пуансонов.

При выборе ширины пуансонов следует принимать во внимание, что конусы деформаций не должны заходить один за другой.

Новые методы определения способности к схватыванию за одно испытание: Для определения деформации, при которой наступает схватывание, плоские пуансоны в опытах, вдавливали в ряд образцов на различную, постепенно увеличивающуюся глубину, что достигалось уменьшением толщины прокладок между ограничителями и основаниями пуансонов. Такой способ кропотлив и требует большого количества образцов.

Для устранения указанных недостатков разработан новый метод. Сущность его заключается в том, что вместо плоских пуансонов, дающих одну и ту же деформацию по всей длине деформирующих плоскостей пуансонов, применялись

симметрично-наклонные пуансоны, имеющие очень малый угол наклона деформирующих плоскостей по отношению к поверхностям образцов. При такой форме пуансонов деформация уменьшается от средней части пуансона к концам. Симметричная форма была выбрана для уравнивания на пуансонах боковых продольных сил, возникающих при вдавливании в поверхность металла наклонных деформирующих плоскостей. Механическая схема деформации металла между симметрично-наклонными пуансонами практически ничем не отличается от схемы деформации между плоскими пуансонами, так как возможность выдавливания металла к концам пуансонов мала вследствие незначительного наклона одной деформирующей плоскости относительно другой.

При применении пуансонов такой формы величина деформации, необходимой для схватывания образцов, определяется за одно вдавливание. Соединение получается не по всей длине пуансонов, а на том участке, в котором деформация превышает величину, необходимую для схватывания. Минимальную величину деформации, при которой наступает схватывание, определяют после растягивания соединившихся листовых образцов.

Величина деформации, при которой произошло схватывание, определяется непосредственным измерением начальных толщин образцов и оставшейся толщины металла в месте начала соединения между шаровыми наконечниками индикатора с ценой деления 0,01 мм, закрепленного в специальной скобе. Для определения величины деформации схватывания можно также применить и другой метод, основанный на технологическом процессе соединения металлов совместным пластическим деформированием вращающимися роликами, также с использованием принципа изменения деформации по длине соединения. Заключается он в том, что два сложенных вместе очищенными поверхностями листовых образца пропускаются между двумя роликами, находящимися в одной плоскости. Ролики вращаются в разные стороны с одинаковой окружной скоростью, и образцы, так же как и при процессе прокатки, втягиваются между ними за счет сил трения. Один или оба ролика посажены на ось эксцентрично. Благодаря этому деформация по длине шва (глубина вдавливания роликов) будет изменяться за один оборот от минимальной до максимальной и вновь до минимальной. При растягивании концов образцов таким же способом, как и при применении симметрично наклонных пуансонов, легко выявляется по образующейся при этом утяжине граница соединения, а, следовательно, и минимальная деформация, необходимая для соединения. Точность метода высока, так как изменение величины деформации по длине происходит очень плавно. При применении этого метода нет необходимости в специальном сдавливающем оборудовании (пресс, испытательная машина), и ролики могут приводиться во вращение вручную.

Описанные выше методы можно применять для определения способности металлов к схватыванию не только при комнатной, но и при повышенных температурах, особенно если применять капсулирование образцов.

Характер прохождения пластических деформации образцов из различных металлов: Для выяснения характера деформирования и величин деформаций на поверхностях образцов из различных металлов был применен метод координатной сетки.

Изменения координатной сетки в зависимости от глубины вдавливания исследовались и на соединяемых поверхностях и на поверхностях, находящихся в контакте с деформирующими плоскостями пуансонов.

Почти одинаковые изменения координатных сеток на различных металлах свидетельствуют о том, что никакой принципиальной разницы в характере деформирования этих образцов не имеется. Это следует также из зависимостей, для одной и той же величины деформации, увеличения шага (в процентах) от начальной его величины, а также увеличения шага от величины деформации при постоянном начальном шаге координатной сетки. Небольшие отклонения в увеличении шага координатной сетки для различных деформированных металлов ни в коей мере не могут объяснить их различной способности к схватыванию. Из рассмотрения координатных сеток, нанесенных на поверхности образцов со стороны, непосредственно деформируемой пуансоном, следует, что силы трения металла о пуансон влияют на характер пластического деформирования. У некоторых металлов (алюминия, никеля) координатная сетка почти совсем не изменилась. У других металлов (меди и в особенности олова и кадмия) течение их в стороны и соответствующее изменение координатной сетки начинается уже при сравнительно малых глубинах вдавливания пуансонов. Это приводит к некоторому уменьшению деформации по поверхности раздела и к некоторому изменению напряженного состояния металла между пуансонами в сторону уменьшения роли объемного сжатия. Однако влияние этих факторов достаточно мало, и им можно пренебречь.

Выводы

В работе приведены результаты исследования схватывания металлов при совместном пластическом деформировании методами: рекристаллизации, по линиям течения, при помощи координатной сетки. Приведен новый метод определения способности к схватыванию за одно испытание. Установлен характер прохождения пластических деформаций образцов из различных металлов.

Список литературы

1. Долматов, А.И. Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий : монография/ А.И.Долматов, А.В.Богуслаев. – Запорожье : Мотор Сич, 2000. – 295 с.
2. Богуслаев, А.В. О необходимости нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности оснастки для штамповки и литья / А.В.Богуслаев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 23 (6). – С.48–55.
3. Кузнецов, В. Д. Физика твердого тела : монография. Т. 5. Материалы по физике пластичности и хрупкости металлов / В. Д. Кузнецов. – Томск : Полиграфиздат, 1949. – 670 с.
4. Конвисаров, Д. В. Внешнее трение и износ металлов / Д. В. Конвисаров. – Свердловск ; М. : Машгиз, 1947. – 184 с.
5. Грозин, Б. Д. Износ металлов / Б. Д. Грозин. – К. : Гостехиздат Украины, 1951. – 252 с.
6. Дубинин, А. Д. Энергетика трения и износа деталей машин / А. Д. Дубинин. – М. ; К. : Машгиз, 1963. – 140 с.

7. Антонов, И. А. Газопламенная обработка металлов / И. А. Антонов. – М. : Машиностроение, 1976. – 264 с.

8. Шамшин, Д. Л. Неорганическая химия : учебник / Д. Л. Шамшин ; под ред. Г. Лучинского. – М. : Высш. шк., 1975. – 302 с.

Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. А.И. Долматов Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 04.02.2014

Огляд методів дослідження схоплювання металів за умови спільного пластичного деформування

Наведені результати дослідження схоплювання металів за умови спільного пластичного деформування методами: рекристалізації, вздовж ліній течії, за допомогою координатної сітки. Наведено новий метод визначення здатності до схоплювання за одне випробування. Встановлено характер проходження пластичних деформацій зразків з різних металів.

Ключові слова: схоплювання металів, пластична деформація, метод рекристалізації, пуансон, деформація зразків.

Review of Research Methods of Metal Fastening under the Joint Plastic Deformation

The article presents the results of a study of metal fastening under the joint plastic deformation using the recrystallization method, the method of study along the flow lines, using the coordinate grid. A new method for determining the ability of fastening within one test is put forward. The nature of plastic deformation for samples of different metals is determined.

Keywords: metal fastening, plastic deformation, recrystallization method, punch, deformation of samples.