

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

На правах рукописи

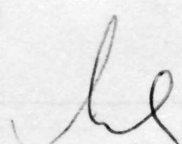
МАКСИМОВ Николай Николаевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ МЕДИ ЭЛЕКТРОДАМИ
С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ВСТАВКАМИ**

05.03.06 — Технология и машины сварочного производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КФ 1077

МОСКВА — 1995

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор **САГАЛЕВИЧ В. М.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор **ЧАКАЛЕВ А. А.**

кандидат технических наук,
доцент **ПРОТОПОПОВ Е. И.**

Ведущее предприятие — Калужский завод автомобильного электрооборудования

Защита состоится «29» июня 1995 года
на заседании диссертационного совета К.053.15.03 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на а
сим выслать по ук

про-

С диссертацией
имени Н. Э. Баума

ГТУ

Автореферат ра

ода.

Ученый
диссертаци
К.053.15.
К. Т. Н.,

1547472

Актуальность работы. Экономика страны требует освоения новых видов изделий, отличающихся более совершенными потребительскими свойствами. Одной из важнейших задач при этом является снижение их себестоимости посредством внедрения прогрессивных ресурсосберегающих технологий. Замена процесса пайки на один из способов сварки в изделиях электротехнической и электронной промышленности может дать значительный экономический эффект за счет исключения затрат на дорогостоящие припои, флюсы, а также санитарно-гигиенические и экологические мероприятия, улучшить эксплуатационные характеристики. Однако большое количество деталей, подлежащих соединению, изготавливается из высокотепло-электропроводных материалов (ВТЭПМ), свойства которых в сочетании с требованиями, предъявляемыми к самим соединениям, затрудняют выбор эффективного процесса сварки. Наиболее распространенным из ВТЭПМ является медь. В плоских торцевых асинхронных двигателях, обладающих высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками, обмотка статора изготавливается методом штамповки из тонколистовой меди с последующим соединением контактных площадок. Одной из основных проблем при замене пайки на процесс контактной точечной сварки электродами с вольфрамовыми вставками является низкое качество, обусловленное тем, что формирование соединений происходит в твердой фазе в узком диапазоне режимов. Отсутствие систематизированных данных не позволяет решить задачу получения неразъемных соединений без проведения фундаментальных исследований.

Отыскание путей совершенствования технологического процесса контактной точечной сварки деталей из ВТЭПМ на основе раз-работки и анализа моделируемой электротепловой задачи, исследований влияния магнитного поля машины и ряда других факторов, для достижения высокого качества сварных соединений, является важной и актуальной задачей.

Целью работы является разработка технологии контактной точечной сварки медных деталей толщиной $(0,25 + 0,5) \times 10^{-3}$ м, обеспечивающей повышение качества соединений на основе формирования сварной точки, сочетающей литую зону в области кромок с со-



единением в твердой фазе по остальной площади контакта деталь-деталь.

Методы исследования. Для решения задач, поставленных в работе, было проведено физическое моделирование электрических полей. Тепловые поля рассчитывались с помощью численных методов и математической модели процесса. При исследованиях влияния магнитного поля применяли графоаналитический метод, а также метод суперпозиций и зеркального отображения. При прочностных испытаниях для анализа результатов использовали статистическую обработку данных. Оценка сравнительной надежности соединений проводилась с помощью ускоренных форсированных испытаний с вероятностной оценкой результатов.

Основными методами экспериментальных исследований явились: осциллографирование электрических параметров процесса сварки, металлографический анализ, прочностные испытания проводились при статическом нагружении и в условиях, моделирующих эксплуатационные режимы.

Научная новизна работы заключается во вскрытии кинетики формирования соединений, сочетающих литую зону в области кромок и зону в твердой фазе, деталей толщиной $(0,25 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ м из высокотеплоэлектропроводных материалов (ВТЭПМ) при контактной точечной сварке электродами с вольфрамовыми вставками.

С помощью электротепловых расчетов установлено, что:

- при рассматриваемых условиях ведения процесса, вольфрамовые вставки при сварке ВТЭПМ играют не только роль тепловых экранов, но и сами являются источниками дополнительного тепла, поступающего от них в зону соединения;
- смещение сварной точки к кромкам деталей создает асимметрию теплового поля в зоне сварки и при соответствующем диаметре вставок позволяет достичь расплавления материала деталей на периферии соединения в области кромок;
- снижение градиента температур в зоне сварки, посредством применения вставок увеличенной длины, замедляет скорость перемещения изотермы плавления и повышает устойчивость процесса формирования оптимального соотношения между объемом жидкой фазы и твердого нерасплавившегося материала деталей, сопротивляющегося деформации.

Предложенная методика расчета составляющей магнитного поля, наведенной всеми токоведущими элементами контура, позволила вычислить электродинамические силы, оказывающие смещающее воздействие на жидкую фазу соединения как на подвижный проводник с током в магнитном поле и установить, что для увеличения размеров литой зоны без дополнительного тепловложения при сохранении достаточного объема твердого, не расплавившегося металла под электродами, детали при сварке необходимо ориентировать так, чтобы их свариваемые кромки совпадали с внешней образующей контура.

Практическая ценность. Вскрытый механизм формирования сварной точки с новыми свойствами позволил разработать технологию контактной точечной сварки электродами с вольфрамовыми вставками качественных соединений медных полуобмоток асинхронных двигателей.

Формирование сварной точки, сочетающей соединение в твердой фазе с литой зоной на кромках деталей, обеспечивает повышение прочности на 45 + 55% по сравнению со сваренными в твердой фазе и на 750 + 800% по сравнению с паяными припоем ПОС-61 при статических испытаниях на растяжение отбортованного образца. Некоторые преимущества паяных соединений при испытаниях на срез полностью компенсируются более высокой работоспособностью соединений с литой зоной в условиях форсированных эксплуатационных нагрузок. Наличие или отсутствие оплавления кромок позволяет осуществлять визуальный экспресс-контроль. Сварка деталей осуществляется с применением оптимальных геометрических соотношений вольфрамовых вставок и использованием влияния магнитного поля вторичного контура на универсальных серийных контактных машинах переменного тока с незначительной модернизацией.

Реализация работы. Разработанная технология внедрена на АО "Восход". Партия торпедных асинхронных двигателей прошла опытно-промышленные испытания. Экономический эффект от внедрения в 1994 году составил 82,5 млн. рублей.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на международно-научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники" (г. Ростов-на-Дону, 1993 г.);

научно-технической конференции стран СНГ "Производство и надежность сварных конструкций" (г. Москва, Калининград 1993 г.); на всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем" (г. Калуга 1989 г.); региональной "Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машино- и приборостроении" (г. Калуга 1989 г.); на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Она изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает 125 наименований.

На защиту выносятся. Новые представления о механизме формирования сварного соединения при контактной точечной сварке по кромкам деталей из ВГАМ электродами с вольфрамовыми вставками, полученные на основе физико-математического моделирования электротепловых полей в зоне соединения и заключающиеся в том, что вольфрамовые вставки являются не только тепловыми экранами, но и источниками дополнительного тепла, поступающего от них в зону соединения.

При этом кинетика формирования соединения в значительной мере отличается от кинетики классического способа контактной сварки, т.к. плавление материала деталей начинается на периферии контактов электрод (вставка) - деталь в области кромок и распространяется как вдоль этих контактов, так и в направлении к контакту деталь-деталь. Отсутствие механических факторов, способствующих удержанию жидкой фазы в зоне соединения, таких, как уплотняющий пояс деформированного металла, определяет высокую чувствительность процесса к деформации и требует учета влияния электродинамических сил, воздействующих на жидкую фазу, являющуюся подвижным проводником с током в магнитном поле.

В связи с этим, следующим положением, выносимым на защиту, является исследование влияния магнитного поля на формирование соединения с жидкой фазой на кромках и определение условий повышения устойчивости процесса.

Сварная точка, сочетающая соединение в твердой фазе с литой зоной на кромках, требует проверки на работоспособность в

условиях эксплуатации. Однако такие испытания отличаются значительными затратами времени и средств. Поэтому следующим положением, выносимым на защиту, является разработка метода ускоренных испытаний соединений с имитацией форсированных эксплуатационных режимов и вероятностной оценкой результатов.

Основное содержание работы.

Во введении дано обоснование актуальности работы. Кратко сформулированы основные проблемы и результаты практического применения.

Глава I содержит анализ известных работ отечественных и зарубежных авторов по проблемам сварки деталей из ВТЭПМ, в основном, из меди, а также существующих методик исследования процесса контактной сварки. Обосновывается необходимость решения сформулированных выше задач и реализации поставленных целей.

Конструкция и требования, предъявляемые к соединению контактных площадок обмоток, наряду с высокими технико-экономическими показателями процесса контактной точечной сварки, обусловило его выбор в качестве способа соединения взамен пайки. Однако внедрению контактной сварки препятствует низкое качество соединений, обусловленное высокими теплофизическими свойствами материала деталей, препятствующими выделению достаточного количества тепла в зоне сварки. Для снижения теплоотвода применяют различные технологические приемы, в частности, тепловые экраны из нержавеющей сталей, графита, тугоплавких - вольфрамовых, молибденовых или киритовых вставок.

В данной работе, для снижения теплоотвода, кроме использования вольфрамовых вставок, предложено сварную точку располагать на совмещенных кромках изделий. Эксперименты показали, что отток тепла в этой области снижается настолько, что наблюдаются случаи оплавления кромок. Прочность таких соединений при испытаниях на срез и отрыв на 45 + 55% выше, чем сваренных в твердой фазе. Однако добиться устойчивой воспроизводимости процесса оплавления, применяя известные положения, не удается.

Данные анализа распределения теплофизических свойств материала деталей и вольфрамовых вставок, в совокупности с характером наблюдаемых подплавлений поверхности деталей в контакте электрод (вставка) - деталь, послужили базой для выдвижения гипотезы о том, что тугоплавкие вставки при контактной точечной

сварке деталей из ВТЭИМ являются источниками дополнительного тепла, поступающего от них в зону соединения, и процесс приближается к схеме сварки нагретым инструментом.

Для проверки гипотезы и выявления основных закономерностей в механизме формирования соединения, необходимо провести расчет электротепловой обстановки в зоне сварки. Анализ известных методов показал, что для нашего случая целесообразно использовать металлические модели с применением неявной схемы для расчета тепловых полей. Установлено, что особенности соединения требуют изучения влияния магнитного поля сварочного контура на кинетику его формирования.

Глава 2 посвящена исследованиям электрических и тепловых полей при контактной точечной сварке по кромкам медных деталей электродами с вольфрамовыми вставками. Для исследования электрических полей в зоне соединения была изготовлена металлическая модель, представляющая собой плоское осевое сечение зоны сварки с деталями, выполненными из медной фольги, вставками из молибдена и медных электродов. Толщина всех элементов $\sigma = 1 \cdot 10^{-4}$ М, масштаб - 60:1, отдельные элементы между собой соединены конденсаторной шовной сваркой.

В связи со спецификой распределения сопротивлений в зоне сварки измерение потенциалов электрического поля в узловых точках модели производили последовательно между узлами каждой ячейки. Напряженность электрического поля вычислялась с помощью численного дифференцирования по формулам:

$$E_x(y) = \frac{\Delta \varphi_{x,y} + \Delta \varphi_{x-1,y}}{2h},$$

где h - сторона ячейки сетки;

$\Delta \varphi_{x,y}$ - потенциал в узловой точке сетки с координатами X, Y .

Для пограничных точек применяли известные формулы. Вычисление плотностей тока в узловых точках модели производилось на ЭЦВМ. Анализ результатов показал, что распределение плотностей тока по наиболее характерным сечениям не противоречит представлениям, сложившимся на базе исследований классического способа контактной сварки сталей в медных электродах и полученные данные не позволяют выявить особенности формирования соединений при контактной точечной сварке медных деталей по кромкам электродами с вольфрамовыми вставками.

Расчет температурных полей, проведенный на базе математической модели процесса, с учетом специфики начальных и граничных условий, позволил выявить механизм формирования соединения и подтвердил справедливость гипотезы о роли вставок, как источников дополнительного тепла, поступающего от них в зону соединения. Установлено, что область наибольшего разогрева с изотермой порядка 2200°C зарождается в вольфрамовых вставках и расположена на расстоянии одной трети их длины от контактов электрод (вставка) – деталь (рис. 1). При этом в самих деталях, на периферии контактов электрод (вставка) – деталь в области адиабатических кромок, наблюдается появление изотермы с температурой порядка 1100°C и начинается плавление металла. В дальнейшем изотерма 1100°C распространяется от периферии к центру, как вдоль этих контактов, так и в массу деталей к контакту деталь – деталь, полностью захватывая кромки. В результате на периферии сварной точки в области кромок образуется жидкая фаза материала деталей, в то время, как на остальной площади контакта деталь – деталь наблюдаются изотермы с температурой от 920 до 1100°C и соединения формируются в твердой фазе.

Описанные особенности распределения тепловых полей и развития изотермы плавления в материале деталей определяют достаточно жесткие требования к геометрическим соотношениям между диаметром d_w , длиной l_w вставок – с одной стороны и толщиной деталей δ – с другой. Расчеты показали, что при увеличении отношения d_w/δ в диапазоне от 6 до 10 протяженность изотермы плавления в деталях в области контактов электрод (вставка) – деталь $T_{w.д}$ возрастает от 40 до 85 %, а в контакте деталь – деталь $T_{д.д}$ в 4,5 + 5 раз.

В процессе сварки и деформирования под действием сварочного усилия, жидкий металл деталей выдавливается из под электродов (вставок) на периферию контактов, уменьшая рабочее сечение сварной точки. Сопротивление деформированию при этом оказывает лишь объем нерасплавившегося материала деталей в условном цилиндре под электродами. Для формирования оптимальных соотношений между объемами жидкой фазы и твердого нерасплавившегося материала деталей в условном цилиндре, необходимо вовремя прервать развитие процесса плавления деталей. При этом желательно

снизить протяженность жидкой фазы $T_{w.д.}$ в контакте электрод (вставка) – деталь относительно ее протяженности $T_{д.д.}$ в контакте деталь–деталь (рис. 1).

Установлено, что достичь желаемого результата можно понижением градиент температур в зоне соединения до значения $(80 \pm 45) \times 10^4$ К/М, используя для этих целей увеличенное отношение ρ_w/δ_w до $1,5 \pm 2$.

Таким образом исследование электротепловых полей в зоне соединения при контактной точечной сварке по кромкам медных деталей электродами с вольфрамовыми вставками, полностью подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о роли вставок как дополнительного источника тепла, вскрыли механизм и основные закономерности процесса формирования сварной точки, сочетающей литую зону на кромках с соединением в твердой фазе по остальной площади контакта деталь–деталь.

Глава 3 посвящена изучению влияния магнитного поля на кинетику формирования соединения с литой зоной в области совмещенных кромок деталей.

Особенности соединения с литой зоной на кромках, существенно отличающие его от классической сварной точки, ставят ряд проблем в вопросах удержания жидкой фазы под электродами при сварке. Отсутствие уплотняющего пояска деформированного металла может привести к выплеску жидкой фазы и потери ожидаемых преимуществ. В этих условиях роль магнитного поля, воздействующего на жидкую фазу как на подвижный проводник с током, приобретает очень важное значение.

Низкая сопротивляемость деформациям, обусловленная наличием жидкого металла непосредственно под электродами (вставками) и вышеизложенные особенности соединения, потребуют, очевидно, применения малых сварочных усилий. Последние при этом могут стать соизмеримы с электродинамическими силами отталкивания, действующими на подвижные элементы контура при протекании сварочного тока, что может привести к периодическому размыканию контактов и нарушению процесса сварки. Для того, чтобы оценить влияние магнитного поля на кинетику формирования соединения и, в частности, роль электродинамических сил в решении задачи по удержанию жидкой фазы под электродами, необходимо провести некоторые теорети-

ческие исследования, основываясь на известных положениях технической электродинамики.

Анализ результатов показал, что для определения величины силовых полей электродинамических сил, наведенных в зоне соединения, необходимо знать величину индукции составляющих магнитного поля. Для определения величины результирующего вектора магнитной индукции, наведенного всеми токоведущими элементами вторичного контура, был применен графоаналитический метод. С учетом специфики принятых допущений искомая величина выражена формулой:

$$B_{т.в.э.} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{h^2 + L^2}{hL\sqrt{h^2 + L^2}},$$

где $B_{т.в.э.}$ - результирующий вектор магнитной индукции, Тл;

I - величина сварочного тока, А;

h - геометрический параметр, характеризующий раствор контура и равный его половине ($h = H/2$), м;

L - вылет контура, м;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

Расчеты электродинамических сил проводились для наиболее характерных областей соединения. Они показали, что в зоне сварки наиболее заметно проявляется воздействие двух составляющих полей электродинамических сил. Первая F_K - радиально-сжимающая. Она изменяется от максимального значения на периферии сварной точки ($3,2 \times 10^{-5}$ Н) до нуля в центре и вызвана взаимодействием сварочного тока, проходящего через зону соединения, с наведенным там же магнитным полем, характеризующимся концентрическими линиями индукции B_K . Вторая $F_{т.в.э.}$ направлена из внутренних областей контура на внешнюю образующую и неизменна по величине ($6,9 \times 10^{-7}$ Н) и направлению. Она вызвана взаимодействием тока с составляющей магнитного поля $B_{т.в.э.}$, наведенной всеми токоведущими элементами в зоне соединения.

Представленные результаты показывают, что на периферии сварной точки радиально-сжимающие силы на два порядка превосходят силы, стремящиеся сместить жидкую фазу за пределы зоны соединения, и не следует опасаться срыва жидкой фазы электродинамическими силами.

Дальнейший анализ, проведенный с учетом несимметричности соединения, показал, что для повышения размеров литой зоны без

соответствующего увеличения тепловложения при сохранении достаточного объема твердого металла под электродами, детали при сварке нужно ориентировать так, чтобы их свариваемые кромки совпадали с внешней образующей контура или электродов (вставок).

Глава 4 содержит описание экспериментальных исследований, проведенных с целью проверки выдвинутых теоретических положений и определения оптимальных режимов сварки.

Эксперименты показали, что нижний предел диапазона допускаемых значений усилия сварки зависит от величины тока и, для исключения периодического размыкания контактов, должен превышать электродинамические силы отталкивания в $1,8 + 2$ раза.

Величина сварочного тока находится в прямой зависимости от диаметра вольфрамовых вставок, а допускаемый диапазон изменения плотности тока лежит в узких пределах $140 + 170 \text{ А/мм}^2$. Процесс очень чувствителен к изменению тепловложения и на практике его регулирование осуществляется установкой необходимой величины тока и варьированием длительности сварочного импульса.

Подтверждено, что: - качественные соединения могут быть сформированы при использовании определенных соотношений геометрических размеров вольфрамовых вставок с толщиной детали. Оптимальными являются отношения диаметра вставок к толщине детали от 6 до 8 при отношении длины вставок к их диаметру от 1,5 до 2; - ориентация свариваемых кромок деталей по внешней образующей электродов (вставок) способствует повышению устойчивости процесса формирования литой зоны, снижению требований к точности установки деталей (допускаемое смещение возрастает от $\pm 1/4 \sigma$ до $\pm 2/3 \sigma$), увеличению прочности соединений и стабильности показателей (рис. 2). Установлена тесная корреляционная связь между размерами литой зоны и прочностью соединений.

Результаты металлографических исследований подтверждают наличие в одной сварной точке сочетания соединения в твердой фазе с литой зоной в области кромок. Причем с увеличением отношения диаметра вставки к толщине детали от 6 до 10 размеры литой зоны в контакте деталь-деталь возрастают в $1,8 + 2$ раза.

Глава 5 посвящена сравнительной оценке надежности соединений, приводятся данные о модернизации механизма нагружения универсальных контактных машин и практического применения результатов работы.

Обычные методы контроля с их критериями оценки качества не всегда способны дать полную картину в вопросе выявления преимуществ одной технологии по сравнению с другой, т.к. не позволяют судить о вероятности отказа элементов. Так, прочность соединений с литой зоной на кромках при статическом растяжении отбортованного образца на $45 \pm 55\%$ выше, чем сваренных в твердой фазе и в 7 + 8 раз – по сравнению с паяными припоем ПОС-61. Однако при испытаниях на срез паяные соединения оказываются на $15 \pm 25\%$ прочнее.

При пусковых и рабочих режимах соединения контактных площадок обмоток электродвигателей испытывают различные механические и тепловые нагрузки. Поэтому наиболее полное представление об их работоспособности могут дать эксплуатационные испытания. Но вследствие их продолжительности и высоких финансовых затрат применяют ускоренные испытания на форсированных режимах.

Для проведения таких испытаний была разработана методика сравнительной оценки работоспособности соединений и создана лабораторная установка, в которой на базе использования физических явлений, возникающих при размещении проводника с переменным током в поле постоянного магнита и применения растягивающего усилия, имитировались форсированные эксплуатационные нагрузки.

Результаты показали, что при испытаниях с растяжением отбортованного образца вероятность более высокой работоспособности сварных точек по сравнению со сваренными в твердой фазе равна 0,74, а по сравнению с паяными равна 1. При срезающей нагрузке вероятность более высокой надежности соединения с литой зоной равна 0,94 и 0,63 соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Сварка контактных площадок медных полуобмоток асинхронных двигателей толщиной $(0,25 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ М сопряжена с рядом проблем, решить которые позволяет применение способа контактной точечной сварки с регулированием теплостока посредством использования вольфрамовых вставок и смещения сварной точки на кромки деталей.

2. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в работе, показали, что при контактной точечной сварке

деталей из высокотеплоэлектропроводных материалов электродами с вольфрамовыми вставками, последние играют роль не только тепловых экранов, но и сами являются источниками дополнительного тепла для зоны соединения.

С помощью физического и математического моделирования вскрыт механизм образования соединения, при котором тепловой поток направлен от контактов электрод (вставка) - деталь к контакту деталь - деталь, причем определяющими являются процессы тепловыделения в вольфрамовых вставках.

Смещение сварной точки к кромкам деталей создает асимметрию теплового поля, что позволяет сформировать соединение в твердой фазе с литой зоной в области кромок. При достаточных плотностях тока зарождение и развитие жидкой фазы (1100°C) начинается в медных деталях на периферии контактов электрод (вставка) - деталь со стороны кромок. По мере ее развития она захватывает контакт деталь-деталь, образуя литую зону в области кромок. В остальной части контакта деталь - деталь наблюдаются изотермы 1100°C - 920°C и соединение формируется в твердой фазе.

При таком распределении тепловых полей и направлении потоков, предъявляются жесткие требования к геометрическим соотношениям между размерами вольфрамовых вставок и толщиной деталей. Увеличение отношения диаметра вольфрамовых вставок d_w к толщине деталей δ от 6 до 10, при прочих равных условиях, приводит к росту протяженности литой зоны относительно соединения в твердой фазе в контакте деталь - деталь в пределах от 40 до 85%.

Увеличение отношения длины или вылета вставок l_w к их диаметру d_w способствует снижению градиента температур во вставках и зоне соединения, что повышает устойчивость процесса образования рационального соотношения объемов жидкой фазы и твердого нерасплавившегося материала деталей, сопротивляющегося деформации, в условном цилиндре.

Оптимальными являются отношения диаметра вставок d_w к толщине деталей δ от 6 до 8 и длины вставок l_w к диаметру d_w от 1,5 до 2.

3. Установлено, что на кинетику формирования соединения оказывает влияние магнитное поле вторичного контура контактной

машины.

В условиях слабой сопротивляемости деформации, определяющей необходимость применения малых сварочных усилий, нижняя граница допускаемого диапазона усилий, во избежание периодического размыкания контактов, должна быть выше величины электродинамических сил отталкивания, действующих на электроды и консоли контактной машины.

Выявлено, что на формирование литой зоны оказывают влияние две составляющие магнитного поля, одна из которых вызывает появление электродинамических сил, сжимающих жидкую фазу в радиальном направлении от периферии к центру сварной точки, а другая - появление сил, стремящихся сместить ее за внешнюю образующую контура.

Расчеты показали, что сжимающие электродинамические силы на периферии сварной точки на два порядка превосходят силы смещения и, наряду с силами поверхностного натяжения, способствуют удержанию жидкой фазы в зоне соединения.

Несимметричность сварной точки предъявляет определенные требования к ориентации деталей во вторичном контуре при сварке.

Установлено, что детали необходимо ориентировать так в контуре, чтобы их свариваемые кромки совмещались с внешней образующей вольфрамовых вставок (или контура).

Такая ориентация обеспечивает устойчивое формирование литой зоны даже в тех случаях, когда из-за неточности установки, кромки деталей имеют смещение относительно образующих на величину $\pm (2/3 + 2) \sigma$ (в зависимости от отношения d_w/σ). В случае ориентации по внутренней образующей требования к точности установки возрастают и диапазон допускаемых смещений сужается до $\pm 1/4 \sigma$.

4. Статические испытания на прочность растяжением отбортованного образца показали тесную корреляционную взаимосвязь между размерами литой зоны и прочностью соединений с коэффициентом $K = 0,82$, что с достаточной степенью достоверности позволяет производить визуальный экспресс-контроль.

5. Сравнительная оценка работоспособности соединений, из-

готовленных по трем различным технологиям, проведенная методом ускоренных испытаний на форсированных режимах, имитирующих эксплуатационные, показала, что вероятность более высокой работоспособности сварных точек, сочетающих соединение в твердой фазе с литой зоной на кромках, по сравнению с паяными, равна, как минимум 0,63, а со сваренными в твердой фазе - 0,74.

6. Проведенные исследования позволили разработать технологию сварки соединений контактных площадок, расположенных по наружному и внутреннему контуру медных штампованных полуобмоток асинхронных двигателей, обладающих более высокой работоспособностью, чем паяные и сваренные в твердой фазе на серийных контактных машинах переменного тока без их существенной модернизации.

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии составил 82,5 млн. рублей на 10000 обмоток.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Максимов Н.Н., Селиванов М.И. Способ сварки изделий с изолирующим покрытием // Технология, организация и механизация сварочного производства. Реферативный сборник ЦНИИЭТЯМАШ.-1979.-№10.-С. 6-8.

2. Максимов Н.Н., Володин А.В., Трунков А.С. Математическое моделирование контактной точечной сварки высокотеплопроводных металлов // Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем: Тезисы докл. Всесоюзной науч.тех.конф.-Калуга, 1989. - С.60-61.

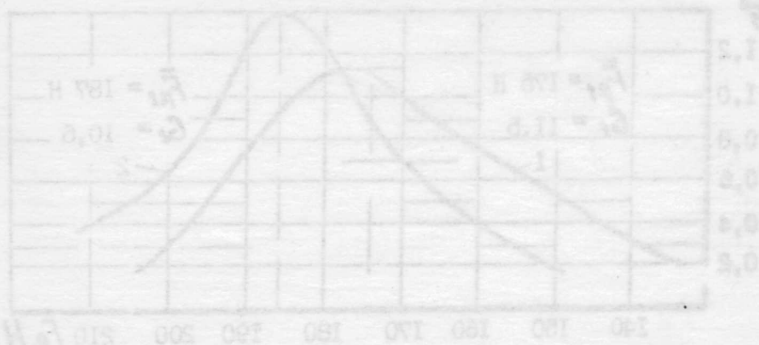
3. Максимов Н.Н., Каменарович Ч.В. Расчет составляющей магнитного поля в зоне соединения при контактной сварке //Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машино- и приборостроении: Тезисы докл. региональной науч.тех.конф. - Калуга, 1990.- С.28-29.

4. Максимов Н.Н., Витушкин В.С., Моргун А.А. Некоторые особенности контактной точечной сварки меди и ее сплавов //Материалы международной научно-технической конференции.-Ростов-на-Дону, 1993. - С. 131-132.

5. Максимов Н.Н., Витушкин В.С., Володин А.В. Особенности точечной сварки высокотеплоэлектропроводных материалов по кромке // Материалы научно-технической конференции стран СНГ.- Калининград.-М., 1993.- С.40-41.

6. Оценка надежности соединений, выполненных пайкой и контактной точечной сваркой / Н.Н.Максимов, В.С.Витушкин, А.А.Моргун, А.В.Царьков // Автоматизация исследования и испытаний сложных технических систем и технологических процессов: Тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции.-Калуга, 1994.-С.35.

7. Метод ускоренных испытаний надежности паяных и сварных соединений / Н.Н.Максимов, В.С.Витушкин, А.А.Моргун и др. // Автоматизация исследования и испытаний сложных технических систем и технологических процессов: Тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции.-Калуга, 1994.-С.36.



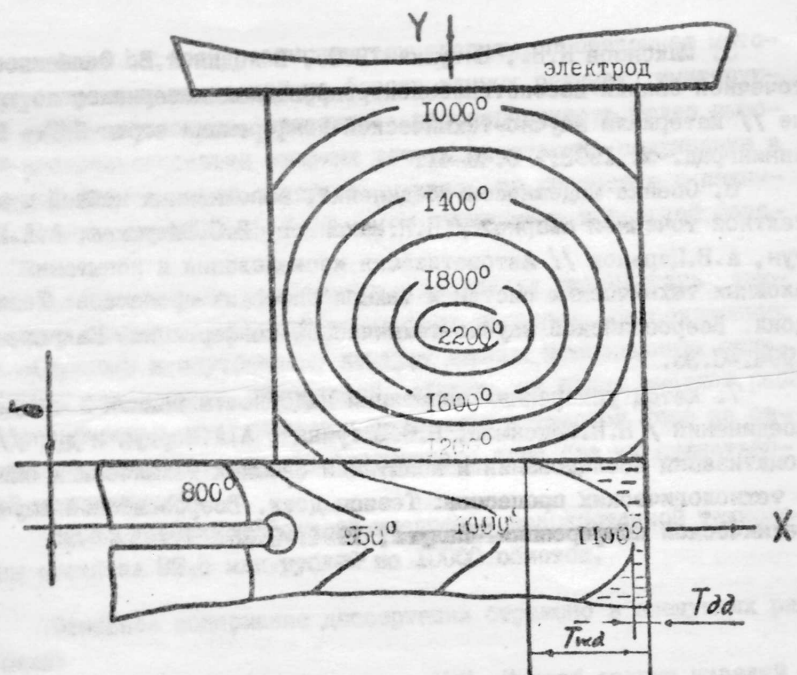


Рис. 1. Распределение температурного поля в деталях и вольфрамовых вставках на момент времени $= 3,2 \cdot 10^{-1} \text{ с}$.

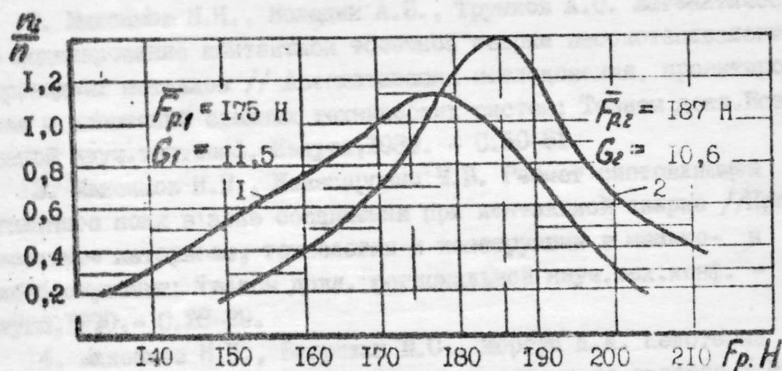


Рис. 2. Распределение значений разрушающего усилия соединений, сваренных при ориентации кромок по внутренней образующей контура - кривая 1 и по внешней - кривая 2.