

М124903
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Инж. КОНДАКОВ Г. Ф.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УСТРАНЕНИЯ
СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ
В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ
СПЛАВОВ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ
МЕТАЛЛА ШВА

05.167 «Машины и технология сварочного производства»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — д. т. н. Сагалеви́ч В. М.

Официальные оппоненты:

д. т. н., проф. Погодин-Алексеев Г. И.

к. т. н. Яровинский Ю. Л.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан «...» 1971 г.

Защита диссертации состоится «...» 1971 г.

на заседании Ученого Совета

МВТУ им. Баумана, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

ВВЕДЕНИЕ

Создание облегченных тонколистовых и тонкостенных сварных конструкций связано с широким внедрением магниевых и высокопрочных алюминиевых сплавов.

Большинство технологических вопросов, связанных непосредственно с соединением этих материалов, успешно решается специалистами-сварщиками. Однако, дальнейшее расширение производства конструкций из магниевых и высокопрочных алюминиевых сплавов требует решения ряда сложных задач, среди которых одно из первых мест принадлежит проблеме борьбы со сварочными деформациями и напряжениями. Важность этой проблемы обусловлена значительной деформируемостью при сварке конструкций из этих сплавов, малой изученностью закономерностей образования остаточных сварочных напряжений и деформаций, особенно при сварке высокопрочных дисперсионотвердеющих алюминиевых сплавов, жесткими требованиями к способам устранения сварочных деформаций, заключающимися в том, что наряду с устранением короблений от сварки необходимо и почти полное снятие остаточных напряжений.

В настоящее время на основе исследований Николаева Г.А., Ожерелова Н.О., Куркина С.А., Винокурова В.А., Сагалевича В.М., Кузьмина С.А. и др. разработано много способов устранения сварочных деформаций и напряжений. Наиболее эффективными из них являются способы, основанные на послесварочном пластическом деформировании металла шва и, в том числе, на ударном деформировании.

Использование удара для создания пластической деформации позволяет значительно расширить возможности деформирующих устройств при одновременном уменьшении их веса и габаритов. Однако, многие вопросы процесса ударного местного деформирования материала, особенно относящиеся к многократному нагружению с относительно малыми степенями деформации ($< 10\%$), наиболее приемлемые для устранения сварочных деформаций, практически не освещены в литературе. Важнейшими из этих вопросов, являются:

1. Определение связи между скоростью удара и энергетическими затратами на ударное деформирование;

2. Особенности распределения остаточных напряжений и пластических деформаций при ударном нагружении;

3. Определение влияния разновидностей технологических приемов проковки (количество проходов по шву, проведение термообработки до проковки и после нее) на деформационное и напряженное состояние обрабатываемых сварных соединений.

В связи с изложенным цели и задачи работы по исследованию основ

M 124903

ных параметров местного ударного деформирования сварных соединений, были сформулированы следующим образом:

а) Определение продольных остаточных напряжений и деформаций при сварке высокопрочных алюминиевых и магниевых сплавов и анализ существующих способов их устранения с точки зрения эффективности;

б) Исследование влияния параметров процесса ударного нагружения на энергоемкость ударных устройств и характер распределения остаточных напряжений. Определение оптимального режима проковки сварных соединений листовых конструкций;

в) Исследование связи между параметрами режима проковки и величиной остаточных напряжений (при полном устранении сварочных деформаций) в сварных соединениях;

г) Определение основных закономерностей протекания процесса ударного деформирования сварных соединений в широком диапазоне скоростей удара;

д) Исследование влияния разработанных технологических мероприятий на работоспособность деформированных сварных соединений путем проведения стандартных испытаний и испытаний на двухосное растяжение.

Работа проводилась на наиболее широко применяющихся термически неупрочняемых магниевых сплавах МА-2-І, ВМД-3 и высокопрочных дисперсионотвердеющих алюминиевых сплавах ОІ9ІІ, Д20-І, а также термически неупрочняемом сплаве АМг6М.

Работа выполнена в лаборатории сварки МВТУ им. Баумана в контакте с рядом предприятий.

І. Деформации и напряжения при сварке тонколистовых конструкций из сплавов МА2-І, ВМД-3, ОІ9ІІ, Д20-І и анализ существующих методов их устранения

Остаточные деформации тонколистовых конструкций из *АВ* и *Мг* сплавов после сварки возникают под действием остаточных напряжений.

Остаточные напряжения в данной работе определялись механическим способом, основанным на принципе полной разгрузки участков металла при их разрезке. Измерения проводились съемными механическими деформометрами конструкции МВТУ им. Баумана на базах 100, 50 и 10 мм.

Результаты замеров распределения продольных остаточных напряжений в поперечных сечениях пластин из сплавов МА2-І, ВМД-3, ОІ9ІІ и Д20-І показывают, что характер распределения напряжений в термически упрочняемых алюминиевых сплавах ОІ9ІІ и Д20-І и магниевом сплаве МА2-І аналогичен. В сварном шве на каждом из материалов наблюдается некоторое уменьшение напряжений относительно максимальных растя-

И. П. О. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

ващих напряжений в околошовной зоне. Относительная величина уменьшения напряжений в шве наиболее значительна у высокопрочных алюминиевых сплавов, вследствие разупрочнения материала при сварке.

Распределение продольных напряжений в сварных соединениях сплава ВД-3 подобно распределению напряжений в соединениях из малоуглеродистой стали.

Величина продольных остаточных напряжений на всех исследованных сплавах не превышает значения предела текучести основного материала и составляет для МА2-І - 0,58 σ_T ; ВД-3, Д20-І - 0,45 σ_T ; ОІ9ІІ - 0,37 σ_T .

В работе на основании современных представлений о процессах деформирования при сварке материалов дано качественное объяснение причин низких остаточных напряжений в алюминиевых и магниевых сплавах.

Для уменьшения сварочных напряжений применительно к рассматриваемым материалам на практике применяют главным образом термообработку. Определение эффективности термообработки по степени снятия остаточных напряжений свидетельствует о том, что отжиг термически неупрочняемых магниевых сплавов при температуре 250°С и выдержке 1 ч. уменьшает максимальную величину напряжений на 50%. Искусственное старение (сплав ОІ9ІІ) и отпуск (сплав Д20-І), назначаемые из условий сохранения прочностных свойств и стабилизации структуры, дают снижение остаточных напряжений в сплаве ОІ9ІІ на 24%; Д20-І на 39%. Наибольший эффект (около 50%, сплав Д20-І) в устранении сварочных напряжений в высокопрочных алюминиевых сплавах достигается применением двойной термообработки - искусственное старение до сварки и низкотемпературный отпуск после сварки.

Наиболее широко применяющимися и эффективными способами устранения сварочных деформаций, позволяющими в значительной степени уменьшить напряжения являются способы, основанные на пластическом деформировании металла шва.

В настоящей работе исследуются два таких способа создания пластических деформаций: статическое - медленная прокатка шва роликами и динамическое - машинная высокоскоростная проковка.

Для выяснения возможности применения прокатки в целях устранения деформаций и напряжений были проведены эксперименты на сварных образцах из сплавов МА2-І и ОІ9ІІ толщиной 1,5 и 3 мм. Прокатку осуществляли на прокатной машине ПМ-І стальными роликами диаметром 80 мм и шириной рабочего пояса $B = 10$ мм.

Для образцов из магниевого сплава были опробованы две схемы прокатки. В одной партии прокатке подвергали только сварной шов а во

второй — шов и околошовную зону по обе стороны от шва. Эффективность воздействия применяемых режимов и схем прокатки на устранение сварочных деформаций и уменьшение напряжений оценивается по величине прогиба образца после сварки и после прокатки, а также по уровню и характеру распределения продольных остаточных напряжений.

Полное устранение деформаций магниевых и высокопрочных алюминиевых сплавов при прокатке шва сопровождается не устранением, а перераспределением остаточных напряжений. Достаточно равномерное снижение напряжений в сварных соединениях этих сплавов возможно при пластическом деформировании по всей ширине зоны сварочных пластических деформаций, что реально осуществимо для ограниченного ряда конструкций и приводит к увеличению трудоемкости работ и усложнению технологического процесса.

Как показали предварительные исследования, рациональным способом обработки сварных соединений с целью устранения сварочных деформаций и напряжений является ударное пластическое деформирование металла шва.

П. Исследование влияния параметров высокоскоростного деформирования на распределение остаточных напряжений и деформаций в пластинах

Каждое ударное устройство можно характеризовать следующими основными параметрами: скоростью удара, энергией единичного удара и частотой следования ударных импульсов. Все эти характеристики ударных устройств, как показывают теоретические и экспериментальные работы Рахматулина Х.А., Соколовского В.В., Бахшияна Ф.А., Александрова Е.В., Соколова Л.Д. и др. оказывают существенное влияние на сопротивление материала пластическому деформированию и на распределение пластических деформаций и остаточных напряжений в деформируемом металле. В настоящее время широкое применение находят высокоскоростные способы пластического деформирования материалов. Наибольшее распространение они получили в обработке металлов давлением. Ударное деформирование шва (машинная проковка) также представляет собой не что иное, как последовательно повторяющуюся осадку металла. Аналогия процессов, происходящих при проковке сварных швов, с операциями осадки и родственными ей позволили использовать имеющиеся литературные данные для выяснения физической стороны процессов, а также сформулировать задачи, необходимые для решения при применении высокоскоростной проковки с целью устранения сварочных деформаций.

Для обоснованного выбора режимов ударного деформирования магниевых и алюминиевых сплавов необходимы исследования по совместному влиянию скорости и частоты нагружения на величину энергии деформирования и характер распределения остаточных напряжений в диапазоне практически применяемых скоростей высокоскоростного нагружения (до 35 м/сек).

В работе исследовались скорости деформирования от 6 до 31 м/сек при изменении частоты ударов от 1300 до 3150 уд/мин.

Различные скорости деформирования получены применением ударного устройства, состоящего из пневмомолотка Р-1 с тремя типами взаимозаменяемых наборов масс, вставляемых в корпус механического ускорителя^{х)}. Повышение скорости удара происходит за счет использования набора масс, уменьшающихся от первого элемента механического ускорителя, воспринимающего ударные импульсы от ударника пневмомолотка, до последнего элемента-бойка.

Исследования влияния скорости и частоты нагружения на величину энергии деформирования проводили на пластинах из сплавов МА2-1 толщиной 1,5, 3 и 8 мм и АМГБМ толщиной 1,5 и 3 мм. Прокровка образцов на всех скоростях деформирования выполнялась цилиндрическими бойками ϕ 12 мм с плоским торцем рабочей поверхности.

Влияние скорости деформирования на распределение пластических деформаций и остаточных напряжений изучали на плоских образцах размером 350x250x3, имеющих буртик в середине образца, имитирующий усиление шва.

В качестве основной характеристики режима ударного деформирования сварных швов принята удельная энергия деформирования, представляющая собой отношение энергии единичного удара к объему деформируемого материала при перемещении бойка на шаг:

$$q_s = \frac{AN\eta_n}{SH\delta} \cdot 10^{-2}, \text{ кг/см}^3,$$

где: A — энергия единичного удара, в кгм²;

N — частота ударов, в уд/мин;

S — скорость проковки, в м/мин;

H — ширина зоны деформируемой бойком, в см;

δ — толщина материала в месте деформирования, в см;

η_n — к.п.д. удара (0,83±0,88).

Эффективность ударного деформирования сварных швов целесообразно оценивать по величине удельной энергии деформирования для различных степеней деформаций в зависимости от скорости и частоты ударов. Для получения этих зависимостей по значениям энергии

х) Механический ускоритель разработан инж. Милехиним Е.С.

единичного удара, частоты ударов, скорости деформирования определяемым из характеристик ударного устройства, для различных степеней деформаций строили пространственные диаграммы, "удельная энергия деформирования - степень деформации - скорость деформирования", "энергия единичного удара - степень деформации - скорость деформирования", "энергия единичного удара - степень деформации - частота ударов". Получение стабильной деформации по всей длине деформируемого материала достигается путем закрепления ударного устройства на стенде и поджатия его к обрабатываемому материалу с определенным усилием. Предварительными экспериментами было установлено, что оптимальные значения усилия поджатия ударного устройства при проковке должны составлять 30+35 кг включая и вес ударного устройства.

Анализ результатов позволил установить, что с увеличением скорости деформирования для получения заданной степени деформации требуется меньшая удельная энергия. Например, для создания деформации 2% на сплаве МА2-І толщиной 3 мм необходимая удельная энергия с ростом скорости от 6 до 19 м/сек уменьшается на 20%. С увеличением степени деформации, уменьшением толщины материала и скорости перемещения обрабатываемого объекта относительно инструмента величина удельной энергии деформирования интенсивно снижается.

Проведенные исследования выявили некоторое различие во влиянии скорости удара на величину удельной энергии в исследуемых материалах. При одинаковых условиях проковки большее влияние скорости удара на требуемую удельную энергию деформирования особенно при больших скоростях удара наблюдается на сплаве АМг6М. На образцах со степенью деформации 4% снижение удельной энергии в диапазоне скоростей от 7,25 до 18 м/сек. составляет на сплаве АМг6М - 16%, на сплаве МА2-І - 16,5%, а при скоростях деформирования от 18 до 23 м/сек. эта величина составляет соответственно 35% и 15%.

Значительное понижение величины удельной энергии деформирования при проковке плоских образцов из сплавов МА2-І и АМг6М с увеличением скорости удара во всем исследованном диапазоне скоростей происходит вследствие частичного разупрочнения материала, как в очаге деформации, так и в металле, окружающем очаг деформирования в результате интенсивного выделения тепла при пластической деформации с высокими скоростями. Это подтверждается снижением твердости с ростом скорости удара при одинаковой степени деформации, а также увеличением степени деформации при одинаковой скорости деформирования и энергии единичного удара с ростом частоты ударов.

С повышением энергии единичного удара, скорости и частоты деформирования степень деформации листов в направлении толщины возрастает. Это связано с тем, что с увеличением энергии единичного удара, скорости и частоты происходит рост температуры нагрева материала, которая приводит к более интенсивному протеканию процесса разупрочнения.

Проведенные эксперименты по определению остаточных напряжений и пластических деформаций после проковки со скоростями удара 8 и 26 м/сек свидетельствуют о значительном влиянии скорости деформирования на распределение остаточных напряжений.

Измерения, выполненные на магниевом сплаве показали, что при скоростях удара 8 и 26 м/сек в деформируемой зоне имеют место сжимающие остаточные напряжения, которые с удалением от очага деформации переходят в растягивающие. Однако, при деформировании с большей скоростью удара во всем исследуемом диапазоне удельных энергий величина сжимающих напряжений в деформируемой зоне существенно меньше. Наибольшее снижение сжимающих напряжений при скорости удара 26 м/сек обнаружено при значении удельной энергии деформирования $\frac{A}{V} = 40 \text{ кгм/см}^3$ и составляет ~ 60% от значений, полученных при проковке со скоростью 8 м/сек.

На сплаве АМГМ увеличение скорости удара с 8 до 26 м/сек вызывает смещение максимальных сжимающих напряжений в область непосредственно не подверженную деформации, а в центре деформируемой зоны возникает напряжения растяжения. Максимальная величина растягивающих напряжений соответствует значению удельной энергии $\frac{A}{V} = 35 \text{ кгм/см}^3$ и составляет $2,7 \text{ кг/мм}^2$. Изменение удельной энергии деформирования приводит к уменьшению величины растягивающих напряжений в деформируемой зоне и образованию при $\frac{A}{V} = 20 \text{ кгм/см}^3$ сжимающих напряжений.

Характер изменения величины продольной остаточной пластической деформации в зависимости от удельной энергии аналогичен изменению сжимающих напряжений при соответствующих скоростях нагружения. При этом установлено, что с ростом скорости удара (8 и 26 м/сек) при одинаковой степени деформации происходит увеличение ширины зоны остаточных пластических деформаций на 40+50%, что является благоприятным фактором для снятия растягивающих сварочных напряжений в околосварной зоне.

Изменение величины остаточных напряжений и пластических деформаций с ростом скорости деформирования свидетельствует о существенном влиянии локализованного выделения тепла на процесс про-

текания пластических деформаций в деформированной зоне.

Особенности распределения остаточных напряжений и пластических деформаций при высокоскоростной проковке пластин могут быть выявлены путем численного решения задачи, позволяющей проследить кинетику образования остаточных напряжений и деформаций во времени.

III. Расчетно-экспериментальное исследование процесса высокоскоростного деформирования пластин

Определение деформаций и напряжений в процессе высокоскоростной проковки представляет собой сложную задачу о движении динамически нагружаемой упруго-пластической зоны в пластине. Решение подобной задачи в общем виде с учетом переменной скорости деформации в условиях изменяющихся в широких пределах физико-механических характеристик деформируемого материала крайне затруднительно.

В первом приближении динамическая задача может быть представлена, как задача о движении статически деформируемой упруго-пластической зоны, но с учетом температурного поля, создаваемого пластической деформацией и переменных механических свойств. Решение этой задачи может быть выполнено на основе разработанного в МВТУ им. Баумана способа решения упруго-пластических задач на цифровых вычислительных машинах.^{х)}

В отличие от задачи по определению сварочных напряжений задача по определению напряжений при высокоскоростной проковке пластин имеет следующие особенности.

1. Возникновение температурного поля в случае движения динамически нагруженной упруго-пластической зоны происходит не за счет непосредственного нагрева пластины внешним тепловым источником, а за счет тепла, выделяющегося при пластической деформации.

2. Упругое решение задачи складывается не только из компонентов напряжений и деформаций, вызванных температурным полем, но и компонентов напряжений и деформаций, вызванных деформированием нагруженных участков в предположении абсолютно упругой деформационной характеристики материала с постоянным модулем упругости.

3. Механические свойства, назначаемые для каждого участка путем задания деформационной характеристики определяется не только в зависимости от величины температуры нагрева данного участ-

х) Авторы способа д.т.н. проф. Винокуров В.А., к.т.н. Григорьяни А.Г.

ка, но и от расположения участка относительно очага деформации, которое характеризует степень упрочнения материала.

Определение температурного поля при высокоскоростной проковке позволяет проанализировать отдельно влияние температурного эффекта на остаточные напряжения и на механические свойства сварных соединений. Для расчета температурного поля вводятся следующие допущения:

1. Перемещение ударного устройства происходит только в промежуток времени между ударами.

2. Тепло выделяется в объеме, превышающем объем деформированного за один удар материала на величину смещенного объема, т.е. в объеме $\rho \cdot H \cdot \delta$, где: ρ — шаг между ударами; H — ширина контактного пятна, δ — толщина листа в зоне деформирования.

3. Теплофизические свойства материала, объемная теплоемкость (c), коэффициенты температуропроводности (a) и теплопроводности (λ) не зависят от температуры и степени деформации.

Исследования распределения температур показали, что с достаточной точностью можно пренебречь распределенностью тепла на площадь очага деформации и представить процесс распределения тепла от движущегося распределенного линейного источника, как от сосредоточенного подвижного источника. При этом выражение для распределения температуры в зоне удара, используя формулы Рыкалина Н.Н. для предельного состояния, запишется:

$$T = \frac{\eta_{\text{вы}} K_T (1 - K^2) A \cdot N}{2\pi \lambda \delta} e^{-\frac{Sx}{2a}} K_0 \left(2\sqrt{\frac{S^2}{4a^2} + \frac{t}{a}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где: K_T — механический эквивалент тепла, кал/кгм; $\eta_{\text{вы}}$ — коэффициент выхода тепла; K — коэффициент потерь скорости; δ — коэффициент теплоотдачи, Г/сек.

Распределение температуры вне зоны удара выразится соотношением (2), умноженным на $\frac{\delta - \Delta}{\delta}$, где Δ — величина осадки материала под бойком.

Решение уравнения (2) проводили в численном виде с помощью ЭЦВМ без учета теплоотдачи.

Наряду с аналитическим расчетом температурных полей от источника тепла, образованного пластической деформацией металла, производили экспериментальное определение температур при проковке. Термометрирование проводилось для точек расположенных в срединной плоскости образца и отстоящих на разном расстоянии от края бойка. Замер температур осуществлялся хромель-копелевыми (Х-К) термопарами ϕ 0,15 мм. Регистрирующим прибором являлся осциллограф МПО2. Термические циклы снимались одновременно для несколь-

ких точек. Значение максимальных температур, полученное расчетным способом без учета теплоотдачи и определенное экспериментально отличается для точек отстоящих от деформируемой зоны на расстоянии 1,5 мм не более чем на 2,1% и для точек на расстоянии 3,5 мм на 8%, что свидетельствует о правильности выбора физических предпосылок при расчете температурных полей, образующихся в процессе высокоскоростной проковки.

Компоненты напряжений σ_{xj}^T , σ_{yj}^T , τ_{xyj}^T и деформации ε_{xj}^T , ε_{yj}^T , γ_{xyj}^T упругого решения в бесконечной пластине, вызванные температурным полем от линейного источника, определяются в предположении абсолютно упругой деформационной характеристики материала с постоянным модулем упругости по формулам, предложенным В.А.Винокуровым для случая плоско напряженного состояния в пластине. Упругое решение от задаваемой пластической деформации (σ_{xj}^p , σ_{yj}^p , ε_{xj}^p , ε_{yj}^p , γ_{xyj}^p) находится в предположении равенства упругой деформации пластической деформации под бойком. Решение выполняется в численном виде. При этом предполагаемая область упруго-пластических деформаций разбивается на ряд участков. Упругая деформация в участках под бойком, например, в "К", создается за счет сжимающих напряжений $\sigma_{z(k)}$ и сжимающих единичных сил $q_k = q_c$ при условии $\varepsilon_{xk} = \varepsilon_{yk} = 0$ и соответствует определенному режиму проковки. Значения $q_k = q_c$ определяются для случая объемного состояния. При этом величина упругой деформации для "К" участка, условно выделенного из пластины в области под бойком, выражается через напряжения $\sigma_{z(c)}$ следующим образом.

$$\varepsilon_{z(k)} = \frac{1}{E} (\sigma_{z(c)} - \frac{2\mu^2 \sigma_{z(k)}}{1-\mu}) \quad (3)$$

Подобным выражением определяются величины задаваемых упругих деформаций ε_z и для других участков в очаге деформации.

Условие равновесия непосредственно деформированных участков при наклеивании их в пластину записывается

$$\varepsilon_{z(k)} = \frac{1}{E} (C_{(k,k)} \sigma_{z(k)} + C_{(k+1,k)} \sigma_{z(k+1)} + \dots + C_{(k+n,k)} \sigma_{z(k+n)}) + \frac{\sigma_{z(k)} (1-\mu^2 - 2\mu^2)}{E (1-\mu)};$$

$$\varepsilon_{z(k+1)} = \frac{1}{E} (C_{(k,k+1)} \sigma_{z(c)} + C_{(k+1,k+1)} \sigma_{z(k+1)} + \dots + C_{(k+n,k+1)} \sigma_{z(k+n)}) + \frac{\sigma_{z(k+1)} (1-\mu^2 - 2\mu^2)}{E (1-\mu)}, \quad /4/$$

$$\varepsilon_{z(k+n)} = \frac{1}{E} (C_{(k,k+n)} \sigma_{z(k)} + C_{(k+1,k+n)} \sigma_{z(k+1)} + \dots + C_{(k+n,k+n)} \sigma_{z(k+n)}) + \frac{\sigma_{z(k+n)} (1-\mu^2 - 2\mu^2)}{E (1-\mu)}$$

где: $C(k, k)$, $C(kn, kn)$, $\dots$, $C(km, km)$ - коэффициенты, учитывающие действие дополнительных объемных сил (q_x и q_y) приложенных к рассматриваемым участкам; $C'(k, k)$, $C'(kn, k)$, $\dots$, $C'(km, k)$ - коэффициенты, учитывающие действие дополнительных объемных сил приложенных сил $q_x(kn)$, $\dots$, $q_x(km)$ и $q_y(kn)$, $\dots$, $q_y(km)$, приложенных к остальным участкам области пластических деформаций; M - число участков под бойком.

Из системы уравнений (4) определяются значения сжимающих напряжений $\sigma_1(k)$, $\dots$, $\sigma_2(km)$ по которым с учетом движения задаваемой упругой зоны определяются новые дополнительные объемные силы

$$q'_x(k), \dots, q'_x(km) \text{ и } q'_y(k), \dots, q'_y(km).$$

Далее находятся распределение напряжений от этих дополнительных объемных сил во все участки области предполагаемой упруго пластической деформации, определяются компоненты напряжений и деформаций упругого решения от задаваемой пластической деформации. В участках, непосредственно не подверженных пластической деформации, компоненты деформации вычисляются для случая плоского напряженного состояния.

Упругое решение задачи о движении динамически деформированной зоны в пластине получим, сложив результаты упругих решений от пластической деформации и от температурного поля. Полученные упругие поля напряжений и деформаций являются основой для решения упруго-пластической задачи, позволяющей с учетом свойств материала в различных зонах определить временные и остаточные напряжения при высокоскоростной проковке. Переменные деформационные характеристики материала при различных температурах и скоростях деформирования определяются аналитическим способом на основе экспериментальных данных.

Решение задачи производится за несколько приближений. В каждом приближении первоначально вычисляются напряжения соответствующие разности полной деформации данного участка и пластической деформации предыдущего в ряду участка. Затем для каждого участка находятся разности напряжений, определяющие несоответствие вычисленных напряжений с напряжениями упругого решения. На втором и последующих этапах приближения в качестве исходного поля рассматриваются компоненты напряжений предыдущего приближения. Полученные разности напряжения представляют собой дополнительные объемные силы, которые необходимо снять за счет осуществления пластической деформации последовательно во всех участках исследуемой зоны. В результате решения определяются пластические деформации ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , все поле временных и остаточных напряжений и деформаций.

В соответствии с вышеизложенным численным способом определения деформаций и напряжений при движении упругопластической зоны в пластине составлены алгоритмы и программа решения задачи о временных и остаточных деформациях и напряжениях при высокоскоростной проковке пластин.

Полученное в результате решения упруго пластической задачи распределение временных напряжений σ_x и пластических деформаций $\epsilon_{x,pl}$ свидетельствуют о том, что в очаге деформации наряду с пластическими деформациями удлинения протекают значительные деформации укорочения, которые существенно уменьшают величину сжимающих напряжений. Уменьшение величины деформации удлинения связано с тем, что возникшая при осадке металла деформация удлинения в плоскости листа не может полностью реализоваться в продольном направлении из-за сопротивления оказываемым окружающим деформированную зону материалом и выделения тепла в очаге деформации.

Результаты аналитического решения задачи удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

IV. Экспериментальное исследование устранения сварочных деформаций и напряжений методом высокоскоростного деформирования

Проведенные эксперименты по влиянию ударного деформирования на распределение остаточных напряжений в плоских образцах из основного материала указывают на целесообразность применения повышенных скоростей нагружения. Исходя из этого, все исследования по устранению сварочных деформаций и напряжений в сварных соединениях из алюминиевых и магниевых сплавов проводили на скоростях деформирования от 20 до 30 м/сек на толщинах: 1,5; 3; 8 мм - сплав МА2-Г, 1,5; 3 и 5 мм - сплавы ВД-3 и АМГМ, 1,5+2 мм - сплавы О19П и Д20-Г.

Результаты замеров и вычислений остаточных напряжений после высокоскоростной проковки позволили установить, что изменение удельной энергии деформирования не однозначно влияет на величину остаточных напряжений. С ростом удельной энергии сжимающие напряжения растут до некоторой предельной величины, а затем уменьшаются оставаясь в значительном диапазоне удельных энергий постоянными. Подбор оптимального режима высокоскоростной проковки как и в других механических способах устранения сварочных деформаций, заключался в отыскании условий, которые бы обеспечивали

наиболее полное снятие остаточных напряжений при полном устранении короблений. Исходя из этих условий, в работе для исследуемых сплавов определены диапазоны оптимальных удельных энергий деформирования (сплав МА2-І, ВМД-3 - $\frac{98}{\text{см}^3} = 25-55 \text{ кгм/см}^3$, сплав АМГМ - $\frac{98}{\text{см}^3} = 30-60 \text{ кгм/см}^3$, сплав ОІ9ІІ - $\frac{98}{\text{см}^3} = 40-60 \text{ кгм/см}^3$, сплав Д20-І - $\frac{98}{\text{см}^3} = 50-75 \text{ кгм/см}^3$. При этом на сплавах МА2-І, ВМД-3, АМГМ в диапазоне оптимальных энергий деформирования снижение максимальных растягивающих напряжений составляет 70-80%. Для снятия растягивающих напряжений в высокопрочных сплавах в работе предлагается использование проковки в два прохода. Применение второго прохода, например, на сплаве ОІ9ІІ с удельной энергией деформирования, равной энергии первого пропуска ($\frac{98}{\text{см}^3} = 25 \text{ кгм/см}^3$) вызывает дополнительное уменьшение напряжений растяжения в околошовной зоне на 25% при незначительном увеличении сжимающих напряжений в шве. С увеличением энергии деформирования при втором проходе эффект перераспределения напряжений проявляется еще в большей степени. Значительное снижение напряжений в околошовной зоне при проковке в два прохода является следствием действия теплового эффекта и увеличением сопротивления деформированию металла шва в продольном направлении, вызванного первым проходом. Это обстоятельство подтверждается результатами измерений твердости, выполненными в поперечном сечении сварного соединения из сплава ОІ9ІІ, проявляющееся в повышении твердости и увеличении области воздействия пластической деформации на околошовную зону после повторной проковки.

В работе показано, что применение термообработки (отжиг для магниевых сплавов, искусственное старение для высокопрочных сплавов) после высокоскоростной проковки значительно повышает ее эффективность как метода снятия сварочных напряжений, вследствие того, что в быстросформированном металле содержится большее число менее устойчивых искажений, которые при повышенной температуре способствуют интенсивному протеканию релаксационных процессов.

Для отработки режимов высокоскоростной проковки в работе предложен и разработан расчетный способ определения параметров ударных устройств по температурному импульсу. Несоответствие расчетных данных с результатами экспериментов не превышает 3-4%.

Для определения влияния высокоскоростной проковки, применяемой с целью устранения сварочных напряжений и деформаций, на работоспособность сварных соединений были проведены испытания на угол загиба, ударную вязкость, одноосное и двухосное растяжение. Установлено, что при высокоскоростной проковке на всех рассматри-

ваемых материалах снижение пластических свойств значительно меньше, чем при проковке малыми скоростями удара (< 10 м/сек). Применение термообработки после высокоскоростной проковки повышает их пластические показатели и приводит к повышению несущей способности сварных соединений. Проведенные дополнительные исследования по устранению сварочных деформаций и напряжений в листовых и оболочковых конструкциях из *Al* и *Mg* сплавов показали, что способ высокоскоростной проковки может быть осуществлен в заводских условиях непосредственно на сварочных стендах.

Общие выводы

1. Значительные сварочные деформации и перемещения, возникающие в тонколистовых и тонкостенных конструкциях из *Al* и *Mg* сплавов, вызываются образующимися при сварке остаточными напряжениями в сварных швах, которые обычно значительно ниже основного материала.

2. Применительно к сварным соединениям листовых и оболочковых конструкций показана рациональность применения устранения сварочных деформаций и напряжений высокоскоростным ударным деформированием металла шва путем применения пневматического молотка с механическим ускорителем специальной конструкции, позволяющим увеличить скорость ударов с 10 до 31 м/сек.

3. В качестве основного параметра режима ударного высокоскоростного деформирования сварных швов установлена удельная энергия деформирования, представляющая собой отношение энергии единичного удара к объему деформированного материала при перемещении ударного устройства на шаг вдоль оси шва.

4. Величина потребной удельной энергии деформирования для создания определенной степени деформации по толщине листа является функцией скорости и частоты ударов, толщины и марки металлов. С ростом скорости, частоты ударов при обеспечении одинаковой степени деформации требуется меньшая величина удельной энергии. С увеличением толщины и предела текучести материала постоянство относительных пластических деформаций обеспечивается большими значениями удельной энергии деформирования.

Снижение удельной энергии с увеличением скорости и частоты ударов происходит вследствие интенсивного локального выделения тепла, которое вызывает частичное разупрочнение материала в очаге деформации.

5. На основании экспериментальных данных разработаны рабочие монограммы для определения требуемых параметров режимов вы-

сокоскоростной проковки для обеспечения различных степеней деформации швов тонкостенных конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов.

6. Определение напряжений и деформаций при высокоскоростной проковке пластин, полученное в результате решения на ЭЦМ задачи о движении статически деформируемой упругопластической зоны с учетом температурного поля, создаваемого пластической деформацией, и переменных механических свойств, показало, что в очаге деформирования происходит снижение величины пластической деформации удлинения, а по окончании процесса – уменьшение сжимающих напряжений по сравнению с методами низкоскоростного деформирования, за счет расширения зоны пластической деформации, сопротивления, оказываемого окружающим деформированную зону материалом и выделения тепла в очаге деформации. Результаты теоретического решения задачи удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

7. Установлено, что с ростом удельной энергии деформирования сварочных швов сжимающие напряжения возрастают до некоторого предельного значения, а затем уменьшаются, оставаясь постоянными в широком диапазоне значений оптимальных удельных энергий (МА2-І, ВМД-3 – $25+55 \text{ кгм/см}^3$; АМГ6М – $30+60 \text{ кгм/см}^3$; ОІ9ІІ – $40-75 \text{ кгм/см}^3$; Д20-І – $50+75 \text{ кгм/см}^3$). Для высокопрочных алюминиевых сплавов эффективным технологическим приемом выравнивания остаточных напряжений в поперечном сечении сварных соединений является двухпроходная проковка шва.

8. Механические испытания сварных соединений на угол загиба, ударную вязкость, одноосное и двухосное растяжение после проковки с целью ликвидации деформации и уменьшения напряжений свидетельствуют о повышении прочности и несущей способности сварных соединений.

Применение термообработки для исследованных материалов после высокоскоростной проковки повышает пластические показатели сварных соединений и приводит к дополнительному повышению несущей способности листовых сварных элементов из термически неупрочняемых сплавов.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф., Высокоскоростное пульсирующее деформирование как метод снятия напряжений и устранения деформаций. В сб. "Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций", Машиностроение, 1969.
2. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф. Тепловые процессы при высокоскоростной проковке сварных швов. В сб. МВТУ "Технология изготовления заготовок в машиностроении. Изд-во Машиностроение.

3. Сагалевич В.М., Кондаков Г.Ф., Устранение сварочных деформаций и напряжений в конструкциях из магниевых и алюминиевых сплавов с применением способа высокоскоростной проковки. ИНФОРМТЯМАШ, 1970, № 10.