

М 86098
Министерство науки, высшей школы и технической политики
Российской Федерации

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

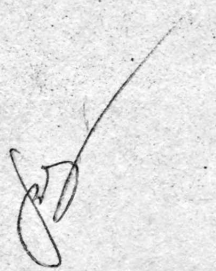
СЕМЬКИН Владимир Николаевич

РАЗВИТИЕ МАГНИТОУПРУГОГО МЕТОДА
И СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

05.03.06 - Технологии и машины
сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1992



Работа выполнена в Воронежском политехническом институте

Научный руководитель - к.т.н., доцент ШИИ В.В.

Официальные оппоненты: д.т.н., с.я. Антонов А.А.

к.т.н., Некрасова И.Г.

Ведущее предприятие - ВНИИМОНТАЖСПЕЦСТРОЙ

Защита состоится "2" июля 1992 г. на заседании специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат "2" июля 1992 г.

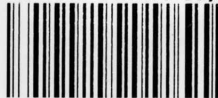
В.И. ГИРИ

г. Тираж 100 экз.

Э. Баумана

М 86098

НИО МГТУ им. Н.Э. Баумана



1086098

Семькин В.Н. Развитие маг

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сварные конструкции тяжелого машиностроения работают под большими нагрузками, поэтому они должны быть не только прочными, но и жесткими. Жесткость конструкций обеспечивают коробчатостью, ребрами, диафрагмами. Часто свариваемые металлы разнородны, а форма деталей сложна. После сварки и термообработки это вызывает высокий уровень остаточных напряжений (ОН), которые могут привести к разрушению сварных узлов на этапах изготовления или эксплуатации. Возникает необходимость определения ОН в ответственных конструкциях тяжелого машиностроения.

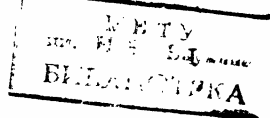
Расчетные методы для определения напряженного состояния (НС) элементов конструкций, имеющих сложную геометрическую форму, нередко оказываются неэффективными. Поэтому является актуальной проблема разработки новых и совершенствования существующих методов экспериментального исследования напряжений. В значительной степени это относится к малоизученной области выявления геометрических характеристик полей напряжений (изоостат, изобар и пр.) в реальных изделиях. Высокая стоимость сварных конструкций тяжелого машиностроения исключает использование разрушающих экспериментальных методов. Сравнение возможностей таких физических неразрушающих методов, как рентгеновский, ультразвуковой и магнитоупругий показывает, что последний выгодно отличается оперативностью, чувствительностью, простотой аппаратуры и методик.

Однако, широкое внедрение магнитоупругого метода (МУМ) сдерживалось отсутствием средств и способов выявления геометрических характеристик поля напряжений, низкой точностью измерений.

Настоящая работа посвящена совершенствованию МУМ и созданию эффективных технических средств применительно к анализу НС сварных конструкций тяжелого машиностроения.

Цель работы заключалась в повышении качества проектирования и изготовления сварных конструкций тяжелого машиностроения путем развития МУМ определения их НС, а также разработки рекомендаций по снижению уровня и перераспределению ОН.

Методы исследования. Расчетные методы включали интегрирование дифференциальных уравнений равновесия для плоского НС с использованием метода конечных разностей, математическое моделирование процесса формирования траекторий главных напряжений (изоостат) во взаимодействии с изотермами квазистационарного температурного поля, численные расчеты на ЭВМ.



Экспериментальные исследования проводились физическим МУМ, реализуемым с помощью монофазного измерителя механических напряжений, оснащенного разнотипными магнитоупругими датчиками. Контроль геометрических характеристик ИС непосредственно на изделиях производился устройствами для выявления поля изостат с применением способа построения траекторий по предварительно найденным касательным.

Научная новизна. I. Разработана физико-математическая модель формирования изостат при сварке на основе следующих установленных закономерностей:

- для случая движущегося температурного поля относительные изостаты наименьших главных напряжений совпадают с формирующими их изотермами, а ортогональные изостаты наибольших главных напряжений - с линиями теплового потока, при этом формирование изостаты наибольшего главного напряжения представляется как постепенное увеличение длины кривой, ортогональной к одной и той же движущейся изотерме;

- стабилизация изостат ОН связана с одной определенной температурой (с одной изотермой), соответствующей минимальной температуре нагрева металла, вызывающей достижение предела текучести на стадии остывания (вторичной пластической деформации).

2. Разработан графо-аналитический метод построения изостат применительно к МУМ, исключая этап построения изоклин: I) за счет построения касательных к изостатам в узлах координатной сетки в плоской напряженной области; 2) за счет последовательной коррекции наращиваемой изостаты с учетом наклона касательных к изостатам в окрестностях точек коррекции.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе созданных методик и аппаратуры установлены количественные характеристики ИС от сварки и термообработки крупногабаритных деталей тяжелых механических прессоов. С учетом установленных закономерностей разработаны и внедрены на ПО "Воронежтяжмехпресс" практические рекомендации по выбору рациональных конструктивно-технологических решений, направленных на повышение качества ответственных сварных конструкций. Полученные результаты показали возможность отмены термообработки отдельных узлов, что дало годовой экономический эффект в размере 23 тысяч рублей. Методика и магнитоупругие приборы внедрены на ПО "Воронежтяжмехпресс" и в учебный процесс в Воронежском политехническом институте.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на

научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э.Баумана, Всесоюзных научно-технических конференциях: "Современные проблемы технологии приборостроения" (Москва, 1986 г.); "100-летие изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства" (Пермь, 1988 г.); "Проблемы создания ресурсосберегающих технологий сварочного производства для предприятий Дальнего Востока и Сибири" (Комсомольск-на-Амуре, 1988 г.); "Прочность и диагностика сварных конструкций" (Тверь, 1991 г.). По теме диссертации опубликовано 4 статьи, получено 12 авторских свидетельств. Магнитоупругий измеритель отмечен дипломом второй степени Всесоюзной выставки технического творчества.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, раздела с основными результатами и выводами, списка литературы из 85 наименований, приложения и содержит 124 страницы машинописного текста, 53 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, содержатся краткие сведения о технологии изготовления крупногабаритных узлов в тяжелом машиностроении и их возможных разрушениях после сварки и термообработки.

В первой главе дан анализ работ, посвященных теории формирования ОН, методам экспериментальных исследований НС.

Современные представления о формировании напряжений при сварке основываются на трудах Г.А.Николаева, Н.А.Ожерблома, В.А.Винокурова, Н.Н.Прохорова, С.А.Куркина, В.И.Махненко, А.Г.Григорьянца, И.П.Трочуна, В.С.Игнатьевой, В.М.Сагалевича, А.Я.Недосеки, В.А.Кархина, К.М.Гатовского и др.

В них показано, что несмотря на значительные успехи ученых в этом направлении, сложная зависимость распределения и уровня напряжений от многих конструктивно-технологических и металлофизических факторов затрудняет обобщение и использование результатов. Экспериментальные исследования ОН крупногабаритных конструкций не получили должного развития, т.к. не было простых неразрушающих методов.

В работах М.Фрохта, А.Дюрелли и У.Райли, Н.И.Пригоровского рассматриваются изоклины, изостаты, особые точки поля в моделях, вызванные внешним нагружением. Б.С.Касаткин и др. получили изо-

статы в стыковом сварном соединении из поликарбоната. А.В.Михайлов указывает на взаимосвязь траекторий температурных напряжений с геометрией температурного поля. Однако для случая движущегося температурного поля в металлах, присущего сварке, сведений о формировании изостат не было. Отсутствовали также данные о методиках и устройствах для изучения этого процесса.

Проведен анализ существующих методов определения ОН на основе работ С.П.Тимошенко, Д.Гудьера, В.А.Винокурова, А.Г.Григорьянца, А.Дирелли, В.Паркса, К.Финка, Х.Рорбаха, А.Н.Гузя, Ф.Г.Махорта, О.И.Гуши, Г.Д.Деля, Ю.Я.Мехонцева, О.Н.Михайлова, И.М.Жданова, В.В.Батюка, Г.Т.Орехова, А.Г.Состина, С.Абуку, Т.Исоно, А.Иосинага, К.Касивая, Ю.И.Кошкина и др.

Анализ показал, что наиболее перспективным методом исследования напряжений в крупногабаритных конструкциях машиностроения является физический МУМ.

МУМ не находил широкого применения для исследования плоского НС, т.к. позволял измерить лишь разность главных напряжений и угол наклона наибольшего главного напряжения к выбранной оси. В практике не было способа разделения главных напряжений, одно из них приходилось не учитывать. Исследования затруднялись несовершенством приборов, реализующих МУМ. Это приводило к низкой точности измерений и дискредитации метода.

Объектом исследований в настоящей работе являются сварные узлы тяжелых механических прессов: столы, траверсы, стойки. Это крупногабаритные коробчатые конструкции, сваренные из проката низкоуглеродистой стали ВСтЗсп2 и отливок из стали 25Л полуавтоматической сваркой в CO_2 или автоматической под флюсом. Масса конструкций – от единиц до десятков тонн. Толщины элементов (листов, ребер, лап и т.д.) – в пределах от 16 до 100 мм. Значительные толщины и жесткие соединения деталей, сложное взаимное расположение, большие поперечные сечения сварных швов вызывают высокие ОН, о чем свидетельствуют трещины, образующиеся иногда в частично и полностью сваренных конструкциях.

Сведений об уровне ОН и местах их концентраций в указанных изделиях не имелось. Нет данных о влиянии технологии сварки и термообработки узлов прессов на ОН. Ввиду конструктивно-технологической сложности изделий невозможно смоделировать на образцах влияние многочисленных факторов на НС. Исследования приходится проводить на реальных конструкциях, зачастую без остановки производственного цикла.

В связи с этим для достижения цели, поставленной в данной

работе, необходимо решить следующие основные задачи.

1. Исследовать и расширить область применения МУМ определения механических напряжений путем создания приборов, обеспечивающих повышение точности и оперативности определения количественных характеристик, а также разработки методики и средств для установления геометрических характеристик двухосного НС в крупногабаритных машиностроительных конструкциях.

2. Выявить закономерности формирования полей ОН в металлах, вызываемых сваркой, и провести анализ НС сварных узлов прессов с учетом их конструктивных и технологических особенностей.

3. Разработать и внедрить рекомендации по оптимизации проектирования и совершенствованию технологии сварки машиностроительных конструкций с учетом их НС.

Вторая глава посвящена разработке аппаратуры и методики для определения МУМ количественных характеристик НС.

Основным элементом приборов, используемых в МУМ, является датчик (преобразователь). Существующие конструкции не дают возможности заметно повысить точность и оперативность измерений из-за нерегулируемости размера базы измерений, ненадежности контакта в магнитной цепи "датчик-изделие" и т.д. Не было датчиков для измерений на нагретой поверхности, в зазорах изделий. Электронные схемы блоков преобразования измерителей не устраняли те составляющие сигналов датчиков, которые не связаны с НС, что увеличивало погрешность.

Были разработаны новые модели приборов, реализующих МУМ.

Четырехполюсный магнитоупругий датчик (а.с. № 1465726) имеет регулируемый в пределах от 2 до 20 мм размер базы измерений за счет кулисы и четырех ползунов, перемещаемых в радиальных пазах. Двухполюсный датчик (а.с. № 1589082) устраняет воздушный зазор в магнитной цепи "датчик-изделие" с помощью магнитного аластомера или магнитной пасты.

Сокращение времени измерений на порядок дает датчик (а.с. № 1597613) с магнитопроводом в виде ролика, прокатываемого по детали. Магнитоупругий датчик (а.с. № 1647297) имеет четыре размера базы измерений 1,5; 5; 10; 24 мм.

Датчик магнитоупругого устройства (а.с. № 1569602) позволяет производить измерения в зазорах изделий шириной $\geq 3,5$ мм.

Магнитоупругий датчик для определения напряжений в нагретых деталях содержит магнитопроводы в виде водоохлаждаемых трубок и рассчитан на работу при температуре ≤ 400 °С.

Монофазный магнитоупругий измеритель механических напряжений ИМН-3 создан для эксплуатации в комплекте с разнотипными датчиками. Он содержит генератор, формирователь прямоугольных импульсов, усилитель, амплитудный детектор, фильтр, измерительную головку, источник питания. Сигнал с датчика может совпадать по фазе с сигналом генератора или быть ему противофазным. Схемное решение ИМН-3 выделяет только синфазный сигнал, устраняя погрешность измерений, обусловленную асимметрией магнитной системы датчика. Измеритель имеет габариты 190х140х110 мм, массу 1 кг. Для работы с ним собран двухдекадный блок цифровой индикации.

Определение количественных характеристик НС основано в настоящей работе на известном из фотоупругого метода разделении главных напряжений способом разности касательных напряжений. Он предполагает интегрирование дифференциальных уравнений равновесия для плоского НС.

Главный недостаток способа – необходимость свободного контура (края) исследуемой детали, на котором устанавливают граничные условия. Однако на краю детали искажается магнитное поле датчика, что приводит к погрешности определения граничных условий.

Отмеченные проблемы решены следующим образом.

Для сведения к минимуму влияния краевого эффекта по а.с. № 1583763 вначале определяют ширину зоны с краевым эффектом на нагруженном образце, а затем измерения производят на исследуемом изделии, начиная с точек, удаленных от свободного контура на расстояние, равное ширине указанной зоны.

Для определения ОН МУМ в деталях, не имеющих после сварки свободного контура (а.с. № 1446495), предварительно производят измерения напряжений и строят изостаты (см. ниже) до сварки деталей. После сварки повторно строят изостаты, определяют места концентраций и границы зоны сварочных ОН. Вне зоны выбирают базовую точку, по данным предварительных измерений вычисляют в ней значения ОН, начальные условия, определяют напряжения в конструкции.

Когда предварительные измерения в деталях без свободного контура невозможны, определение напряжений производят от искусственного свободного контура (а.с. № 1543255) на привариваемом к детали образце в форме клинообразной призмы.

Усовершенствовали аппарат исследований ОН. В результате исходная информация с магнитоупругого измерителя вводится в ЭВМ. В машине показания магнитоупругого измерителя переводятся в пас-

кали, определяются значения и знаки касательных τ_{xy} , нормальных σ_x , σ_y и главных σ_1 и σ_2 напряжений, печатаются результаты в виде таблицы.

Проверку методики и аппаратуры проводили двумя приемами.

1. Сопоставляли данные определения напряжений магнитоупругим и тензOMETрическими способами в сварных соединениях стальных пластин и дисков. Максимальное расхождение результатов измерений для двухосного НС составило 7–15% от предела текучести.

2. Проверяли сходимость эпюр ОН, определенных от разных свободных контуров листа стола прессы КТ2540. Длина контрольной линии 2080 мм. Измерения выполняли "навстречу" в зоне оси симметрии. Получили незначительные (< 20 МПа) расхождения значений напряжений в точках "встречи" (рис.1).

Третья глава посвящена исследованию изостат.

Значительный резерв повышения эффективности результатов исследований напряжений содержится в изучении и учете полей изостат, т.е. изостаты (кривые, касательные к которым совпадают с направлениями одного из главных напряжений, действующих в точках касания) качественно характеризуют плоское НС.

Традиционно использовались два способа получения траекторий: поляризационно-оптический и крупящих покрытий. Основные недостатки первого – невозможность исследования металлов, сложность аппаратуры, двухступенчатость графических построений (изоклины, затем изостаты). Метод крупящих покрытий непригоден для неразрушающего контроля ОН, неоперативен.

В настоящей работе в основу создания устройств для выявления изостат на поверхностях промышленных изделий положено определение касательных к изостатам с помощью магнитоупругих датчиков. Было разработано два устройства. Первое (а.с.№ I49237I) в виде собранных в матрицу модулей. В модули установлены втулки с возможностью их вращения. Вдоль образующей цилиндрического отверстия втулки выполнен паз, соответствующий выступу на магнитоупругом датчике. Матрицу устанавливают на изделие. Датчики поочередно вставляют во втулки и, поворачивая их, получают поле касательных к изостатам.

Второе устройство (а.с.№ I656350) – цепь из шарнирно-сочлененных магнитоупругих датчиков. Определяя направление изостаты под каждым датчиком, прослеживают всю изоклину.

Разработана методика построения изостат по полученным касательным к изостатам в узлах координатной сетки. Она основана на

последовательной коррекции наращиваемой кривой с учетом углов наклона касательных в окрестности точки коррекции.

С помощью разработанных устройств и методики выявлены изостаты ОН в партии образцов сварных соединений и в реальных сварных конструкциях прессов.

Предварительный анализ картин траекторий, а также научных положений работы А.В.Михайлова позволили выдвинуть две гипотезы о кинетике их формирования.

1. Для случая прямолинейного равномерного движения линейного источника тепла постоянной мощности в пластине однотипные изостаты наименьших главных напряжений совпадают с соответствующими изотермами, а ортогональные им изостаты наибольших главных напряжений - с линиями теплового потока (рис.2).

2. Стабилизация траекторий ОН связана с одной определенной температурой (с одной изотермой).

Для экспериментальной проверки первой гипотезы на пластинах из стали Ст.3 изучали последовательность формирования траекторий главных сварочных ОН. Поля траекторий выявляли с помощью измерителя ИМН-3 (база датчиков 5 и 2 мм). Траектории вычерчивали непосредственно на исследуемой поверхности (рис.3). Вначале на пластинах получили изостаты, вызванные прокатом (рис.3,а), затем траектории от наплавки и остывания одного и более валиков. Наплавку выполняли РДС электродами АНО-4 ϕ 4 мм на режиме:
 $I_{\text{напл.}} = 170-180 \text{ А}, \quad U_{\text{д}} = 32-34 \text{ В}, \quad V_{\text{напл.}} \approx 1,5 \text{ мм/с}.$

Исследования показали, что поле изостат ОН может иметь неустойчивый (рис.3,б,в) и устойчивый (рис.3,г) участки.

Устойчивые участки формируются по обе стороны от шва и характеризуются последовательным расположением идентичных изостат, т.е. наблюдается параллельное перемещение однотипной траектории. Формируются замкнутые изотропные точки с огибающими их ветвями траекторий. Смещение изотропных точек навстречу направлению сварки вызвано более интенсивным отводом тепла в сторону холодной части пластины, в результате чего максимальная температура в процессе охлаждения шва установится на линии изотропных точек. Сравнение схемы поля, выполненной согласно гипотезе, с реальной картиной поля в пластине показывает их соответствие.

Предполагаемую по второй гипотезе температуру $T_{\text{с.и.}}$, вызывающую стабилизацию изостат ОН определяли двумя способами. По первому - серию пластин (Ст.3) нагревали в термической печи до температуры 600 °С. Доставали первую пластину и половину ее

немедленно охлаждали в воде (20°C). Затем, ступенчато снижая температуру в печи, также охлаждали следующие пластины. До нагрева и после охлаждения каждой пластины МУМ выявляли в них картины изостат и отделяли те пластины, в которых изостаты ориентированы вдоль линии погружения пластины в воду. Искомая температура лежит в интервале от минимальной температуры нагрева пластины с изменившейся конфигурацией изостат до максимальной температуры нагрева пластины, для которой охлаждение не повлияло на изостаты. Получили интервал $350^{\circ}\text{C} \geq T_{\text{с.и.}} > 300^{\circ}\text{C}$. По второму способу магнитоупругим датчиком прослеживали направление изостаты в ходе охлаждения сварного образца на воздухе. Температуру в месте контроля измеряли с помощью термопары и фиксировали в момент застывания изостаты. Для Ст.3 определили, что значение температуры, приводящей к стабилизации изостат, лежит в интервале $360^{\circ}\text{C} > T_{\text{с.и.}} > 340^{\circ}\text{C}$. По результатам двух экспериментов искомая температура $\approx 345^{\circ}\text{C}$.

Установленная температура соответствует минимальной температуре нагрева, вызывающей достижение предела текучести на стадии остывания свариваемого металла (вторичной пластической деформации).

В целом результаты экспериментов подтвердили положения принятых гипотез о формировании изостат ОН при сварке.

На основе этих положений получили приближенное аналитическое выражение изостат через параметры изотерм квазистационарных температурных полей. Параметры задавали реальными значениями погонных энергий источников нагрева. Отдельные участки изотермы аппроксимировали эллипсом, гиперболой или параболой. Определены уравнения и разработана программа построения изостат на ЭВМ.

Проверка показала, что геометрические параметры однотипных экспериментальных изостат стабилизировавшегося поля близки к аналогичным параметрам изостат расчетных. Следовательно, путем варьирования мощности источника, погонной энергии и скорости сварки можно регулировать траектории ОН.

Четвертая глава содержит описание исследований НС сварных конструкций механических прессов магнитоупругим методом с использованием измерителя ИМН-3.

Был проведен анализ НС стола прессы КА9540. По изостатам выявили зоны концентрации ОН, затем определили их уровень, достигающий 330 МПа. Данный уровень ОН вызывает необходимость термообработки.

Изучали влияние термообработки на ОН в столе пресса КА3540. На первом этапе выявили поля изостат от сварки, на втором избирательно провели количественные измерения в 120 точках. После высокого отпуска измерения повторили. Затраты времени на выявление изостат и два цикла измерений составили 5 часов. Подтверждена эффективность термообработки, обеспечившей снижение максимальных растягивающих напряжений со 160–200 МПа до 10–20 МПа.

Контролировали воспроизводимость сварочных ОН в изделиях одной серии, изготавливаемых одно за другим с небольшим интервалом времени. Исследовали участок длиной 800 мм на боковой стенке в трех столах пресса КБ8042. Затраты времени составили: на измерения в одном столе 1,5–2 часа, на обработку результатов 1 г. полчаса. ОН в первом и втором столах оказались распределенными одинаково, а в третьем есть отличия, вызванные вариациями последовательности сварки и перерывами в выполнении многослойных швов. МММ можно получить за смену данные о НС в 150–200 точках. Этого достаточно для контроля стабильности технологического процесса в условиях пеха.

Зависимость ОН от вида сварного соединения определяли измерениями в заднем листе ползуна пресса КА3540. С внутренней стороны лист имеет угловые и тавровые соединения с ребрами жесткости. Полученный для внешней стороны листа уровень ОН от таврового сварного соединения на 5–50 МПа выше, чем от углового. Другие эксперименты показали, что ОН от соединений с двухсторонней разделкой кромок на 25–30% ниже, чем от соединений с односторонней, колебания ширины швов в пределах до 12% не влияют на уровень ОН.

Создан способ сварки (а.с. № 1349937), ослабляющий воздействие концентраторов ОН в ответственных конструкциях. Для этого перед выполнением последних слоев многослойных швов строят изостаты, по изостатам выявляют зоны концентрации ОН; заполняют разделки последними слоями, располагая начала и концы швов равноудаленно от зон концентрации. Этим снижается вероятность разрушений сварных узлов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

I. Показана ограниченность методов исследования двухосных напряжений, не учитывающих характера поля изостат, в связи с тем, что измерения производятся без анализа общей картины плоской области, и следовательно, неизбирательно, с низкой оперативностью.

2. Разработана методика выявления геометрических характеристик плоского НДС промышленных изделий, заключающаяся в определении магнитоупругим датчиком с угломером касательных к изостатам в узлах координатной сетки, нанесенной на деталь, с последующим построением изостат путем последовательной коррекции нарастающей кривой с учетом углов наклона касательных в окрестности точек коррекции.

3. Установлены закономерности формирования траекторий главных ОН от воздействия квазистационарного температурного поля, характерного для сварки плавлением, заключающиеся в том, что траектории наименьших главных напряжений повторяют форму изотермы, а траектории наибольшего главного напряжения являются кривыми, ортогональными движущейся изотерме во всех ее положениях, т.е. совпадают с линиями теплового потока, причем стабилизация траекторий ОН связана с одной определенной температурой (с одной изотермой).

Экспериментально определено значение этой температуры, равное для Ст.3 примерно 345°C , что соответствует минимальной температуре нагрева металла, приводящей к появлению пластической деформации на стадии остывания сварного соединения (вторичной пластической деформации).

4. Разработана математическая модель, описывающая формирование изостат в условиях движущегося температурного поля через параметры изотерм, задаваемые реальными значениями погонных энергий источников тепла при сварке. Изотермы аппроксимируются эллипсом, параболой, гиперболой. На этой основе создана программа построения изостат на ЭВМ.

5. Установлены критические размеры зоны искажения магнитоупругого эффекта вблизи свободного контура изделия. Показано, что для снижения погрешности измерений последнюю следует исключать из контролируемого участка.

6. Разработаны два магнитоупругих способа определения двухосных напряжений в деталях, не имеющих свободного контура. Первый способ основан на использовании базовых точек и результатов предварительных (до сварки) измерений, второй на создании искусственного свободного контура на образце, привариваемом на время на контролируемую деталь.

7. Созданы два типа устройств для выявления картин изостат в изделиях и образцах из ферромагнитных материалов. Одно из них

представляет матрицу модулей-ячеек под магнитоупругий датчик, в другом датчики шарнирно соединены в цепь.

Разработаны монофазный магнитоупругий измеритель ИМН-3, блок цифровой индикации и разнотипные магнитоупругие датчики, что обеспечило погрешность измерений одноосных напряжений в пределах 5-10%, двухосных 7-15% от предела текучести (на базовой длине зачетной линии 1000 мм), при оперативности измерений, на несколько порядков превышающей оперативность тензометрического метода.

8. Разработан способ сварки, снижающий воздействие концентрации ОН в ответственных конструкциях с многослойными швами за счет перераспределения напряжений на этапе выполнения последнего слоя. Способ включает построение поля изостат.

9. Отработана методика оперативного магнитоупругого контроля ОН в крупногабаритных сварных узлах в ходе производственного цикла, содержащая два этапа: вначале выявление изостат, а по ним мест концентрации напряжений, затем количественные измерения в наиболее нагруженных участках.

10. Переданы на ПО "Воронежтяжмехпресс" конструкторско-технологические рекомендации по снижению ОН в сварных узлах механических прессов на основе анализа количественных данных о НС. Предложено перейти, по возможности, от тавровых сварных соединений к угловым, от соединений с односторонней разделкой кромок к соединениям с двухсторонней. В отдельных конструкциях уровень ОН невысок, что позволяет снять операцию термообработки. При выполнении настоящей работы создано 12 изобретений, защищенных а.с. № 1349937, 1446495, 1465726, 1492371, 1494029, 1543255, 1569602, 1583763, 1589082, 1597613, 1647297, 1656350. Годовой экономический эффект от внедрения разработок составил 23725 рублей.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Кучер А.Т., Семькин В.Н., Кошкин Ю.И. Измеритель остаточных напряжений с малой базой датчика // Современные проблемы технологии приборостроения: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Москва, 1986. - С.32.

2. А.с. 1349937 СССР, МКИ³ В23 К31/08. Способ сварки станины механического пресса / А.Т.Кучер, В.Н.Семькин, Ю.И.Кошкин и др. (СССР). - № 4074373/31-27. Опубл. 07.II.87. Бюл. № 41 // Открытия. Изобретения. - 1987. - № 41. - С.53.

3. А.с. 1446495 СССР, МКИ³ G01 L1/12, G01 B7/24. Способ определения остаточных напряжений в сварных конструкциях

А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков и др. (СССР). - №4272952/25- 28. Оpubл. 23.12.88. Бюл. №47 // Открытия. Изобретения. 1988. - № 47. - С.195.

4. А.с.1465726 СССР, МКИ^В G01 L1/12. Магнитоупругий датчик / А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков и др. (СССР). - №4249876/24. - Ю. Оpubл. 15.03.89. Бюл. №10 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №10. - С.178.

5. А.с.1492371 СССР, МКИ^В G09 B23/06. Устройство для определения поля траекторий главных напряжений / А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков (СССР). - №4333866/13 - 12. Оpubл. 07.07.89. Бюл. № 25 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №25. - С.170.

6. А.с.1543255 СССР, МКИ^В G01 L1/12. Способ определения механических напряжений / А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков и др. (СССР). - №4426696/24 - Ю. Оpubл. 15.02.90. Бюл. № 6 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №6. - С.179.

7. Кучер А.Т., Семыкин В.Н., Шмулевич С.Д. Кинетика формирования траекторий главных напряжений при сварке // 100-летие изобретения сварки по методу Н.Г.Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Пермь, 1988. - С.52.

8. Кучер А.Т., Семыкин В.Н., Шмычков В.Ф. Новые приборы для исследования напряжений в сварных конструкциях магнитоупругим методом // Проблемы создания ресурсосберегающих технологий сварочного производства для предприятий Дальнего Востока и Сибири: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Комсомольск-на-Амуре, 1988. - С.127.

9. А.с.1583763 СССР, МКИ^В G01 L1/12. Способ определения механических напряжений / А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков и др. (СССР). - №4426696/24 - Ю. Оpubл. 07.08.90. Бюл. №29 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №29. - С.171.

10. А.с.1589082 СССР, МКИ^В G01 L1/12. Магнитоупругий датчик / А.Т.Кучер, В.Н.Семыкин, В.Ф.Шмычков (СССР). - №4465757/24 - Ю. Оpubл. 30.08.90. Бюл. №32 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №32. - С.176.

11. Шип В.В., Семыкин В.Н., Кучер А.Т. Совершенствование магнитоупругого контроля напряжений // Прочность и диагностика сварных конструкций: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Тверь, 1991. - С.98.

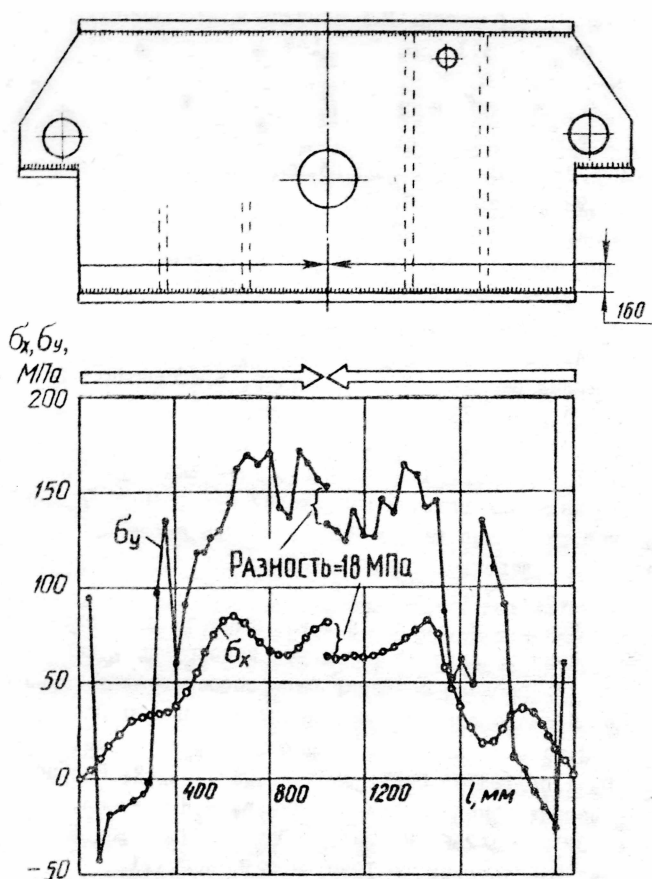


Рис.1. Схема измерений "навстречу" от двух разных свободных контуров бокового листа (Ст.3) стола прессы КТ2540 и полученные эпюры продольных σ_x и поперечных σ_y остаточных напряжений.

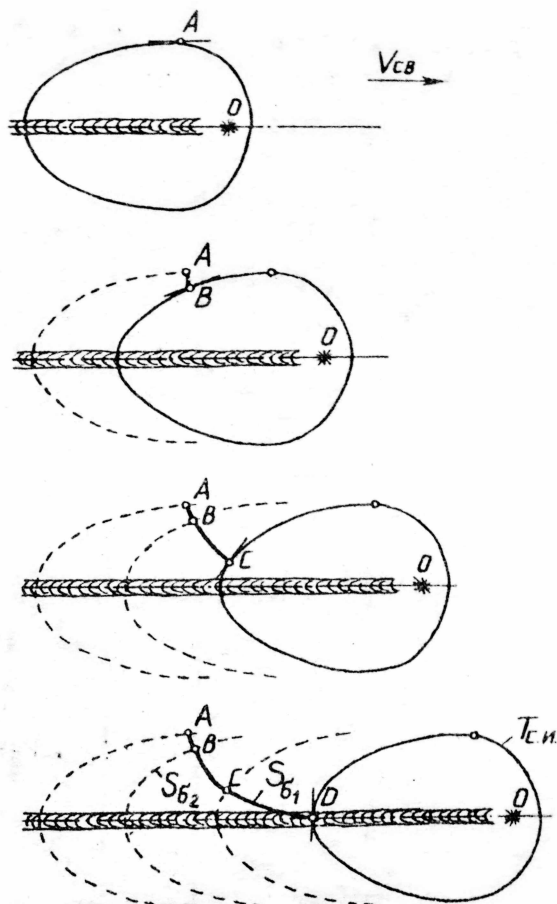


Рис. 2. Схема формирования изостат остаточных сварочных напряжений.

$T_{c.и.}$ — изотерма температуры, связанной со стабилизацией изостат;

$S_{б1}$ — изостата наибольшего главного напряжения;

$S_{б2}$ — изостата наименьшего главного напряжения.

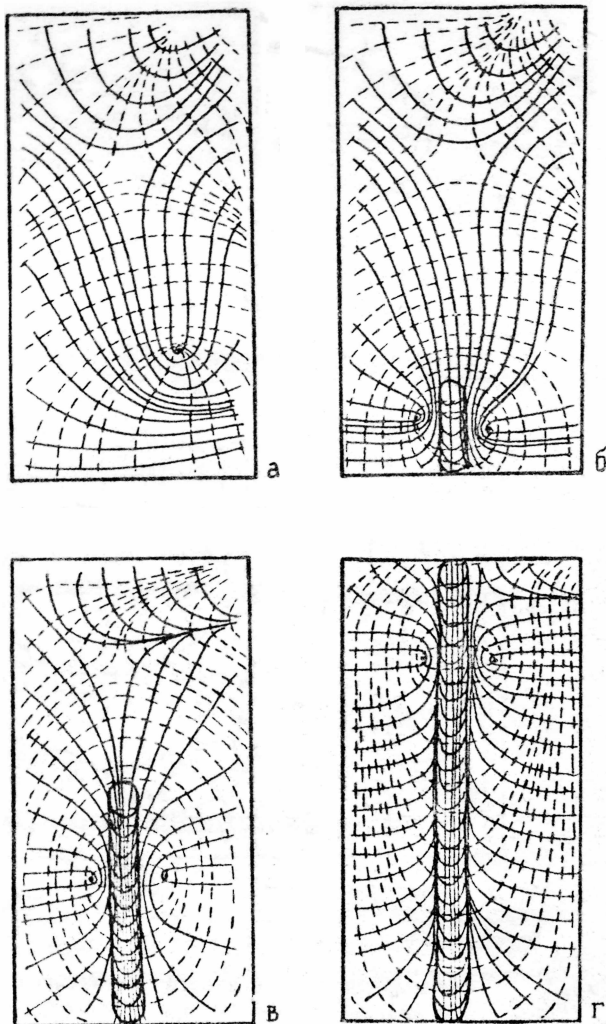


Рис. 3. Кинетика формирования траекторий главных напряжений в пластине из Ст.3 размерами 200x100x5 мм при наплавке электродами АНО-4 ϕ 4 мм на режиме:
 $J_{\text{напл.}} = 170-180 \text{ А}; \quad U_{\text{д}} = 32-34 \text{ В};$
 $V_{\text{напл.}} \approx 1,6 \text{ мм/с.}$