

Министерство образования и науки Грузии
Государственный университет Акакия Церетели

На правах рукописи

ОСПАНОВА САЛТАНАТ МУХИТОВНА

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СО СТЕРЖНЕВЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ

04.08 – инженерия и технология механики

Диссертация на соискание академической
степени доктора инженерии

Научный руководитель – доктор технических наук,
эмеритус М.Ш.Шаламберидзе

Кутаиси - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СВАРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	9
1.1 Основные виды железобетонных конструкций.....	9
1.1.1 Достоинства и недостатки железобетона.....	9
1.1.2 Монолитный железобетон.....	14
1.1.3 Положительные характеристики материалов.....	15
1.1.4 Отрицательные характеристики материалов.....	15
1.1.5 Сравнительный анализ.....	16
1.1.6 Виды арматуры.....	17
1.2 Разработка критерия оценки качества электроконтактной сварки арматуры железобетонной конструкции.....	20
1.3 Особенности разработки энергосберегающей технологии изготовления металлической сетки.....	24
Выводы по I разделу.....	30
2 НАГРЕВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИХСЯ КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ.....	31
2.1 Опытное исследование процесса нагрева при контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней.....	31
2.2 Теоретическое исследование процесса нагрева стержней.....	36
2.3 Анализ процесса нагрева стержней.....	41
Выводы по II разделу.....	51
3 ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА.....	52
3.1 Предпосылки к расчету тока при контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней.....	52

3.1.1	Опыты по холодному обмятию круглых стержней.....	55
3.1.2	Связь между осадкой и площадью проекции контактной поверхности при сварке.....	61
3.2	Осадка стержней при сварке.....	63
3.3	Тепловая эффективность процесса электроконтактной сварки перекрещивающихся стержней арматуры железобетона.....	68
	Выводы по III разделу.....	74
4	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИХСЯ КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ	75
4.1	Распределение потенциала и поперечного тока в круглом стержне.....	78
4.2	Определение наименьшего тока, необходимого для сварки перекрещивающихся круглых стержней.....	88
4.3	Определение плотности тока в центре стержня и усилия сжатия между электродами.....	91
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПО РАБОТЕ.....	99
	ЛИТЕРАТУРА.....	101
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	106

ВВЕДЕНИЕ

В промышленном и гражданском строительстве, а также в строительстве дорог и тоннелей широко используются железобетонные конструкции, особенно ненапряженные конструкции железобетона. Эти конструкции в основном изготавливают в заводских условиях.

В железобетонных конструкциях применяются стержни из низкоуглеродистой стали разного профиля в виде круглых стержней (арматур). В ненапряженных конструкциях применяются круглые стержни малого диаметра до 10 мм. Для железобетонных конструкций, из них электроконтактной сваркой изготавливают металлические сетки. Металлические сетки изготавливают из стержней как одинакового диаметра, так и из стержней разного диаметра.

70% генерированной электроэнергии расходуется на изготовление изделий разной электротехнологии, в том числе при изготовлении электроконтактным методом металлические сетки для железобетонных конструкций.

При электроконтактной сварке металлической конструкции для железобетона не применяются методы контроля качества. Проверяют только соответствия технических свойств свариваемых стержней методом их испытания на растяжение. При разработке технологии электроконтактной сварки стержней на заводах, стараются добиться равнопрочных соединений соответствующего основного металла, что достигается путем существенного увеличения сварочного тока значительным перегревом расплавленного металла в зоне сварки. При этом, наши исследования при оценке качества показывают, что образцы, сваренные по заводской технологии разрушились не по сваренной точке, а по основному металлу. Исходя из этого, после достижения в зоне сварки температуры плавления основного металла, увеличение сварочного тока по заводской технологии нецелесообразно.

Разработка энергосберегающей технологии электроконтактной сварки перекрещивающихся стержней, подразумевающей определение параметров режима сварки, в том числе сварочного тока, обеспечивающего достижение в зоне сварки температуры плавления свариваемого материала, является актуальной.

При электроконтактной сварке металлоконструкций, прочность места сварки зависит от величины сварочного тока. Одновременно величина сварочного тока и прочность сварного соединения существенно зависят от усилия сжатия между электродами и длительности сварки. Целью настоящей работы является разработка энергосберегающей технологии электроконтактной сварки металлоконструкций, что подразумевает определение наименьшего значения сварочного тока, необходимого для обеспечения максимальной прочности при сварке, а также других параметров режима сварки. Для достижения цели потребуется решение ряда задач, основными из которых являются:

1. Анализ характера распределения тока при сварке перекрещивающихся круглых стержней;
2. Исследование распределения тока и потенциала при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней;
3. Анализ процесса нагрева при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней;
4. Исследование процесса осадки при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней;
5. Определение наименьшего сварочного тока, необходимого для сварки перекрещивающихся круглых стержней;
6. Определение в центре контакта плотности тока и усилия сжатия электродов при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней.

Для решения поставленных задач использовался комплексный метод исследований, включающий:

- В начальной стадии сварки экспериментальное определение площади холодного контакта, а также характер изменений температуры при нагреве стержней в процессе сварки методом осциллографирования;
- Расчетный метод определения характера распределения сварочного тока и потенциала электрического поля;

- Расчетный метод определения плотности сварочного тока в центре сварочного контакта.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных литературных источников из 94 наименований и 1 приложения.

В первом разделе диссертации представлен обзор железобетонных конструкций, применяемых в гражданском и промышленном строительстве, а также обзор металлических конструкций, применяемых в железобетоне. Металлические конструкции изготовлены в основном из перекрещивающихся стержней (арматуры) электроконтактной сваркой. Металлические конструкции изготавливают на заводах и поставляют на железобетонные заводы в виде сетки.

В этом разделе диссертационной работы рассмотрены также разные схемы испытаний перекрещивающихся сварных соединений и разработаны критерии оценки качества сварки. В строительных ненапряженных железобетонных конструкциях, на сварное соединение действуют как отрывающие, так и срезающие усилия вследствие физико-механических воздействий бетона. С этим критерием качества контактной сварки арматуры могут быть связаны и результаты механических испытаний на отрыв и на срез.

Из них наиболее целесообразная схема испытаний выбрана исходя из ее чувствительности к изменению основных факторов процесса сварки. В качестве такого фактора при сварке арматурных стержней накрест был избран сварочный ток, существенно влияющий на прочность сварного соединения. Следовательно, чувствительность схемы испытания к изменению этого параметра избрана в качестве критерия выбора показателя качества. Критерием оценки чувствительности схем испытания был принят коэффициент корреляции между прочностью сварного соединения и сварочным током.

В результате корреляционного анализа данных проведенных экспериментов установлено, что при сварке перекрещивающихся круглых стержней, критерием качества являются результаты испытания сварных соединений на срез. Кроме того в этом разделе приводятся особенности разработки энергосберегающей технологии электроконтактной сварки арматуры строительных железобетонных конструкций.

Дисперсионный анализ прочности и характер разрушения сварных образцов показывает, что с увеличением тока свыше 2,4 кА, сварные образцы разрушаются по основному металлу. Дисперсия прочности сварных образцов соответствует дисперсии прочности свариваемого материала. Кроме этого, внешний осмотр сварных соединений

показывает, что наблюдается увеличение выдавленного расплавленного металла из зоны сварки. Все это указывает на то, что: перегрев металла в зоне сварки от температуры плавления свариваемого материала приводит к ухудшению механических свойств материала и увеличению объема перегретого металла из зоны сварки, т.е. электроконтактную сварку перекрещивающихся стержней осуществляли при сварочном токе, обеспечивающем в зоне контакта достижение температуры плавления свариваемого материала, что позволит сэкономить электроэнергию без нанесения ущерба прочности сварного соединения. Определению такого тока и других параметров режима сварки посвящены все исследования и расчеты, приведенные в следующих разделах диссертации.

Во втором разделе приведены опытные исследования процесса нагрева при контактной электросварке перекрещивающихся круглых стержней и теоретическое исследование процесса нагрева стержней, а также анализ процесса нагрева стержней.

В третьем разделе рассмотрен процесс обмятия стержней по холодному контактированию и в процессе сварки при разных комбинациях диаметров стержней. Проведение таких исследований необходимо для определения плотности тока и усилия сжатия при сварке арматуры на различных режимах.

Четвертый раздел посвящен определению необходимого наименьшего значения тока и других параметров режима электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней. Для этого рассмотрено распределение потенциала и поперечного тока в круглом стержне.

В заключении приводятся общие выводы и научные результаты работы.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

- На основе проведенных расчетных, экспериментальных и теоретических исследований, впервые разработан метод определения параметров режима энергосберегающей технологии сварки перекрещивающихся круглых стержней, что заключается в разработке методов определения наименьшего тока, необходимого для электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней и усилия сжатия с учетом наименьшего тока, необходимого для сварки;

- Экспериментально установлено, что с целью экономии электроэнергии целесообразно сварку осуществлять на жестком режиме ($t_{св} < 4$ сек), с целью повышения

эффективности процесса нагрева и экономии электроэнергии за счет снижения объема расплавленного металла, выдавленного из зоны сварки.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты экспериментального исследования деформации и нагрева сварочного контакта, и рекомендации, разработанные на их основе: электроконтактную сварку перекрещивающихся круглых стержней целесообразно осуществлять на жестком режиме (длительность не должна превышать 4 сек);
2. Метод расчета плотности тока в сварочном контакте при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней и результаты этого расчета: максимальная плотность достигается в центре контакта, и ее величина не зависит от площади контакта между электродом и свариваемой деталью. Плотность сварочного тока зависит от длины контакта между электродом и свариваемой деталью.
3. Метод расчета наименьшего сварочного тока, необходимого для электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней;
4. Метод определения усилия сжатия между электродами с учетом наименьшего сварочного тока, необходимого для сварки.

1. СВАРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1.1 Основные виды железобетонных конструкций

1.1.1 Достоинства и недостатки железобетона

Железобетонные конструкции являются базой современной строительной индустрии. Их применяют: в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве – для зданий различного назначения; в транспортном строительстве – для метрополитенов, мостов, туннелей; в энергетическом строительстве – для гидроэлектростанций, атомных реакторов и т.д. Такое широкое распространение в строительстве железобетон получил вследствие многих его положительных свойств: долговечности, огнестойкости, стойкости против атмосферных воздействий, высокой сопротивляемости статическим и динамическим нагрузкам, малых эксплуатационных расходов на содержание зданий и сооружений и др. Железобетон представляет собой строительный материал, в котором соединены в монолитное целое затвердевший бетон и

стальная арматура. В железобетоне сжимающие нагрузки воспринимает бетон, а растягивающие усилия — стальная арматура [1-6].

В зависимости от методов возведения и назначения железобетон бывает трех видов: монолитный, сборный и сборно-монолитный. В работе рассматривается два вида железобетона: сборный и монолитный, оцениваются положительные и отрицательные качества этих материалов и представлен их сравнительный анализ.

К основным достоинствам железобетона, обеспечивающим ему широкое применение в строительстве, относятся [7-11]:

- огнестойкость;
- долговечность;
- высокая механическая прочность при сжатии;
- хорошая сопротивляемость сейсмическим и другим динамическим воздействиям;
- возможность возводить конструкции любой формы;
- малые эксплуатационные расходы на содержание зданий и сооружений (по сравнению с металлическими и деревянными конструкциями);
- хорошая сопротивляемость атмосферным воздействиям;
- высокая гигиеничность, способность задерживать радиоактивные излучения;
- почти повсеместное наличие крупных и мелких заполнителей, в больших количествах идущих на приготовление бетона.

Все эти факторы делают железобетон доступным к применению практически на всей территории страны. Затраты электроэнергии на производство железобетонных конструкций значительно ниже по сравнению со стальными и каменными.

Недостатки железобетона [12-15]:

- большая плотность (большой собственный вес);
- высокая звуко- и теплопроводность;
- трудоёмкость переделок и усилений;
- необходимость выдержки конструкции в опалубке до приобретения бетоном требуемой прочности;
- появление трещин вследствие усадки и силовых воздействий.

Многие из этих недостатков могут быть полностью или частично устранены путём применения бетонов на пористых заполнителях, специальной обработки (пропаривания, вакуумирования и т. п.), предварительного напряжения.

При общей оценке железобетона как строительного материала следует иметь в виду, что отмеченные выше недостатки малозначимы по сравнению с его достоинствами. Это привело к тому, что за исторически короткий промежуток времени (примерно 150 лет) железобетон занял доминирующее положение в строительстве.

Для современного капитального строительства железобетон является строительным материалом №1. В зависимости от способов возведения различают железобетонные конструкции [16-20]:

- сборные, изготавливаемые преимущественно на заводах стройиндустрии и затем монтируемые на строительных площадках;

- монолитные, полностью возводимые на месте строительства;

- сборно–монолитные, в которых рационально сочетается использование сборных железобетонных элементов заводского изготовления и монолитных частей конструкций.

Железобетонные конструкции различают по виду арматуры:

- с гибкой арматурой (без предварительного напряжения и с предварительным напряжением);

- с жесткой (несущей) арматурой.

Железобетон применяют в самых разнообразных отраслях строительства, находя в каждой из них свои подходящие области применения. Железобетон применяют:

- при возведении жилых домов, общественных зданий различного назначения, сельскохозяйственных построек;

- при строительстве зданий и сооружений промышленного, гражданского и транспортного назначения [21];

- в гидротехническом строительстве (плотины, дамбы, гидроэлектростанции) и энергетическом строительстве (для возведения главных корпусов тепловых и атомных электростанций, атомных реакторов);

- при возведении различных инженерных сооружений (дымовые трубы, телевизионные и водонапорные башни, резервуары и. т. д.);

- в транспортном строительстве (для возведения мостов, водопропускных труб, путепроводов, метрополитенов, тоннелей на железных и автомобильных дорогах, подпорных стенок, для покрытия дорог и аэродромов, железобетонные шпалы, железобетонные опоры контактной сети);

- в горной промышленности для надшахтных сооружений и крепления подземных выработок;

- нередко в судостроении (например, из железобетона изготавливают корпуса барж) и машиностроении (для изготовления станин и опорных частей тяжёлых станков и прессов).

В последние десятилетия железобетон стали использовать при взведении платформ для добычи нефти со дна морей в зоне шельфа и для устройства саркофагов и скафандров для захоронения радиоактивных отходов и хранения радиоактивных материалов.

Прогнозы показывают, что в нынешнем столетии железобетон останется основным строительным материалом для несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения.

Железобетонные изделия являются наиболее стойкими и крепкими конструкциями в строительстве. Благодаря использованию металлической арматуры при изготовлении железобетонных изделий (ЖБИ) их стойкость значительно превосходит альтернативные материалы и сохраняет устойчивость к коррозии. В зависимости от применения ЖБИ, их конструкции могут меняться. Основой для ЖБИ могут быть как портландцемент, так и силикатный бетон. На рис.1.1 представлены некоторые виды ЖБИ.

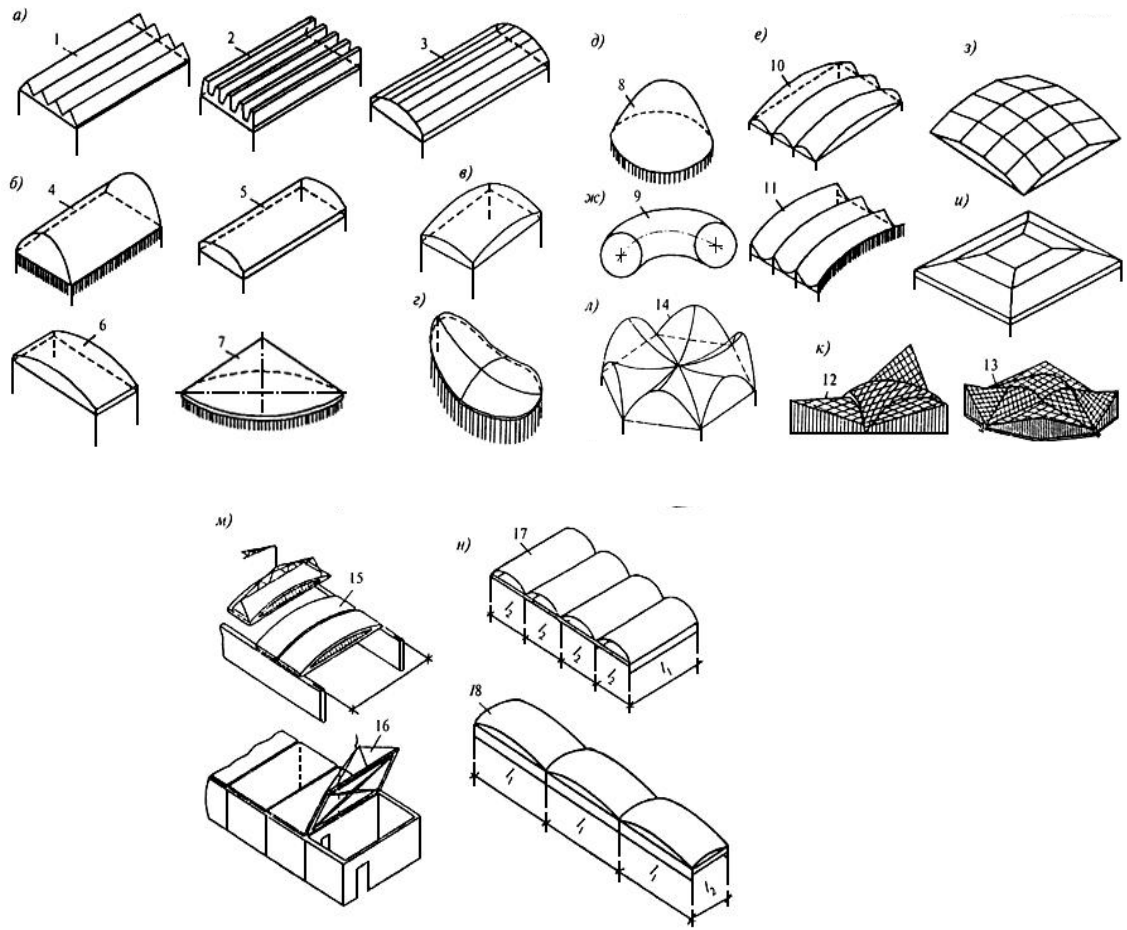


Рис. 1.1. Виды железобетонных конструкций

а — призматические складки; *б* — оболочки нулевой гауссовой кривизны; *в* — оболочки положительной гауссовой кривизны; *г* — то же, отрицательной; *д* — оболочки с вертикальной осью вращения; *е* — оболочки с горизонтальной осью вращения; *ж* — тороидальные оболочки разнозначной гауссовой кривизны; *з* - многогранники; *и* — то же, шатрового типа; *к* — составные оболочки; *л* — то же, из гиперболических треугольных сводов; *м* — панели-оболочки; КЖС размером на пролет покрытия и вспарушенные оболочки размером на ячейку здания; *н* — неразрезные оболочки; *1* — балочная складка с треугольным поперечным сечением; *2* — то же, с трапециевидным; *3* — то же, со сводчатым (призматические выпуклые складки); *4* — свод-оболочка; *5* — длинные цилиндрические оболочки, *6* — то же, короткие; *7* — коническая оболочка; *8* — купол; *9* — тороидальная оболочка; *10* — бочарные своды; *11* — гиперболические оболочки; *12* — покрытие с треугольным планом из оболочек положительной и отрицательной гауссовой кривизны; *13* — то же, с полигональным планом; *14* — покрытие из составных гипаров; *15*

— панели-оболочки КЖС; 16 – вспарушенные плиты-оболочки; 17 – многоволновые оболочки; 18 — многопролетные оболочки.

В настоящее время отрасль производства ЖБИ достаточно развита, и такие заводы можно встретить во многих странах, а с развитием интернет-технологии всё больше и больше появляется возможностей приобретать ЖБИ удалённо. Например, такую возможность на Украине предоставляет Киевский завод ЖБИ ДБК4. Сегодня строительство невозможно представить без использования ЖБИ, поэтому предприятие предлагает своим покупателям разнообразные плиты, блоки, панели, перемычки и многое другое.

Среди преимуществ использования железобетонных изделий можно отметить отличные теплоизоляционные свойства и экономичность. Используя готовые изделия, не приходится его завозить, нанимать бетоносмесительные машины, и кроме того, не приходится ждать пока он застынет. Таким образом, экономится не только время, но и деньги. Использование железобетонных изделий не ограничивается погодой, таким образом, использование ЖБИ остаётся возможным в любое время года.

Ко всему прочему очень удобно выстраивать дом из железобетонных стеновых блоков, в отличие от других материалов. Уникальная технология производства обеспечивает отличное качество и надежность конструкции, а процесс монтажа блоков проходит достаточно быстро и дешево.

Сборный железобетон в строительной практике имеет широкое распространение, применяется наравне со сталью, за исключением тех областей, где его использование нецелесообразно или невозможно. Исходными материалами для железобетона являются бетон и арматура. Действующие строительные нормы на бетонные и железобетонные конструкции разрешают применение девятнадцати классов бетона, семи классов стержневой арматуры и пяти - проволочной.

Сборные железобетонные конструкции изготавливают на заводах железобетонных изделий, а на строительной площадке готовые конструкции монтируют, т.е. устанавливают в проектное положение. Сборный железобетон широко применяют в промышленном, гражданском, сельском, гидротехническом, шахтном, транспортном, энергетическом и других видах строительства.

Недостатком заводского способа изготовления является невозможность выпускать широкий ассортимент конструкций. Особенно это относится к разнообразию форм изготавливаемых конструкций, которые ограничиваются типовыми опалубками. Фактически, на заводах ЖБИ изготавливаются только конструкции, требующие массового применения. В свете этого обстоятельства, широкое внедрение технологии сборного железобетона приводит к появлению большого количества однотипных зданий.

Применение сборных железобетонных конструкций в строительстве позволяет поднять производительность труда рабочих, повысить качество и долговечность зданий и сооружений, сократить сроки их возведения и снизить расход стали [15,17,21].

1.1.2 Монолитный железобетон

Монолитные железобетонные конструкции возводят с выполнением на строительной площадке операций по установке опалубки, монтажу арматурных каркасов и укладке бетонной смеси. После приобретения бетоном достаточной прочности (обычно через 7 суток) опалубку разбирают. Для монолитного фундамента используется бетон высокопрочных марок и арматура диаметром не меньше 12 мм. Такой фундамент используется на сильно сжимаемых грунтах (торфяники, песчаные подушки и т.д.) и по праву считается наиболее универсальным и надёжным. Монолитный фундамент отличается от прочих разновидностей наличием массивной бетонной плиты, составляющей единую конструкцию с опалубкой.

Для защиты таких железобетонных конструкций применяются специальные полимерные составы, позволяющие изолировать поверхностный слой железобетона от негативных влияний внешней среды. Для защиты железобетонного основания применяют различные типы защитных конструкций, позволяющих модифицировать эксплуатационные свойства минеральной поверхности — увеличить износостойкость, уменьшить пылеотделение, придать декоративные свойства (цвет и степень блеска), улучшить химическую стойкость.

Другой метод защиты железобетонных конструкций заключается в покрытии арматуры фосфатом цинка, который медленно реагирует с корродирующим химикатом (например щёлочью), образуя устойчивое покрытие.

Для защиты железобетонных конструкций от воздействия воды и агрессивных сред также применяют проникающую гидроизоляцию, которая модифицирует структуру бетона, увеличивая его водонепроницаемость, что предотвращает разрушение бетонных конструкций и коррозию арматуры.

Рациональные области применения монолитного железобетона - гидротехнические сооружения, дорожные и аэродромные покрытия, фундаменты под промышленное оборудование, резервуары, башни, элеваторы и т.п. Из монолитного железобетона обычно возводят массивные фундаменты и специальные сооружения (плотины, дымовые трубы), а в последние годы - жилые дома, гостиницы и другие здания.

1.1.3 Положительные характеристики материалов

Применение сборного железобетона снижает стоимость строительства за счет сокращения расхода бетона, стали и лесоматериалов и обеспечивает повышение производительности труда. Сборный железобетон позволяет значительно увеличить конструктивную эффективность здания - длину пролетов, площадь открытых пространств, уменьшить толщину конструкций и разнообразить планировку жилых помещений.

К достоинствам монолитных железобетонных конструкций следует отнести их долговечность и огнестойкость, возможность образования изделий необходимой формы, высокую жесткость, возможность использования местных материалов, экономию стали. Использование монолитных железобетонных конструкций позволяет значительно расширить возможности в процессе внутренней планировки жилых помещений. Монолитный железобетон обладает высокими теплоизоляционными характеристиками. Строительство монолитных зданий имеет еще одно очень важное достоинство - в первые годы после строительства объект проседает полностью, не образуя трещин [18,19,21].

1.1.4 Отрицательные характеристики материалов

Следует отметить, например, недостатки фундаментов из сборных железобетонных элементов, которые заключаются в том, что в малоэтажном строительстве блоки, предназначенные для 9-12 этажных зданий, при снижении количества этажей используются нерационально. Их несущая способность используется не более чем на 10%. При изготовлении фундаментных блоков, их транспортировке и укладке задействуется много людей и дорогостоящей техники. Поэтому достижение сокращения сроков строительства происходит за счет ухудшения других показателей. Отдельные блоки сборного фундамента не могут с достаточной эффективностью противостоять приложенным нагрузкам, и при больших осадках основания в каркасе здания появляются необратимые деформации и разрушения.

Недостатки монолитных железобетонных конструкций: большой собственный вес, необходимость устройства лесов и опалубки, высокая трудоемкость возведения, выдерживание изготовленной конструкции в опалубке до приобретения бетоном необходимой прочности.

1.1.5 Сравнительный анализ

Нельзя однозначно ответить на вопрос, какой тип железобетона лучше - сборный или монолитный. Очевидно, что у одного материала свои преимущества, у другого - свои. Но можно отметить несколько пунктов, по которым явно видны различия этих материалов:

- сборный железобетон имеет существенные преимущества перед монолитным, так как позволяет широко внедрять индустриализацию в строительное дело (прогрессивные технологические методы изготовления изделий на заводах и механизированный монтаж сооружений);

- материальные затраты при сооружении сборных фундаментов на 50-75% превышают материальные затраты монолитных конструкций;

- фундамент из сборных бетонных блоков проигрывает по прочности и другим эксплуатационным характеристикам монолитному фундаменту [14,17,18];
- строительство с использованием изделий из сборного железобетона в некоторых случаях неприменимо, например, в стесненных условиях при строительстве в центре города, где нет возможности, например, обеспечить площадку для складирования материалов;
- при строительстве из монолитного железобетона в 2-5 раз снижается расход арматуры в сравнении со строительством из сборного железобетона.

1.1.6 Виды арматуры

Арматура, применяемая в железобетонных конструкциях и сооружениях, делится на рабочую, распределительную, хомуты и монтажную (рис.1.2).

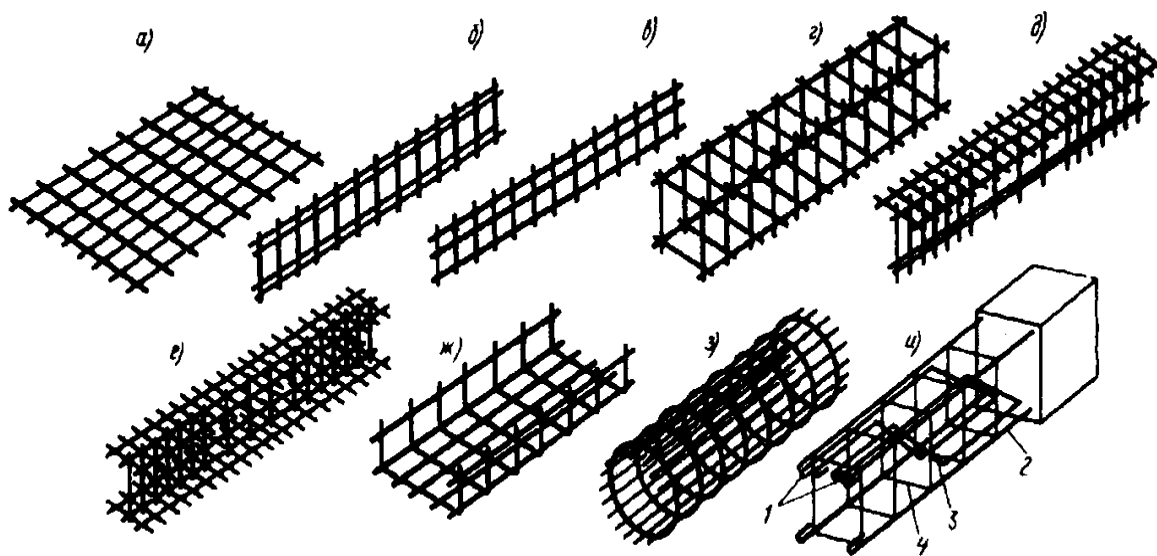


Рис. 1.2. Основные конструкции железобетонной металлической арматуры

а- сетка, б- продольный каркас, в- каркас с дополнительной арматурой, г- , д- тавровый каркас, е-двутавровый каркас, ж- хомуты, з- круглый каркас, и- каркас с хомутами.

Рабочая арматура воспринимает возникающие в железобетоне растягивающие и скалывающие усилия от внешних нагрузок и собственного веса конструкций. Распределительная арматура удерживает рабочие стержни арматуры в определенном положении и распределяет нагрузку между ними.

В тех случаях, когда рабочие стержни располагаются не только в растянутых, но и в сжатых частях конструкций, например, в балках, ригелях, арматура называется двойной. Хомуты связывают арматуру в единый каркас и предохраняют бетон от появления косых трещин около опор.

Монтажная арматура никаких усилий не воспринимает, служит для сборки арматурного каркаса и обеспечивает точное положение рабочей арматуры и хомутов при бетонировании.

Для лучшего предохранения арматуры от скольжения в бетоне арматурные стержни, подверженные растяжению, заггибаются в виде крючков на концах. Применение арматуры периодического профиля, благодаря повышенному сцеплению с бетоном, позволяет в большинстве случаев отказаться от крючков, что приводит к экономии стали.

Арматуру по способу установки подразделяют на виды: штучная арматура, арматурные сетки, арматурные каркасы, арматурные конструкции [15,21].

Штучная арматура может быть прутковая (из круглых стержней) и жесткая (из профильной прокатной стали: двутавровых балок, швеллеров, уголков, рельсов, труб). Штучная арматура собирается путем сварки на месте бетонирования в арматурный каркас или арматурную конструкцию из отдельных элементов. Применение штучной арматуры целесообразно при малых объемах работ, при необходимости пригонки стержней по месту в стесненных условиях бетонлируемой конструкции.

Арматурная сетка представляет собой взаимно перекрещивающиеся стержни, соединенные в местах пересечений сваркой или вязкой, и применяется в основном для армирования плит. Арматурные каркасы состоят обычно из продольной арматуры и соединяющей их решетки. Это так называемые плоские каркасы. Другой разновидностью арматурных каркасов являются пространственные каркасы, собранные из нескольких плоских каркасов или плоских сеток и пакетов. Арматурные каркасы применяются для армирования балок, колонн и т.д.

Для изготовления арматурных каркасов применяется круглая, горячекатаная, холоднокатаная, холодносплюснутая сталь периодического профиля.

Стержневая арматура получается путем проката на металлургических заводах. Проволочная арматура получается холодной протяжкой прокатных стержней через систему последовательно уменьшающихся отверстий - фильеров. В результате многократной протяжки уменьшается диаметр стержня и увеличивается его длина. При этом изменяется кристаллическая структура стали и значительно повышается ее прочность на разрыв. В зависимости от способа последующего упрочнения стержневая арматура может быть термически упрочненной (подвергнутой термической обработке) или упрочненной вытяжкой (подвергнутой вытяжке в холодном состоянии). Необходимо отметить, что, кроме металлической арматуры, применяется также и неметаллическая.

По профилю арматура делится на круглую, гладкую и арматуру периодического профиля. Арматура периодического профиля представляет собой стержни с равномерным рифлением для улучшения сцепления с бетоном. Выпускается арматура периодического профиля с двумя продольными ребрами и поперечными выступами, идущими по трехзаходной винтовой линии. Гладкая арматура не имеет рифления. По принципу работы арматура делится на ненапрягаемую и напрягаемую.

Сварка сеток и изготовление сетчатых изделий из проволоки контактной сваркой это широко распространенная область применения контактной сварки [22-25]. Сварка сеток и изделий из сетки возможна как на стандартных машинах контактной сварки, так и на полностью оснащенных линиях для сварки сеток. При внешней простоте технологии процесса и устройства оборудования для сварки сеток есть немало специфики, обусловленной как серийностью или массовостью производства, так и используемой проволокой. Если при сварке сеток для армирования железобетонных плит ГОСТ

относительно четко описывает требования к качеству сварки, то при изготовлении сетчатых изделий, таких как ограждения, кабельные лотки, различные корзины и каркасы, стеллажи - четкого нормирования показателей качества изготовления сетки нет. Рассмотрим некоторые особенности контактной сварки применительно именно к производству изделий из сварной сетки.

С точки зрения потребителя свариваемая сетка должна иметь нормальную геометрию, прямые углы, требуемое расположение продольных и поперечных прутков, быть плоской и иметь прочность сварных соединений достаточную для перегибов сетки без их разрушения, и, дополнительно, сварная сетка не должна иметь заметных следов деформации, выплесков и острого грата – это и вызывает затруднения для качественной окраски или покрытия сварного сетчатого изделия или сетки, а также может явиться причиной травм потребителя уже готовой продукции. При сварке таких сеток имеются некоторые технологических особенности.

Для изготовления сетки не всегда можно использовать дешевую проволоку, имеющую недостатки. Здесь есть разумный предел. Если вести сварку проволок вкрест на жестких режимах сварки - это обычно дает и наилучший внешний вид, хорошие прочностные свойства в сочетании с высокой производительностью. Но при загрязненной поверхности или отклонении диаметра проволоки сварка со стабильным качеством на жестких режимах становится невозможной - приходится переходить в область более мягкого режима сварки. На виде сварной сетки до определенного момента это не сказывается, однако уже влечет некоторое снижение прочностных свойств. При дальнейшем снижении тока и вынужденного ухода в сторону еще более мягких режимов происходит разогрев и общая деформация прутков в зоне сварки - сетка теряет плоскостность. Учитывая большое количество сварок перекрестий сетки даже при увеличении полного времени цикла сварки на 3-4 периода сети, сварка квадратного метра сетки с ячейкой 40x40 мм будет длиться на 35-50 секунд дольше. При использовании даже ручной сварки сетки на стационарной машине на жестком режиме изготовление такой карты сетки занимает порядка 6 минут. При использовании проволоки с посредственным качеством поверхности производительность сварки сетки падает минимум на 10%. Вышесказанное имеет отношение к использованию для сварки сетки проволоки из низкоуглеродистых сталей и не всегда справедливо в случае использования легированных и нержавеющей сталей [26-29].

1.2 Разработка критерия оценки качества электроконтактной сварки арматуры железобетонной конструкции

На заводах изготовителей металлической конструкции железобетонна качество проверяют оценкой механических свойств арматур испытанием на растяжение, а критерий оценки качества до сих пор не имеется. Для разрабоки энергоэкономичной технологии возникает необходимость чтобы мы разработали критериев оценки качества электроконтактных сварных соединений перекрещивающихся стержней. К этому вопросу посвящен данный раздел.

При контактной сварке в качестве такого критерия часто используется размеры литого ядра. Однако при сварке металлической сетки из арматурных прутков, в зависимости от режима сварки, соединения могут образоваться с ядром в жидкой фазе, а также в твердой фазе без образования литого ядра. В этих случаях за критерий качества сварки арматуры целесообразно применять результаты механических испытаний сварного соединения.

В строительных ненапряженных железобетонных конструкциях на сварное соединение действуют как отрывающие, так и срезающие усилия вследствие протекания физико-механических воздействий бетона. В связи с этим, критерием качества контактной сварки арматуры могут быть результаты механических испытаний сварных соединений на отрыв и на срез (рис.1.3). Из них наиболее целесообразную схему испытания возможно выбирать, исходя из ее чувствительности к изменению основных факторов процесса сварки [30-32]. В качестве такого фактора при сварке арматурных прутков накрест выступает сварочный ток, как один из основных параметров режима сварки, существенно влияющих на прочность сварного соединения [34-36]. Следовательно, чувствительность схемы испытания к изменению этого параметра должна быть основным критерием выбора показателя качества.

Для сопоставления схем испытаний (рис.1.3) были сварены при различных значениях сварочного тока 20 образцов. Сварка проводилась при оптимальных и постоянных

остальных параметрах режима и условиях. По 10 образцов из каждой партии были испытаны на прочность по двум исследуемым схемам (табл.1.1).

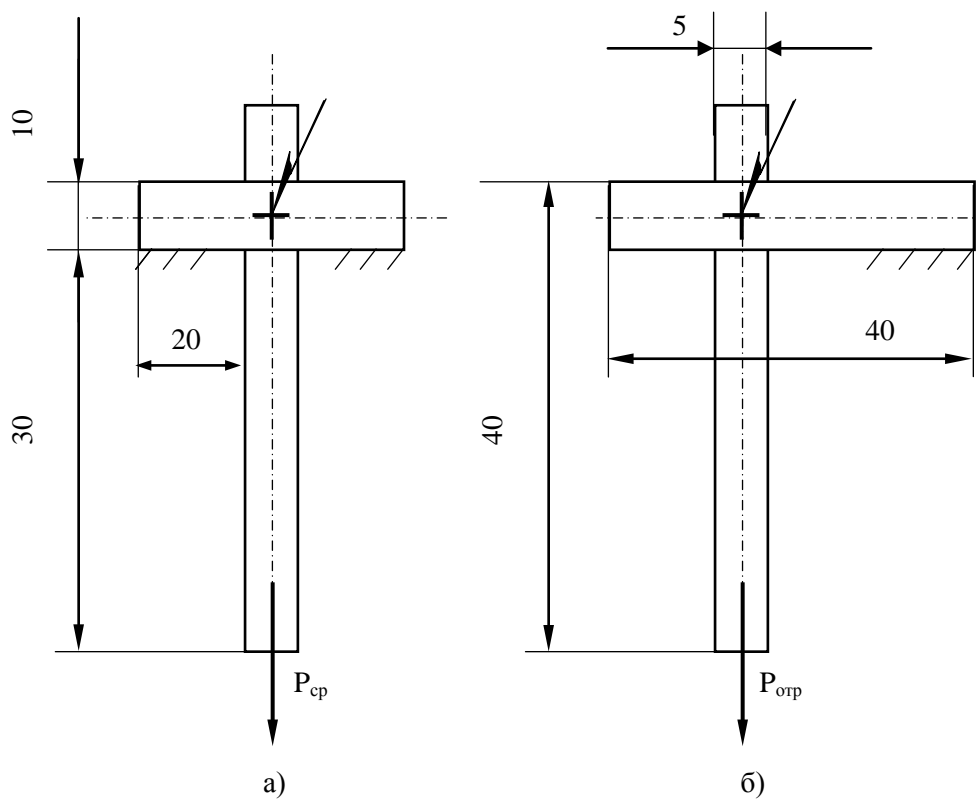


Рис.1.3 Схемы испытания сварных соединений на срез (а) и на отрыв (б).

Таблица 1.1 Экспериментальные и расчетные данные для расчета коэффициента корреляционной связи между сварочным током (I_1, I_2) и механическим испытанием сварного соединения на отрыв и на срез

№№	На срез					На отрыв				
	$P_{ср}, Y_1,$ даН	$P_{св}, Y_1,$ кА	Y_1^2	X_1^2	$Y_1 X_1$	$P_{отр}, Y_2,$ даН	$I_2, X_2,$ кА	Y_2^2	X_2^2	$Y_2 X_2$
1	16,6	1,0	275,56	1,0	16,6	13,1	1,1	171,61	1,21	14,41
2	17,5	1,12	306,25	1,2544	19,6	15,0	1,1	225	1,21	16,5
3	19,2	1,27	368,64	1,6129	21,384	18,1	1,2	327,61	1,44	21,72
4	19,0	1,25	361,0	1,6625	23,75	18,5	1,2	342,25	1,44	22,2
5	20,0	1,29	400,0	1,6641	25,8	19,2	1,3	368,64	1,69	22,96
6	21,5	1,30	462,25	1,69	27,95	20,5	1,3	420,25	1,69	26,65
7	22,0	1,35	484,0	1,8225	29,7	24,6	1,35	605,16	1,8225	33,21
8	19,5	1,26	380,25	1,5876	24,57	19,0	1,12	361,0	1,2544	21,28
9	24,0	1,45	576,0	2,1025	34,8	23,7	1,45	561,69	2,1025	34,365
10	19,5	1,27	380,25	1,6129	24,765	19,0	1,3	361	1,69	24,7
Σ	198,8	12,56	3994,2	15,9024	201,919	190,7	12,42	3744,28	15,5494	239,995
β	25,4					16,608				
R	0,94					0,86				
α	- 12,0224					- 0,9796				

Y=f(X)	$P = - 12,02 + 25,4 I$	$P = - 0,98 + 16,6 I$
--------	------------------------	-----------------------

В результате экспериментов получены зависимости $P_{отр} = f(I_{св})$ и $P_{ср} = f(I_{св})$. Вместе с тем, допускали между прочностью и сварочным током существование линейной связи. При этом критерием оценки чувствительности схем испытания был принят коэффициент корреляции между вышеуказанными параметрами. Ограничивались рассмотрением уравнения регрессии первого порядка $Y = \alpha + \beta X$. Коэффициент корреляционной связи r , коэффициенты α и β определяли по известным формулам [37-39]:

$$\beta = \frac{m \sum X_i Y_i + \sum X_i \sum Y_i}{m \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}; \quad \alpha = \frac{\sum Y_i - \beta \sum X_i}{m}; \quad r = \beta \sqrt{\frac{m \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}{m \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}},$$

где объем выборки $m=10$.

$P_{ср}, P_{отр}$, даН

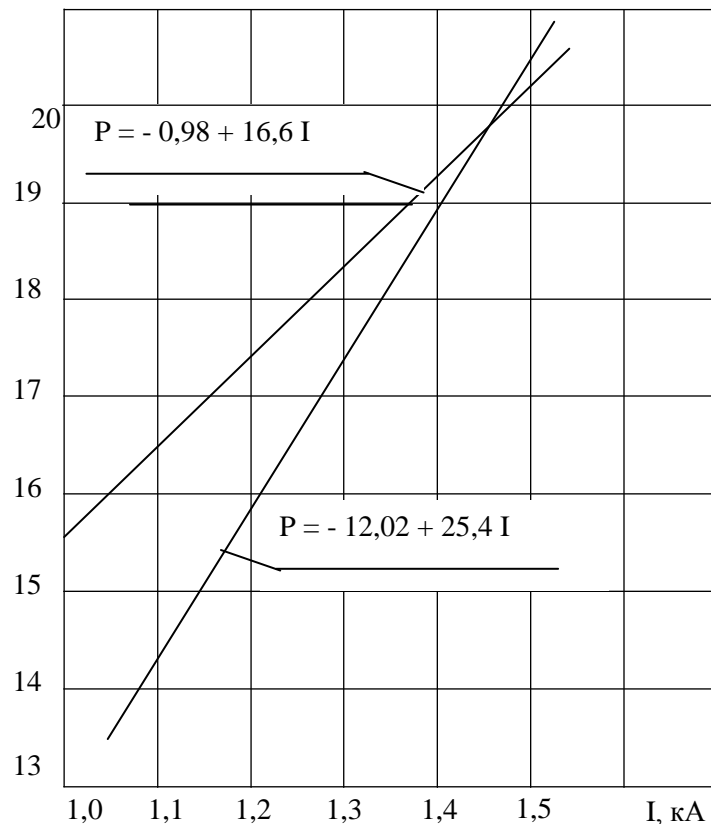


Рис.1.4 Зависимости прочности от сварочного тока при разных схемах испытания сварных соединений.

Результаты эксперимента и расчета представлены в табл.1.1. В обоих случаях испытаний обнаружена высокая корреляционная связь между током и усилием отрыва и среза. Однако некоторое преимущество можно отдать испытанию на срез, так как при этом коэффициент корреляционной связи больше (рис.1.4). Эта схема испытания будет более чувствительной к изменению параметров режима сварки, что особенно важно при разработке математической модели по параметрам режима сварки для оценки прочности сварных соединений.

Таким образом, для оценки прочностных показателей качества электроконтактных сварных соединений арматуры целесообразно использовать результаты испытания сварных соединений на срез.

1.3 Особенности разработки энергосберегающей технологии изготовления металлической сетки

В промышленном и гражданском строительстве, в широкораспространенных конструкциях из ненапряженного железобетона используется арматура класса В-I, Вр-I. Она представляет собой т.н. металлическую сетку из гладкой проволоки диаметром 3-5мм, которая изготавливается из низкоуглеродистой стали.

В сетках металлические проволоки укладываются в двух взаимно перпендикулярных направлениях и места их пересечения свариваются электроконтактным методом [40].

Изготовленные заводским способом металлические сетки отгружают на предприятия, изготавливающие железобетонные конструкции, в виде рулонов или в виде плоских кусков (рис.1.5).

Электроконтактная сварка сеток осуществляется одним импульсом тока и с постоянным давлением на электроды в месте сварки [2]. Соответственно, основными параметрами режима сварки являются: сварочный ток $I_{св}$, сила сжатия $F_{сж}$ и продолжительность сварки $t_{св}$.

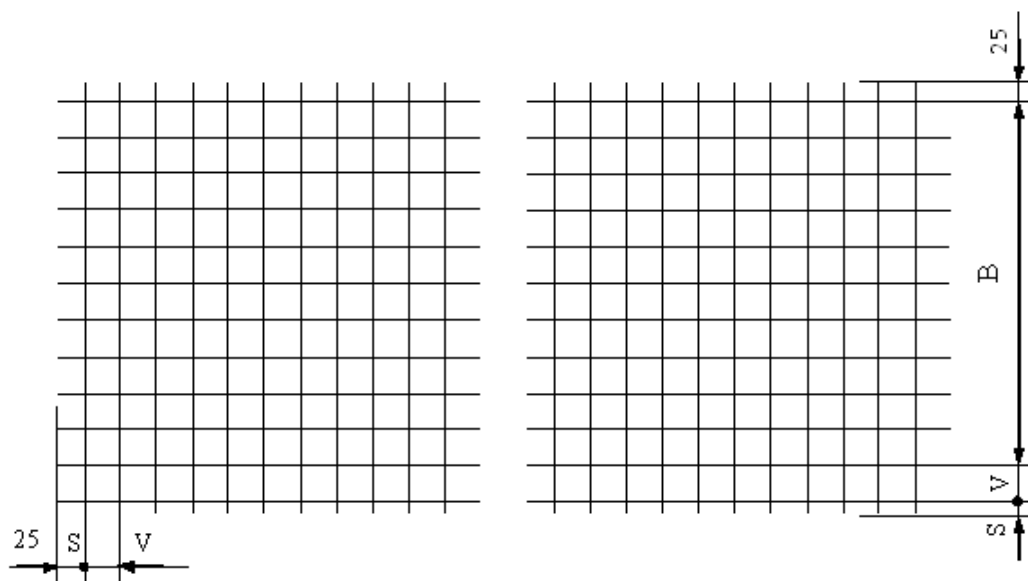


Рис.1.5 Сварная металлическая сетка, используемая в конструкциях из ненапряженного железобетона.

Для изготовления металлических сеток в производственных условиях используются установки многоточечной электроконтактной сварки. С целью исследования особенностей разработки энергосберегающей технологии изготовления металлических сеток, нами были проведены эксперименты на машине МТ-75 для электроконтактной сварки на образцах, представленных на рис.1.6. В эксперименте были оставлены неизменными те же величины параметров режима сварки $F_{сж}$, $t_{св}$, как и в производственных условиях, а сварочный ток

изменялся в соответствии с данными табл.1.2. В экспериментах 6, 7, 8 диапазон изменения сварочного тока соответствовал изменению тока при изготовлении сетки в производственных условиях. В остальных экспериментах уменьшение сварочного тока производилось нами постепенно (эксперименты 1, 2, 3, 4, 5).

В остальных экспериментах регулирование сварочного тока производили ступенчатым изменением числа витков во вторичной обмотке сварочного трансформатора для регулирования вторичного напряжения. На каждой ступени дополнительно сварочный ток регулировали внесением в сварочный контур колец с ферромагнитными свойствами. Режимы сварки и результаты экспериментов приведены в табл.1.2.

Табл.1.2

Режимы сварки, результаты испытания сварных соединений

№ опытов	Последовательность экспериментов																							
	1		2		3		4		5		6		7		8									
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y								
1	0,6	8,5	1,0	13,5	1,2	17,6	1,6	23	1,9	29,2	2,4	35	4,0	33	4,0	33								
2	0,8	11,0	0,9	13,5	1,07	18,5	1,6	23,6	1,9	29,6	2,4	35,5	3,9	33,8	3,9	33,8								
3	0,5	10,0	1,1	14,0	1,0	19,0	1,58	24,5	1,95	30,5	2,4	34,5	3,9	33	3,9	33								
4	0,5	8,5	1,15	14,5	1,0	20,0	1,6	25,5	1,82	29,2	2,35	35	4,0	33	4,0	33								
5	0,7	9,0	1,0	15,5	1,2	20,0	1,8	24,0	1,83	29,8	2,35	35	3,9	33	3,9	33								
6	0,65	11,0	1,0	15,0	1,25	20,0	1,75	24,6	1,84	30,5	2,35	34,8	3,9	33,5	3,9	33,5								
7	0,4	8,0	0,75	14,0	1,25	20,0	1,40	23,5	2,05	29,5	2,3	35,2	4,1	32,8	4,1	32,8								
8	0,5	9,5	0,65	14,5	1,40	19,5	1,35	24,5	2,07	29,8	2,3	36	4,1	32,7	4,1	32,7								
9	0,6	9,5	0,75	15,0	1,25	19,0	1,45	24,5	2,07	30,2	2,3	35,5	4,1	32,7	4,1	32,7								
10	0,7	10,5	0,9	16,0	1,2	19,0	1,42	25,3	2,1	29,5	2,35	36	4,1	33,0	4,1	33,0								
$1/n\Sigma X_i$	0,595		0,92		1,182		1,555		1,953		2,12		3,2		4,0									
$1/n\Sigma Y_i$		9,55		14,65		19,26		24,30		29,78		34,03		35,25		32,99								
S_x		1,136		1,01		0,643		0,618		0,60		0,58		0,50		0,050								
S_y	0,0147		0,026		0,0157		0,0601		0,06		0,058		0,055		0,05									

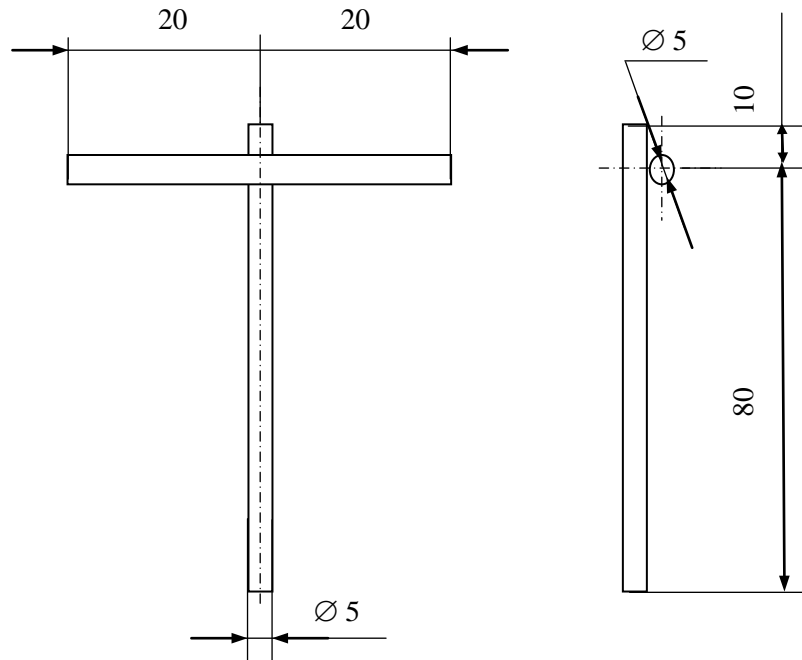


Рис.1.6 Образец для сварки (элемент металлической сетки)

На каждом режиме сварки сваривали по 10 образцов. При эксперименте, в процессе получения каждого сварного соединения определяли величину сварочного тока, а путем механического испытания соответствующего сварного образца определяли его прочность (P). По их средним значениям построена зависимость между прочностью места сварки и сварочным током (рис.1.7).

На основе корреляционных исследований было установлено, что для значений экспериментов 1, 2, 3, 4, 5 коэффициент корреляции $r = 0,89$, что является показателем того, что на участке АВ зависимость имеет линейный характер, а в соответствии с данными экспериментов 6, 7, 8 - коэффициент корреляции $r = 0,47$ и, соответственно, участок ВСД является нелинейным. На этом участке дисперсия прочности S_y значительно уменьшена и она приближается к дисперсии прочности низкоуглеродистой стали. Отмечается также, что при механическом испытании сваренных образцов анализ разрушения образца и наблюдение за процессом выплесков в процессе сварки показывает,

что причины нелинейности зависимости на участке ВД связаны: 1) с изменением структуры свариваемого материала в зоне термического влияния при сварке; 2) с выплеском из зоны сварки расплавленного металла.

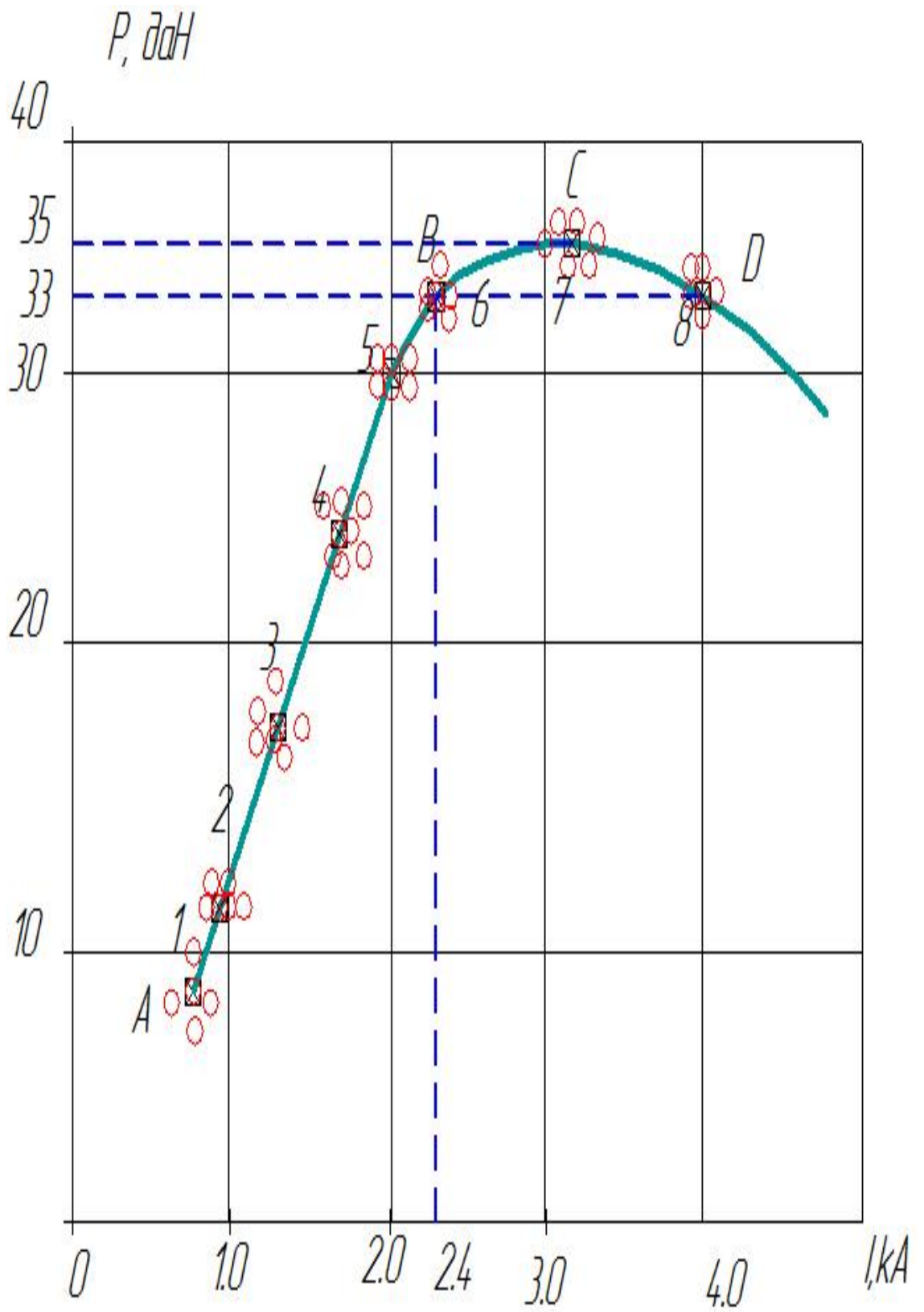


Рис.1.7 Зависимость между прочностью электроконтактной сварки металлической сетки и сварочным током

В первом случае, в зоне термического влияния происходит уменьшение пластичности и увеличение хрупкости, в результате чего при механическом воздействии на зону сварки происходит разрушение в этой зоне свариваемого материала, а не места сварки. На это указывает также и то, что на нелинейном участке прочность места сварки незначительно зависит от величины сварочного тока и, соответственно, нелинейный участок является падающим.

Во втором случае при увеличении тока выше 2,4 кА выделившееся в зоне сварки тепло возрастает, однако, в соответствии с этим не возрастает площадь контакта свариваемых деталей, в результате чего в зоне сварки повышается плотность тока и из-за этого имеет место выплеск расплавленного металла из перегретой зоны. С другой стороны, потеря энергии в результате выплесков является причиной нелинейности зависимости. Несмотря на это, при изменении сварочного тока в большом диапазоне (2,4-4,0 кА), сравнительно незначительно (33-35 дан) изменяется прочность места сварки. Хотя, также существенны потери электроэнергии. Если при сварке металлических сеток, изготовленных на предприятиях, сварочный ток будет меньше 2,4 кА, то вероятность получения равнопрочного основному металлу сварного соединения уменьшается и не исключена возможность получения сварных соединений с меньшей, чем допустимо, прочностью. Поэтому становится необходимым контроль качества прочности сварного соединения, для того, чтобы была возможна своевременная корректировка сварочного тока в случае получения сварного соединения с недопустимой прочностью.

Так как в процессе сварки возможность выплесков влияет на прочность сварного соединения и связана с большими потерями энергии, то это явление может быть принято в качестве показателя качества процесса сварки [41,42].

Выводы по I разделу:

1. В результате литературного анализа установлено:
В промышленном и гражданском строительстве, в широко распространенных конструкциях из ненапряженного железобетонна используется арматура класса В-1, В_р-1. Часто она представляет собой т.н. металлическую сетку из гладкой проволоки диаметром 3-5 мм, как одинакового так и разного сечения.
2. Статистический анализ параметров применяемых в производственных условиях режимов, а также наши исследования показали:
в производстве строительных железобетонных конструкций при изготовлении металлических сеток имеет место перерасход электроэнергии.
3. Этого можно избежать путем уменьшения сварочного тока, таким образом, чтобы была обеспечена необходимая прочность сварной точки, соответствующая линейному участку изменения прочности от сварочного тока.

2. НАГРЕВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИХСЯ КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ

2.1 Опытное исследование процесса нагрева при контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней

Чтобы представить общую картину процесса сварки перекрещивающихся стержней, были поставлены опыты, в результате которых установили изменение температуры в различных точках сварных соединений и осадку в месте соприкосновения стержней.

Опыты проводили на малоуглеродистой стали, химический состав и механические свойства которой приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Химический состав и механические свойства низкоуглеродистой стали

Химический состав, %					Механические свойства	
C	Mn	Si	S	P	Предел прочности дан/мм ²	Относительное удлинение, %
0,24	0,45	0,02	0,031	0,045	47,0	37,0

Стержни диаметром 5x10 мм сваривали на машине типа МТ-65 на двух режимах:

- мягкий режим: сварочный ток $I_T=2100\text{A}$;
продолжительность сварки $t_{св}= 8$ сек;
усилие на электродах 300 дан;
- жесткий режим: сварочный ток $I_T=2500\text{A}$;
продолжительность сварки $t_{св}= 3,5$ сек;
усилие на электродах 300 дан.

Температуру в стержнях измеряли хромель-алюминиевыми термопарами с диаметром проволоки 0,2 мм. Термоэлектродвижущие силы термопары записывали на шлейфовом осциллографе.

Температуру измеряли в трех точках. Из них две точки были расположены около контакта со стороны каждого свариваемого стержня, а третья точка находилась около нижнего электрода (рис.2.1). Термопары приваривали к образцам конденсаторной сваркой.

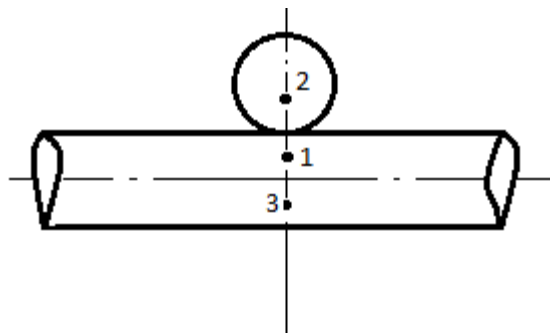


Рис 2.1 Расположение точек, в которых измерялась температура при сварке

Величину усилия на электродах измеряли динамометром посредством специальных приспособлений.

Результаты опытов при сварке образцов на мягком режиме представлены на рис.2.2.

Наибольшая скорость нагрева в начале процесса наблюдается в точках, расположенных в области сварочного контакта (точки 1, 2).

В точке, находящейся вблизи электрода (точка 3 на поверхности малого стрежня) скорость нагрева несколько меньше.

Характерным для этого опыта является образование площадки почти постоянных температур на кривых термического цикла тех точек, которые находятся в области наибольшего разогрева точек 1,2. Очевидно, что на определенной стадии процесса сварки в области, прилегающей к контакту, наступает тепловое равновесие, при котором выделение теплоты вследствие работы тока, уравнивается отводом теплоты вследствие теплопроводности. Температура точек этой области в дальнейшем почти не повышается [42-44].

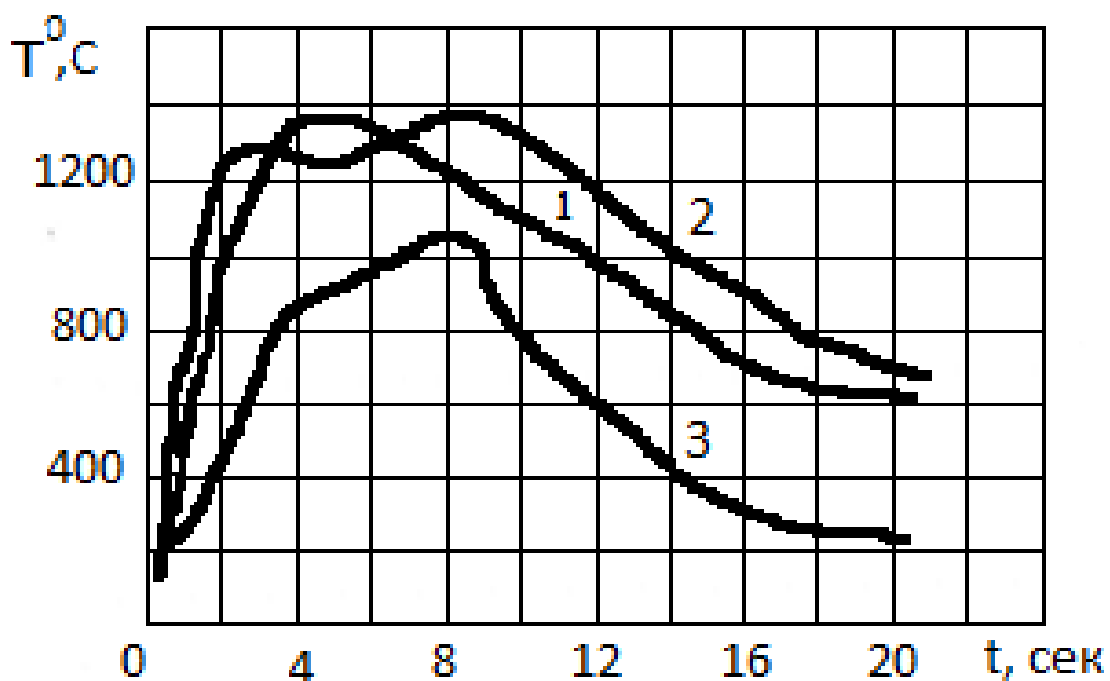


Рис.2.2. Термический цикл различных точек сварного образца (мягкий режим сварки)

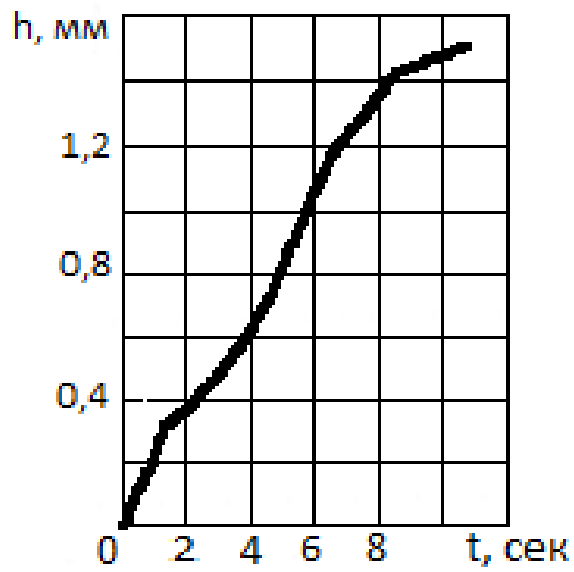


Рис.2.3. Зависимость осадки от длительности сварки

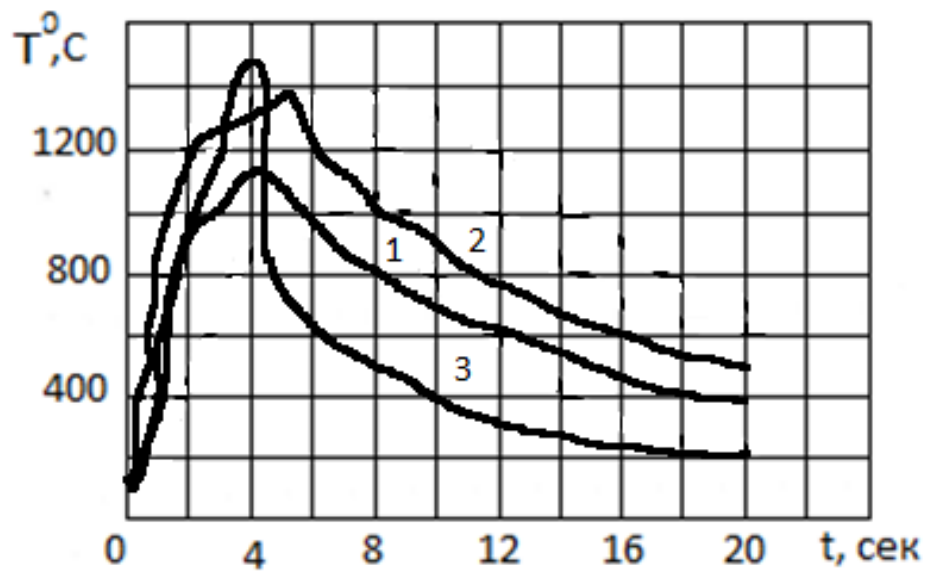


Рис.2.4. Термический цикл различных точек сварного образца
(жесткий режим сварки)

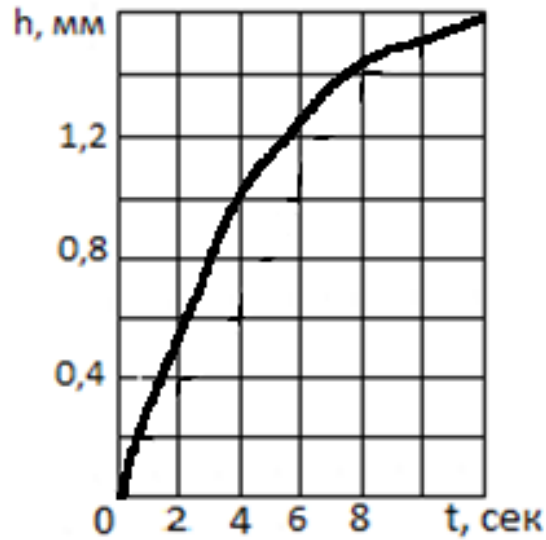


Рис.2.5 Зависимость осадки между стрежнями от длительности сварки

При правильно выбранных параметрах режима, в сочетании с усилием на электродах, установившееся тепловое состояние должно соответствовать нагреву точек контакта до температуры плавления. Чрезмерно большое усилие на электродах при недостаточном токе снизит плотность тока в сварочном контакте, и состояние равновесия наступит прежде, чем будет достигнута необходимая температура в зоне сварки, что приведет к непровару. Таким образом, уровень площадки равновесия на кривых термического цикла регулируется изменением электрических параметров в сочетании с усилием сдавливания [45-47].

Температура точек 1, 2 на 2-5-й секунде достигает 1200-1400 А и остается почти постоянной до момента выключения тока. Дальнейшее выделение тепловой энергии расходуется на прогрев удаленных от места сварки точек. К моменту выключения тока температура в точке 3 успевает повысится до 1100-1150⁰С. Процесс нагрева точек вблизи электродов также стремится к стационарному состоянию. Однако температура в этих точках составляет лишь 500-600⁰С при максимальной установившейся температуре в точке 1, равной 1300⁰С. Поэтому температура точки 3, несколько замедлив скорость, продолжает нарастать, достигая к моменту выключения тока 250⁰С.

Как видно, продолжительность сварки составляет 8 сек. При данном токе и усилии сдавливание приводит к сильному перегреву металла стержня малого диаметра.

После выключения тока наступает период охлаждения и выравнивания температур. Различаются две стадии этого периода. 1) выравнивание температур при замкнутых электродах; 2) свободное выравнивание температур и охлаждение при разомкнутых электродах [48-51].

Результаты опытов при сварке образцов на жестком режиме представлены на рис.2.4.

Точки, близкие к сварочному контакту - точки 1, 2 нагреваются примерно с такой же скоростью, как и при сварке на мягком режиме. Это можно объяснить тем, что более высокая начальная плотность тока в области сварочного контакта вызвала быстрый рост осадки в начале процесса нагрева и, соответственно, быстрое снижение плотности тока в сварочном контакте (рис.2.3, рис.2.5).

Таким образом, околоконтактная область оказалась нагретой примерно до той же температуры предельного состояния, что при сварке на мягком режиме. Осадка при этой температуре при сварке на жестком режиме в 1,4-1,6 раза превышала (рис.2.5) осадку в первом случае (рис.2.3). поэтому необходимый для получения требуемой осадки прогрев точек, удаленных от контакта, достигается в течение 1,5-2 сек, а при сварке на мягком режиме та же величина осадки достигается через 6-6,5 сек. В результате сокращения общей длительности нагрева по сравнению с первым опытом, максимальная температура малого стержня, удаленных от сварочного контакта, оказалась значительно ниже во втором опыте.

Процесс выравнивания температур можно считать законченным через 1,5-2 мин после начале процесса сварки. По истечении этого времени температура всех точек большого и малого стержней укладывается между 150-200⁰С.

2.2 Теоретическое исследование процесса нагрева стержней

При нагреве тела источником теплоты постоянной мощности различают две стадии процесса: теплонасыщение и предельное состояние. Чем ближе к источнику теплоты расположена зона контакта, тем раньше наступает в ней предельное состояние.

При контактной сварке перекрещивающихся строжней источники теплоты распределены по объему металла и по поверхности в местах контактов. В условиях наших опытов предельное состояние за время сварки достигалось в области, прилегающей к сварочному контакту.

Для примерной оценки характера протекания процесса в этой области воспользуемся расчетной схемой местного нагрева пространственно-радиальным током массивного тела с сопротивлением, возрастающим с ростом температуры [52-55].

Околоконтактную область перекрещивающихся строжней представим схематическим полубесконечным теплопроводящим телом: ток J_2 вводится в тело через контактную полусферическую полость радиуса r_0 и распределяется равномерно по ее поверхности $2r_0^2$ [56-58].

Таким образом, плотность пространственно-радиального тока рассчитывается по формуле:

$$\gamma(r) = \frac{J}{2\delta r_0}.$$

Если начальная температура тела $T(r,0)=0$, а отношение удельного сопротивления металла $\rho_{\text{ом.см}}$ к его объемной теплоемкости $c\gamma$ (кал/см³ град), линейно возрастает при увеличении температуры

$$\frac{\rho(T)}{c\gamma(T)} = \frac{\rho_0}{(c\gamma)_0} (1 + \beta T). \quad (2.1)$$

Здесь ρ_0 и $(c\gamma)_0$ - значения удельного сопротивления и объемной теплоемкости при нулевой температуре; β - температурный коэффициент возрастания отношения $\frac{\rho}{c\gamma}$ 1/град.

Дифференциальное уравнение нагрева для пространственно-радиального процесса имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2\partial T}{r\partial r} \right) + 0,24 \frac{J_2 \rho_0}{4\pi^2 \mu^4 (c\gamma)_0} (1 + \beta T) \quad (2.2)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ - коэффициент температуропроводности, см²/сек;

λ - коэффициент теплопроводности, кал/см сек⁰С;

β - температурный коэффициент, град⁻¹.

Введем безразмерные критерии процесса:

$\theta = \beta T$ - относительная температура;

$\tau = \frac{dt}{\Gamma_0^2}$ - критерий гомохронности;

$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \rho$ - относительный радиус;

$\mu^2 = \frac{0,24\beta\rho_0 l_0^2}{4\pi^2\alpha(C\gamma)_0\Gamma_0^2}$ - энергетический параметр, характеризующий интенсивность

источника теплоты в контактном сечении нагретого тела.

Уравнение (2.2) в безразмерных параметрах запишется:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = \frac{\partial^2\theta}{\partial\rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial\theta}{\partial\rho} + \frac{\mu^2}{\rho^4} (1 + \theta), \quad (2.3)$$

где $1 \leq \rho \leq \infty$; $0 \leq \tau \leq \infty$.

Принимаем граничные условия:

- 1) полусферическая граница $r = r_0$ или $\rho = 1$ непроницаема для теплоты

$$\frac{\partial\theta}{\partial\rho}(1, \tau) = 0;$$

- 2) температура и тепловой поток равны нулю при $\rho = \infty$ в любой момент времени

$$\theta(\infty, \tau) = 0, \quad \frac{\partial\theta}{\partial\rho}(\infty, \tau) = 0;$$

- 3) В начале процесса температура во всем теле равна нулю

$$\theta(\rho, 0) = 0.$$

Уравнение (2.3) преобразуем путем инверсии пространственно-радиального радиуса ρ .

Это превращает полубесконечную область в ограниченную и облегчает решение уравнения численным методом

$$\vartheta = \frac{1}{\rho} = \frac{\Gamma_0}{\Gamma}; \quad 0 \leq \vartheta \leq 1.$$

Процесс теплонасыщения $\theta(\vartheta, \tau)$ подчиняется в области $0 \leq \vartheta \leq 1$, $0 \leq \tau \leq \infty$ дифференциальному уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = \vartheta^2 \left[\frac{\partial^2\theta}{\partial\vartheta^2} + \mu^2 (1 + \theta) \right] \quad (2.4)$$

при граничных условиях:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \vartheta}(1, \tau) = 0 ;$$

$$\theta(0, \tau) = 0 ;$$

$$\theta(\vartheta, 0) = 0 .$$

Уравнение (2.4) решим методом конечных разностей. Разделим промежуток интегрирования ϑ , изменяющийся в пределах от 0 до 1, на n равных частей $\Delta\vartheta$, а длительность процесса - на K равных промежутках времени. Производные, входящие в уравнение (2.4), заменим отношениями конечных разностей:

$$\frac{\partial \theta}{\partial l} \approx \frac{\Delta \theta_{к.п}}{\Delta l}, \tag{2.5}$$

$$\frac{\Delta^2 \theta_{к.п}}{\Delta \vartheta^2} = \frac{\theta_{к.пн} + \theta_{к.п-1} - 2\theta_{к.п}}{\vartheta^2}.$$

Уравнение (2.4) в конечных разностях принимает вид:

$$\Delta \theta_{к.п} = \frac{\vartheta_{п}^4}{\Delta \vartheta^2} (\theta_{к,п+1} + \theta_{к,п-1} - 2\theta_{к,п}) + \vartheta_{п}^4 \mu \Delta \tau (1 + \theta_{к,п}). \tag{2.6}$$

Уравнение (2.6) выражает приращение температуры $\Delta \theta_{к.п}$ в слое n , в момент времени K , если известна температура этого слоя $\theta_{к,п}$ и двух прилегающих к нему слоев $\theta_{к,п+1}$ и $\theta_{к,п-1}$. В начальной момент процесса приращение температуры во всех слоях обусловлено лишь наличием члена $\vartheta_{п}^4 \mu \Delta \tau$, независящего от температуры.

Полагая в уравнении (2.4) $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$, получим уравнение предельного стационарного состояния процесса распространения теплоты при нагреве тела пространственно-радиальным током

$$\frac{\partial^2 \theta_{ср}}{\partial \vartheta^2} + \mu^2 (1 + \theta_{\infty}) = 0, \tag{2.7}$$

решение которого при следующих граничных условиях имеет вид:

$$\theta_{\infty}(1) = \theta_{\max}; \quad \frac{\partial \theta_{\infty}}{\partial \vartheta}(1) = 0; \quad \theta_{\infty}(0) = 0; \quad \frac{\partial \theta_{\infty}}{\partial \vartheta}(0) = 0.$$

Получаем

$$\theta_{\infty}(\vartheta) = \frac{\cos[\mu(1-\vartheta)]}{\cos \mu} - 1. \quad (2.8)$$

Область существования выражения (2.8), т.е. область ограниченности предельной температуры $\theta_{\infty}(\vartheta)$, определяется условием $\cos \mu > 0$. При $\cos \mu = 0$, т.е. при $\mu = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$, где $m=0; 1; 2; 3; \dots$, температура везде, кроме $\vartheta = 0$, возрастает неограниченно.

Наименьшее критическое значение $\mu = \frac{\tau}{2}$ определяет предельную нагрузку током, вызывающую неограниченное повышение температуры.

На рис.2.6 представлен график зависимости предельной температуры $\theta_{\infty}(\vartheta)$ от пространственной координаты ϑ при различных значениях энергетического параметра μ , характеризующего интенсивность источников теплоты.

Процесс теплонасыщения околоконтактной области рассчитан по методу конечных разностей для случая нагрева ее источником теплоты, характеризующимся безразмерным параметром $\mu^2=2$ ($r = 1,41$, т.е. $\mu < \mu_{кр}$). Участок интегрирования делили на 10 промежутков $\Delta\vartheta = 0,1$.

Для упрощения расчетов $\Delta\tau$ выбирали из условия

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\vartheta^2} = 1; \quad \Delta\tau = \Delta\vartheta^2 = 0,01.$$

За условие на границе (в 10-м слое) была принята интерполяционная формула Ньютона:

$$3\theta_{к,10} = 4\theta_{к,9} - \theta_{к,8} . \quad (2.9)$$

Для 34-х интервалов времени температура была рассчитана при 10 слоях; начиная с $\tau = 0,34$, число слоев было сокращено вдвое ($n = 5$; $\Delta\vartheta = 0,2$), а промежуток времени был соответственно увеличен в 4 раза ($\Delta\tau = 0,04$).

Результаты расчета температуры по формуле (2.6) представлены графиком на рис.2.7.

Расчет температуры методом конечных разностей не доведен до предельного состояния, т.к. можно предположить, что температура в контакте близкая к предельной, будет достигнута при $\tau = 400$.

Определим омическое сопротивление массивного тела с возрастающим удельным сопротивлением при нагреве пространственно-радиальным током. Сопротивление dR элементарного слоя толщиной dr при температуре $T(r, t)$ выразится

$$dR = \rho_0(1 + \beta^2 T) \frac{dr}{2\sigma r^2} = \frac{\rho_0}{2\pi r_0} [1 + \sigma\theta(\rho, \mu)] \frac{d\rho}{\infty^2} = \frac{\rho_0}{2\pi r_0} [1 + \sigma\theta(\vartheta, \tau)] d\vartheta. \quad (2.10)$$

Здесь $\sigma = \beta' / \beta$ - отношение температурных коэффициентов.

Так как зависимость удельного сопротивления ρ от температуры принята линейной

$$\rho(T) = \rho_0(\mu + \beta \cdot T),$$

с температурным коэффициентом $\beta' = \sigma\beta$, превышающим температурный коэффициент β , входящий в линейную зависимость

$$\frac{\rho(T)}{c\gamma(T)} = \frac{\rho_0}{(c\gamma)_0} (1 + \beta T)$$

Здесь ρ_0 и $(c\gamma)_0$ - значение удельного сопротивления и объемной теплоемкости при нулевой температуре; β - температурный коэффициент возрастания отношения

$$\frac{\rho}{c\gamma} \frac{1}{\text{град}}$$

Проинтегрировав выражение (2.10) по ν в пределах от 0 до 1, получим омическое сопротивление тела R:

$$R = \frac{\rho_0}{2\pi r_0} \int_0^1 [1 + \sigma\theta(\vartheta, \tau)] d\vartheta. \quad (2.11)$$

Холодное сопротивление будет:

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi r_0} . \quad (2.12)$$

Подставив в выражение (2.11) значение $\theta_{пр}$ из (2.8), получим сопротивление стержня в предельном состоянии:

$$R = \frac{\rho_0}{2\pi r_0} \left(\sigma \frac{t_g \mu}{\mu} - \sigma \right) + 1 . \quad (2.13)$$

Увеличение сопротивления тела за время нагрева до предельного состояния выразится при $\beta' = \beta$, т.е. при $\sigma=1$

$$\frac{R}{R_0} = \frac{t_g \mu}{\mu} . \quad (2.14)$$

На рис.2.8 представлена зависимость увеличения сопротивления за время нагрева до предельной температуры при различных значениях μ . При $\mu = \frac{\pi}{2}$ сопротивление возрастает неограниченно.

2.3 Анализ процесса нагрева стержней

Опытное исследование нагрева перекрещивающихся стержней при контактной сварке показывает, что предельного состояния процесс достигает в области, прилегающей к сварочному контакту. Для примерной оценки характера протекания процесса нагрева в этой области воспользуемся расчетной схемой выражением (2.8).

Околоконтактную область представим полубесконечным теплоотводящим телом с источником тока J_2 , равномерно распределенным по поверхности полусферической полости радиуса. Температура предельного состояния точки n околоконтактной области в момент времени t для этого случая определяется выражением:

$$\theta_{\infty}(t_{nt}) = \frac{\cos[\mu(1-\vartheta_{nt})]}{\cos\mu} - 1, \quad (2.15)$$

где $\theta_{\infty} = \mu T_{\infty}$ - безразмерная температура (T - абсолютная температура $^{\circ}\text{C}$);

β - температурный коэффициент, град $^{-1}$;

$\vartheta_{nt} = \frac{r_{ot}}{r_{nt}}$ - инвертированный безразмерный параметр расстояния точки n в момент времени t , расположенной на поверхности сферы радиуса r_{nt} ;

$\mu = \frac{J_2}{2\pi r_{ot}} \sqrt{0,24 \frac{\beta \rho_0}{\lambda}}$ - безразмерный параметр, характеризующий интенсивность источников теплоты;

ρ_0 - начальное удельное сопротивление металла, Ом см;

λ - коэффициент теплопроводности при средней температуре нагрева 500°C , (кал/см) \cdot сек \cdot $^{\circ}\text{C}$.

Параметр μ не остается постоянным в процессе сварки, а изменяется по мере увеличения тока J_2 и радиуса r_{ot} контактной полусферы. В начале процесса, когда r_{ot} мало, μ имеет наибольшее значение, затем быстро падает. Характер изменения μ обусловлен соотношением электрических параметров режима и усилия сдавливания. Если нагрузка током такова, что при данном усилии сдавливания μ достигает критического значения $\mu_{кр} = \frac{\pi}{2}$, то это значит, что процесс имеет предельное состояние.

Для получения качественного сварного соединения, при температуре $\theta_{\infty}(\vartheta_{nt})$ предельного состояния в контакте $\vartheta_{nt} - 1$ должна быть не ниже температуры плавления θ_{nt} , а нагрев должен быть прекращен лишь после того, как произойдет необходимая осадка стержней.

Определив μ в тот или иной момент процесса сварки, можно сказать, возможно ли существование предельного состояния при таком соотношении параметров режима и какова температура предельного состояния при различных значениях μ . Параметр μ можно

определить, если известны сварочный ток, коэффициенты теплофизических свойств свариваемого материала и характер изменения осадки.

Температура предельного состояния в околосварочной области определяется в предположении, что весь предыдущий нагрев происходит при данном значении μ . В действительности процесс происходит в начале процесса при более высоких значениях μ , а в конце процесса - при более низких.

Относительное расстояние интересующей нас точки также изменяется в процессе сварки:

$$\vartheta_{nt} = \frac{r_{ot}}{r_{nt}};$$

где r_{ot} - радиус контактной полусферы, возрастающей по мере осадки;

r_{nt} - радиус полусферы, на которой расположена данная точка.

Ниже, для двух типовых режимов, приведен пример расчета предельной температуры точки N малого срежня, находящейся на расстоянии 3 мм от места первоначального соприкосновения стержней, т.е. от поверхности стрежня, еще не деформированной в области контакта.

При холодном обжатии стержней до включения тока площадь проекции контактной поверхности составляет около 4,6 мм², что соответствует осадке в 0,07 мм. Вычисляем расстояние точки от контактной поверхности в любой момент процесса как разность между расстоянием этой точки от поверхности стрежня (3 мм) и осадкой h_{ot} в этот момент, т.е. $a_{nt} = (3 - h_{ot})$ мм. Радиус r_{nt} сферы, на которой расположена точка N, определим, предполагая, что расстояние a_{nt} от этой сферы до контактной сферы в любой момент времени равно опытному расстоянию от контактной поверхности до точки N (рис.2.9).

Результаты вычисления параметра μ и координаты расстояния ϑ_{nt} точки N в различные моменты времени приведены в таблице 2.1.

Приняты следующие теплофизические коэффициенты, введенные в расчет:

$$\rho_0 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}; \beta = 0,5 \cdot \frac{10^{-3} \text{ 1}}{r}; \gamma = \frac{0,1 \text{ кал}}{\text{см}} \cdot \text{сек}^0 \text{С}.$$

На рис.2.10, 2.11 нанесена опытная кривая T_N нагрева точки N, показана кривая зависимости μ от длительности сварки t и кривая предельных температур в этой точке, соответствующих значениям μ в любой момент процесса сварки. Пересечение кривых T_N и $T_{пр}$ определяет предельную температуру точки N ($T_{пр}=1300^0$), момент перехода процесса теплонасыщения в предельное состояние ($t=2$ сек) и значение μ , при котором наступает предельное состояния $\mu=(1,45-1,46)$.

В момент времени $t=1,5$ сек μ достигает критического значения $\mu_{кр}=1,57$ и затем до конца процесса меняется сравнительно мало (от 1,57 до 1,04). Предельная температура $T_{пр}$, рассчитанная по формуле (2.15), падает при этом от ∞ до 200^0 . Небольшому уменьшению μ соответствует резкое падение $T_{пр}$, поэтому наиболее благоприятным для получения необходимой температуры в сварочном контакте ($T_{пр}>T_{пл}$) является такой режим нагрева, когда μ более длительное время остается выше $\mu_{кр}$ и, если достигает значения $\mu_{кр}$, то в дальнейшем убывает очень незначительно, оставаясь больше значения μ , которому соответствует предельная температура плавления $T_{пл}=T_{пр}$.

При больших μ необходимая температура в контакте может быть достигнута быстрее, чем в случае нагрева при малых μ . Предельное состояние наступает при $\mu=1,45-1,46$.

При сварке на мягком режиме (рис.2.12, 2.13) площадь сварной точки при $t=2$ сек (25% общей длительности сварки) составляет 12 мм^2 , в то время как при сварке на жестком режиме $t=2$ сек составляет около 50% общей длительности сварки, а предельное состояние наступает в тот момент, когда площадь сварной точки достигала 180 мм^2 .

Таким образом, чем выше ток, тем относительно позже наступает предельное состояние, тем меньше длительность сварки и меньше возможность перегрева околосварочной области.

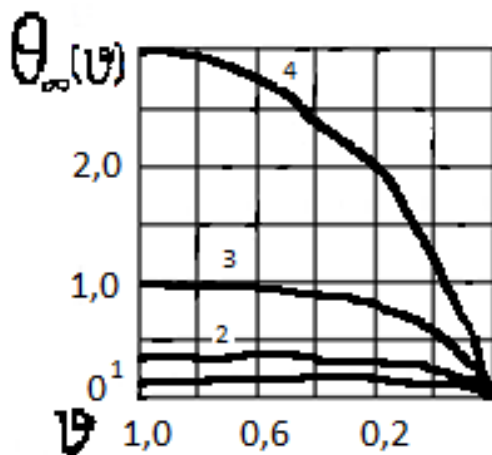


Рис.2.6 Зависимость предельной температуры $\theta_\infty(\vartheta)$ от пространственной координаты ϑ при различных значениях μ : $1 - \frac{\pi}{6}$; $2 - \frac{\pi}{4}$; $3 - \frac{\pi}{3}$; $4 - \frac{5}{12}\pi$.

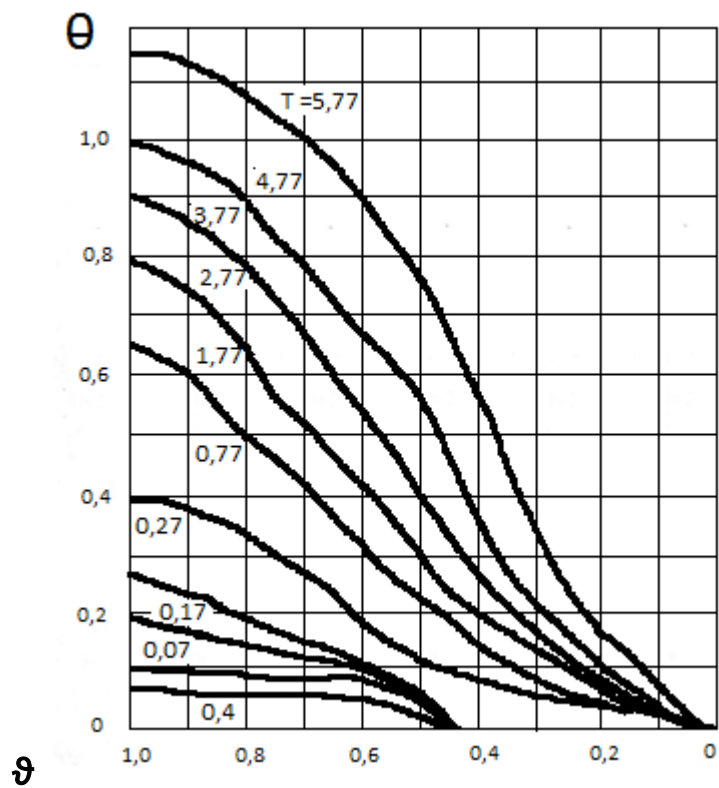


Рис. 2.7 Температурные кривые $\theta(\vartheta)$, полученные в результате расчета методом конечных разностей стержней с возрастающим сопротивлением ($r^2 = 2$; условие на границе $3\theta_n = 4\theta_{n-1} - \theta_{n-2}$ n - номер слоя).

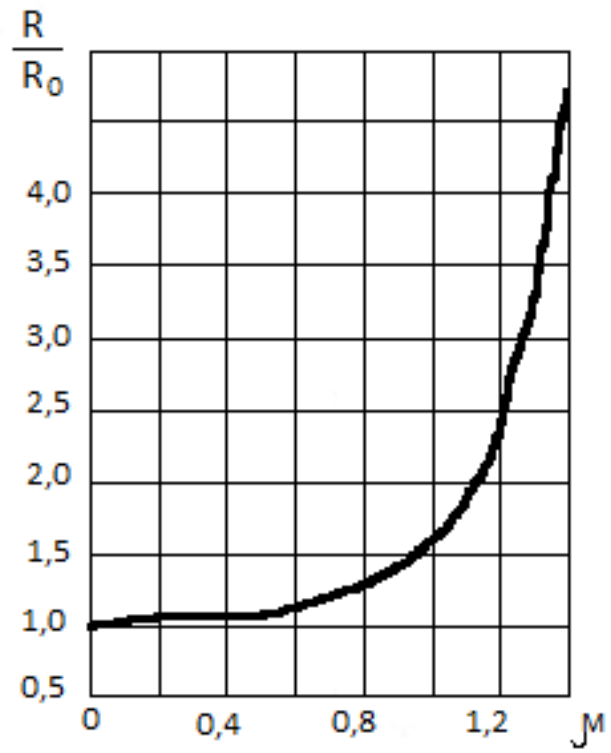


Рис. 2.8 Увеличение сопротивления $\frac{R}{R_0}$ околоконтактной области за время нагрева до предельной температуры при различных значениях μ .

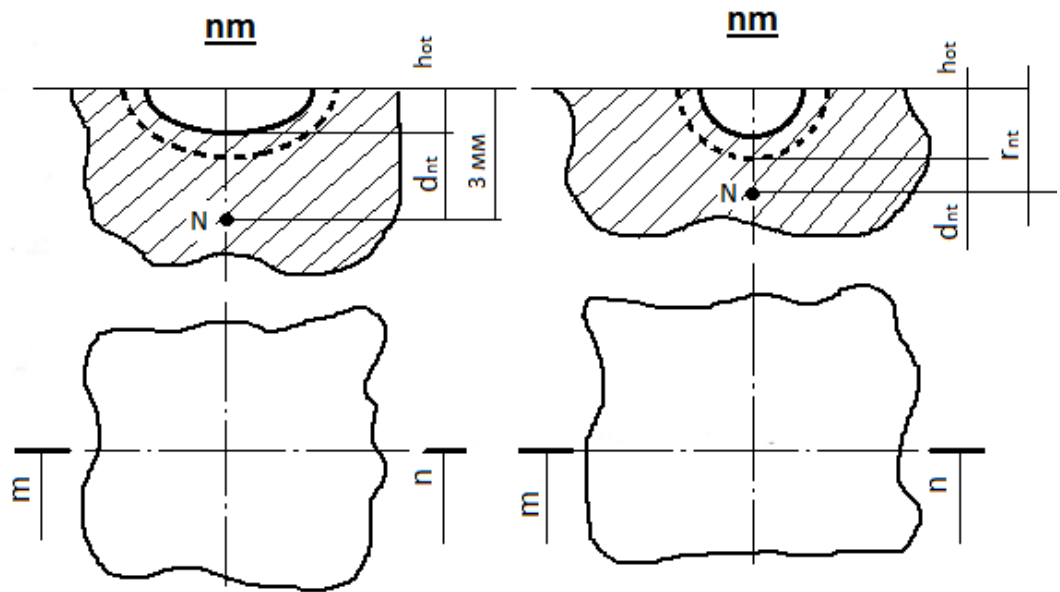


Рис. 2.9 К расчету предельной температуры околосварочной области.
 а - контактная площадка в опыте; б - контактная площадка в расчетной схеме.

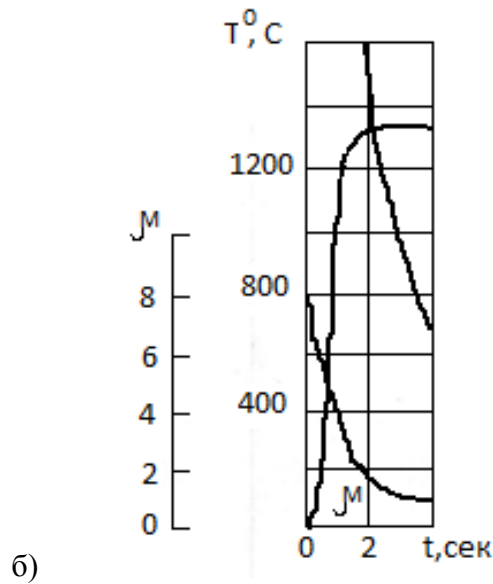
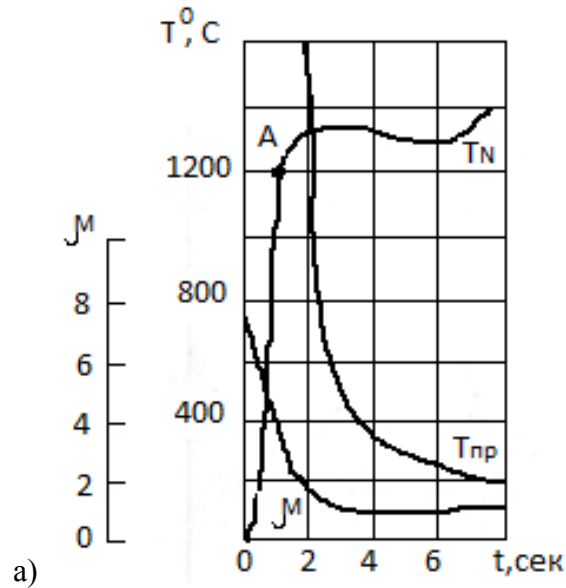


Рис.2.10 Опытная кривая T_N нагрева точки N, которой соответствует параметр μ , в зависимости от длительности сварки t , предельная температура $T_{пр} = \frac{1}{\beta} \left[\frac{\cos\mu(1-\vartheta)}{\cos\mu} - 1 \right]$ соответствующий значениям μ в любой момент процесс сварки для двух режимов:

а-мягкого; б-жесткого.

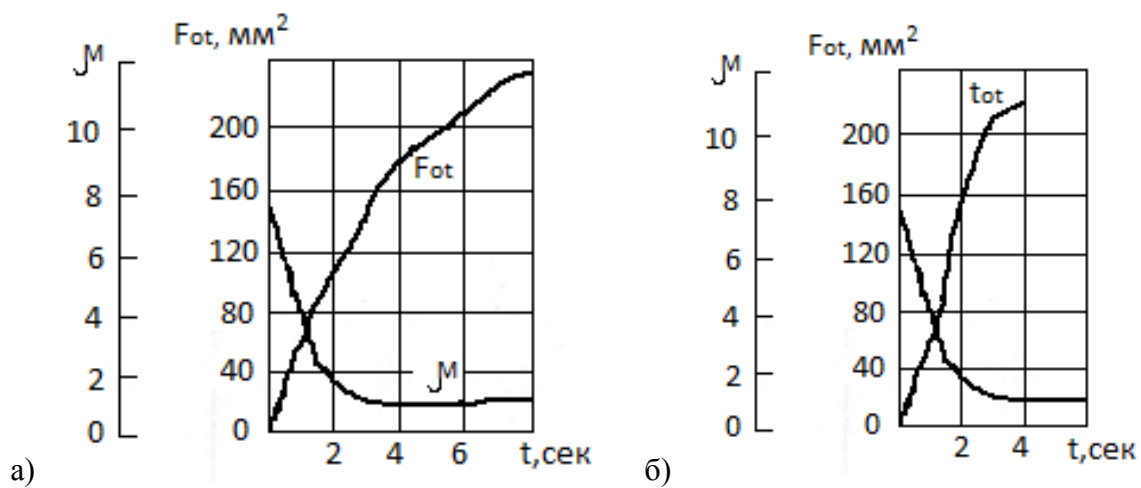


Рис.2.11 Параметр μ , характеризующий интенсивность источников теплоты и площадь F_{ot} контактной полусферы в зависимости от длительности сварки t , для режимов: а-мягкого; б-жесткого.

Таблица 2.2. Результаты вычисления параметра μ и координаты расстояния ϑ_{Nt} точки N в различные моменты времени

Время, t, сек	Ток, I ₂ , А	Осадка, t _{от} , см	Площадь проекции сварочного контакта, F _{от} , см ²	Площадь контактной полусферы $2Gr_{ot} = F_{ot}$		μ $= \frac{I_2}{2\pi r_{ot}} \sqrt{0,24 \frac{\beta \rho_0}{\lambda}}$ $= 3,95 \cdot 10^{-6}$		Точка N малого стержня на расстоянии 0,3 см от первоначального контакта		
				ϑ r _{от} , см	F _{от} , см	$\frac{I_2}{2\pi r_{ot}}$	μ	$\alpha_{Nt} = 0,3 - h_{ot}$, см	r _{Nt} = $\alpha_{Nt} + r_{ot}$, см	$\vartheta_{Nt} = \frac{r_{ot}}{r_{Nt}}$
0	9500	0,007	0,046	0,0075	0,086	18000	1	0,293	0,380	0,229
1	10000	0,062	0,780	0,124	0,346	4600	1,82	0,238	0,584	0,594
2	10000	0,085	1,180	0,180	0,434	3680	1,45	0,217	0,649	0,670
3	10000	0,112	1,500	0,240	0,490	3260	1,29	0,188	0,678	0,724
4	10000	0,132	1,640	0,262	0,512	3100	1,22	0,168	0,680	0,754
5	10000	0,154	1,820	0,290	0,539	2960	1,17	0,146	0,685	0,800
6	10000	0,182	1,980	0,316	0,563	2840	1,12	0,118	0,681	0,825
7	10300	0,207	2,120	0,338	0,580	2770	1,09	0,093	0,673	0,863

8	10400	0,237	2,280	0,364	0,604	2750	1,08	0,063	0,667	0,905
0	11300	0,007	0,046	0,0075	0,086	21000	8,30	0,293	0,380	0,229
1	12500	0,097	1,340	0,213	0,461	4320	1,71	0,203	0,664	0,694
2	12500	0,155	1,820	0,290	0,539	3700	1,46	0,145	0,684	0,778
3	12700	0,190	0,020	0,323	0,569	3550	1,40	0,110	0,679	0,839
4	12900	0,219	2,200	0,350	0,592	3470	1,37	0,081	0,637	0,880

Выводы по II разделу:

1. Наибольшие скорости нагрева имеют место в начальной стадии процесса. При сварке на мягком и жестком режимах зона околоконтактной области нагревается до температуры плавления в течение 1,5-2 сек. В последующую стадию нагрева и с увеличением контактной площади между соединяемыми стержнями процесс нагрева в околоконтактной области стремится к предельному состоянию.

2. Температура точек околоконтактной области со стороны стержня малого радиуса на 100-150⁰С выше, чем со стороны стержня большого радиуса.

3. Уровень площади предельных температур в зоне сварочного контакта можно регулировать различным сочетанием усилия на электродах и электрическим параметром процесса, но не длительности сварки.

4. Значения максимальных температур точек удаленных от сварочного контакта при данном сочетании усилия на электродах и электрических параметров режима сварки регулируются длительностью протекания тока.

5. Чем выше ток при сварке, тем относительно позже наступает предельное состояние, тем меньше длительность сварки и меньше возможность перегрева околоконтактной области. То есть, желательна сварка стержней на жестком режиме.

3. ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

3.1 Предпосылки к расчету тока при контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней

При контактной сварке арматуры железобетона, свариваемые стержни сжимаются между электродами контактной машины так, что центры контактных площадок располагаются на концах одного диаметра стержня (рис.3.1).

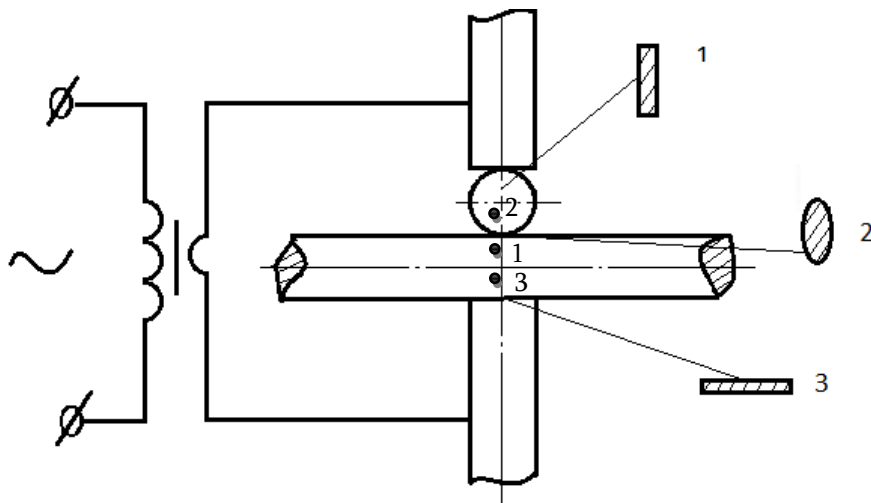


Рис.3.1 Схема контактной сварки перекрещивающихся стержней и очертания контурных площадок: 1, 3 - между электродом и стержнем; 2 - между стержнями.

Схематизируя процесс контактной электросварки перекрещивающихся стержней, можно представить его как совокупность одновременно протекающих и непрерывно взаимодействующих процессов [59-63], основными из которых являются: а) пластическая деформация металла в зоне сварки стержней (осадка); б) распределение тока в стержнях; в) распределение источников теплоты; г) распределение температуры.

Эти процессы хорошо известны для контактной сварки перекрещивающихся стальных стержней большого диаметра (более 16 мм).

В связи с расширением области применения железобетонных конструкций в народном хозяйстве большое внимание в течение последних лет уделяется разработке рациональной технологии контактной сварки арматуры железобетона диаметром около 10мм, особенно контактной сварки металлической сетки из перекрещивающихся круглых стержней как с одинаковыми, так с и разными диаметрами.

Рассмотрим процесс электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней диаметрами 10+5 мм.

Размеры и очертания контактных площадок зависят от формы и размеров свариваемых стержней и токоподводящих электродов, а также от приложенного к электродам сжимающего усилия [64-67]. Очертание рабочей контактной площадки между перекрещивающимися круглыми стержнями одинакового диаметра практически близко к окружности. По мере увеличения диаметра одного из перекрещивающихся стержней, рабочая контактная площадка вытягивается вдоль образующей малого стержня и по окружности большого стержня. Токопроводящая контактная площадка между медным электродом с плоской поверхностью и круглым стальным стержнем [68,69] располагается по полосе вдоль образующей стержня (рис.3.1).

Ток промышленной частоты, нагревающий стержень, распределенный по объему стержня между контактными площадками - токопроводящей и рабочей, т.е. направленный параллельно диаметру стержня, в дальнейшем будем называть такой ток поперечным (по отношению к оси стержня).

Расчет распределения поперечного тока в круглом стержня будем вести исходя из следующих предпосылок:

1. Круглый проводящий цилиндр радиуса r_0 (см), с осью O_z (рис.3.2) считаем неограниченно длинным, что соответствует практическим условиям сварки стержней арматуры.

2. Проводимость σ ($\text{ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) материала полагаем постоянной во всем объеме цилиндра. Это предположение соответствует холодному стержню, т.е. состоянию в начале процесса нагрева.

3. Поперечный ток J_a считаем постоянным, т.е. влиянием промышленной частоты тока на его распределение пренебрегаем. Это предположение подкрепляется высокими плотностями тока при контактной сварке в центральной зоне стержня между контактами.

4. Ток считаем приложенным к цилиндру через полосовые контактные площадки 1 и 2 на его боковой поверхности, центры которых расположены на оси OY . Размеры контактных площадок 1 и 2 полагаем неодинаковыми, а именно в направлении образующей цилиндра: $2Z_1$ и $2Z_2$, а в направлении окружности - $2\varphi_1r_0$ и $2\varphi_2r_0$. Такое достаточно общее предположение охватывает разнообразные, встречающиеся на практике типы очертаний контактных площадок. В действительности очертания площадок рабочего контакта более или менее округлены; если принять очертание площадок полосовым, то это исказит распределение тока преимущественно у углов прямоугольной площадки и тем более, чем очертание площадки ближе к квадратному.

5. Ток J распределен равномерно по поверхности контактных площадок 1 и 2, поэтому плотности радиального тока выразятся:

$$j_1 = \frac{I}{4Z_1\varphi_1r_0} \quad \text{и} \quad j_2 = \frac{I}{4Z_2\varphi_2r_0} . \quad (3.1)$$

Условия распределения тока или потенциала по площади рабочего или токопроводящего контакта трудно определимы и зависят они от размеров и очертания стержней и электродов. Принятое нами простейшее предположение о постоянстве плотности тока по постоянным площадкам оправдывается еще и тем, что повышенные плотности тока у краев контактной площадки в холодном массивном теле быстро выравниваются вследствие местного перегрева этой зоны током повышенной плотности.

Вне контактных площадок боковую поверхность стрежня считаем изолированной [70-72].

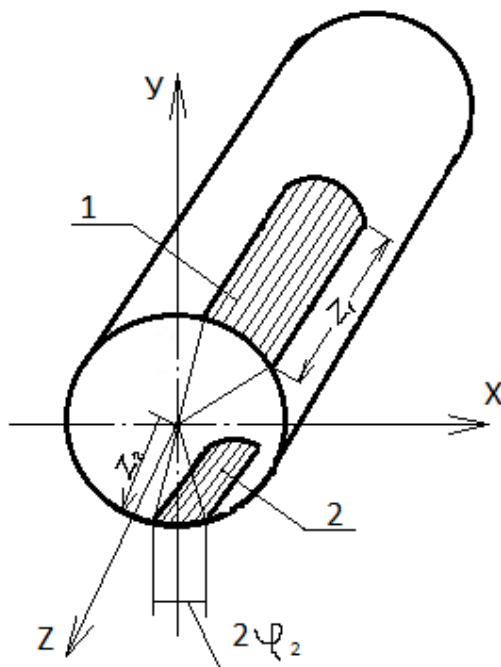


Рис 3.2. Схема контактных площадок в проводящем стержне

3.1.1 Опыты по холодному обмятию круглых стержней

При контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней происходит упруго-пластическая деформация металла в зонах, удаленных от контакта, и пластическая деформация в местах контактов. Наиболее интересной при изучении процесса образования сварной точки является пластическая деформация в сварочном контакте [73-75].

Еще перед сваркой между стержнями в результате их предварительного обмятия возникает площадка холодного контакта. Площадь горизонтальной проекции F поверхности обмятия определяется усилием P , приложенным со стороны электродов, и удельным давлением смятия K .

В начале нагрева контактная площадка между стержнями невелика. Повышенная плотность тока в контакте и большое контактное сопротивление способствуют интенсивному выделению теплоты в месте соприкосновения стержней. Контактное сопротивление резко падает, однако теплота продолжает выделяться преимущественно в зоне контакта за счет работы тока на повышенном сопротивлении подогретого металла. Интенсивность объемных источников теплоты, обусловленных работой тока на собственном сопротивлении металла, возрастает, в то время как интенсивность поверхностного источника теплоты в контакте убывает. С повышением температуры приконтактной области, сопротивление смятию падает, и площадь контакта под действием усилия P увеличивается. По мере осадки стержней и увеличения контактной площадки средняя плотность тока в контакте снижается, а линии тока оттесняются к расширяющимся границам контактной поверхности.

Распределение источников теплоты, их интенсивность и продолжительность действия непосредственно влияют на распределение температуры в стержнях в тот или иной момент процесса сварки [56,57].

Таким образом осадка стержней, распределение тока и температуры неразрывно связаны между собой, непрерывно изменяются в процессе сварки, воздействуя друг на друга.

Задача пластической деформации при контактной сварке перекрещивающихся стержней может быть отнесена к категории задач о вдавливании штампа, которые рассматриваются в теории пластичности. Однако при решении этих задач исследователи ограничивались условием, что жесткий штамп вдавливается в пластическую среду. Задача существенно осложняется, если предположить, что и сам штамп деформируется при выдавливании. Наша задача тем более сложна, что в зоне контакта имеет место нагрев, неравномерный в пространстве и переменный во времени. Теоретического решения этой задачи в настоящее время не существует, поэтому интересующую нас связь отдельных параметров в процессе обмятия стержней устанавливали опытным путем.

При изучении характера распределения источников теплоты необходимо знать размеры контактных площадок, непосредственное определение которых в тот или иной момент процесса сварки весьма затруднительно вследствие выдавливания разогретого металла из зоны сварки. Поэтому мы установили приближенное соотношение между

площадью контакта и величиной осадки (взаимного проникновения) стержней. Осадка же является таким параметром, который удобно изменять в процессе сварки.

Связь между осадкой и площадью контакта изучали предварительно при обмятии холодных стержней.

Круглые стрежни диаметрами 5+10 мм, выточенные из малоуглеродистой стали, сжимали в направлении, перпендикулярном осям стержней, на прессе шопере, используя специальные оправки, в которых стержни накладываются один на другой под углом 90^0 друг к другу. В результате деформации в месте соприкосновения стержней образовалась седлообразная поверхность. Горизонтальная проекция ее близка к кругу, по диаметру которого судили о размерах контактной поверхности. В таблице 3.1 приведены результаты опыта по холодному обмятию стержней. Диаметр проекции контактной поверхности брали как среднее арифметическое измерений в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

Удельное давление K в контакте между стержнями определяли как отношение усилия смятия P к площади проекции контактного отпечатка

$$F = \frac{\pi d^2}{4}.$$

На рис.3.3 нанесена кривая зависимости диаметра d проекции контактного отпечатка от величины осадки h , полученной расчетом по схеме, т.е. между d и h существует следующая зависимость

$$d = 2\sqrt{2hR - h^2},$$

где R - радиус цилиндра.

На этот же график нанесены опытные точки по данным таблицы 3.1. Опытные точки, располагаются вблизи расчетной кривой. Это указывает на то, что между осадкой и размерами контактной площадки имеется определенное соотношение, одинаковое для металлов с различной пластичностью. Соотношение это близко к соотношению геометрических элементов пересекающихся кривых цилиндров.

Таблица 3.1. Результаты опытов по холодному обмятию перекрещивающихся стержней диаметрами 16+16 мм.

Материал образца	Усилие обмятия Р, дан	Диаметр проекции контактного отпечатка между стержнями d, мм	Удельное давление смятия в контакте К, дан/мм ²	Осадка между стержнями h, мм
Сталь НВ146,6	1100	3,8	97,0	0,30
	2100	5,4	92,0	0,50
	3120	6,5	95,0	0,60
	4150	7,7	94,0	0,80

На рис.3.3 представлена зависимость площади проекции контактной поверхности от усилия, сжимающего стержни. Удельное давление К в контакте, которое представляет отношение усилия Р к площади проекции контактной поверхности, постоянно, а для данного сочетания диаметров имеет вполне определенное значение. Для диаметров 16+16мм удельное давление, как видно из таблицы 3.1, составляет около 0,6 числа твердости по Бринеллю для данного материала:

$$K \approx 0,6HB;$$

Опыты по холодному обмятию проводили также на стержнях из малоуглеродистой стали (Ст.3) диаметрами 16+30 мм и 5+10 мм. Горизонтальная проекция седлообразного отпечатка в контакте приближается по форме к эллипсу с полуосями а и в. В таблице 3.2 и таблице 3.3 приведены размеры а и в проекции контактного отпечатка и осадка h, полученные при сдавливании стержня с различным усилием Р. Площадь F проекции контактной поверхности вычислена как площадь эллипса с полуосями а и в

$$F = \pi \cdot a \cdot b,$$

а удельное давление

$$K = \frac{P}{F}.$$

Таблица 3.2 Результаты опытов по холодному обмятию перекрещивающихся стержней с неодинаковыми диаметрами 16+30 мм.

Материал	Усилие	Осадка стержня h, мм	Площадь проекции	Удельное
----------	--------	----------------------	------------------	----------

образца	обмятия Р, дан		контакта F, мм ²	давление К, дан/мм ²
Сталь НВ146,6	1010	0,20	12,4	81
	2700	0,43	34,7	78
	3700	0,59	48,0	77
	4900	0,74	61,7	79
	6600	1,25	87,0	76
	7700	1,75	100,0	77
	10000	2,15	129,5	77

Таблица 3.3 Результаты опытов по холодному обмятию стержней с малыми диаметрами
5+10 мм.

Материал стержней	Усилие обмятия Р, дан	Осадка стержней h, мм	Площадь проекции контакта F, мм ²	Удельное давление К, дан/мм ²
Сталь НВ146,6	200	0,20	6,01	128
	400	0,27	10,07	126
	800	0,40	12,18	127
	1000	0,80	14,17	128
	1200	1,00	18,07	128

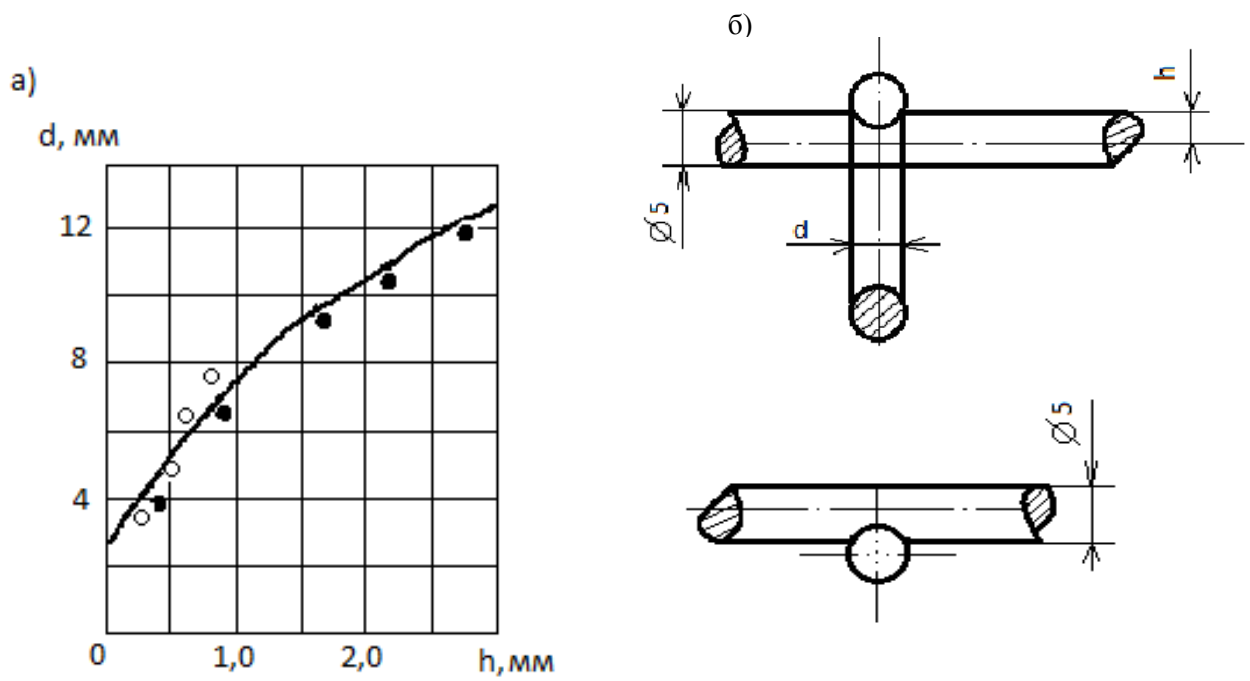


Рис 3.3 Диаметр d проекции контактного отпечатка в зависимости от величины осадки h при холодном обмятии стержней диаметрами 5+5мм (а) и образцы после холодного обмятия (б).

Площадь контактной поверхности между стержнями при заданной осадке может быть с достаточной точностью подсчитана по соотношению геометрических элементов пересекающихся круглых цилиндров того же диаметра (рис.3.4).

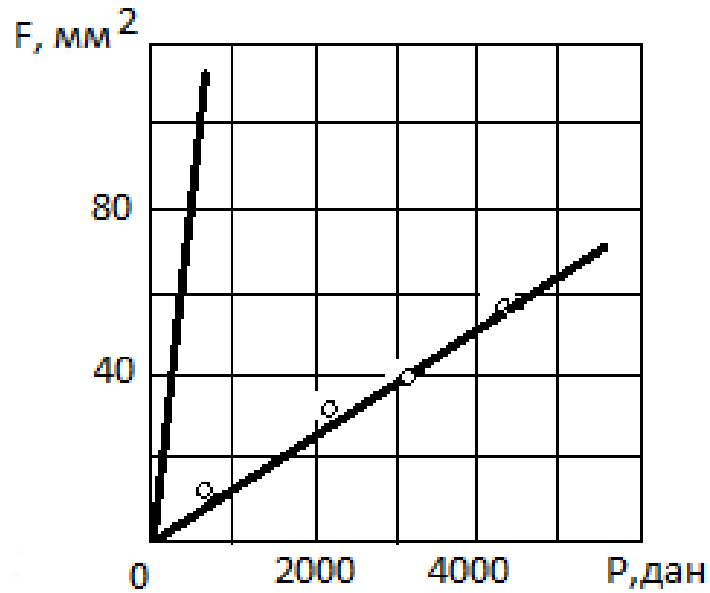


Рис.3.4. Площадь F проекции контактного отпечатка в зависимости от усилия P , сжимающего перекрещивающиеся стержни диаметрами 5+5 мм при холодном обмятии.

Установленная зависимость между осадкой и размерами контактной поверхности не распространяется, однако, на деформацию стержней при сварке, когда пластические свойства, вследствие неравномерного разогрева металла резко меняются в направлении действия сжимающего усилия.

Условия пластического деформирования стержней при сварке отличаются от условий деформирования однородных стержней с одинаковыми по всему объему свойствами. Большое удельное давление в начале сварки вызывает резкое возрастание площади контакта за счет деформации малого объема разогретого металла. Свободному возрастанию осадки при этом препятствует более холодный металл, окружающий разогретую зону. Это отражается на соотношении между осадкой и площадью контакта.

Площадь контакта с увеличением осадки возрастает в этом случае более интенсивно, чем при обмятии холодных стержней.

3.1.2 Связь между осадкой и площадью проекции контактной поверхности при сварке

На машине контактной точечной сварки МТ-75 током $I_2 = 2100 \text{ A}$ сваривали четыре партии образцов из малоуглеродистой стали (Ст.3) диаметрами 5+10 мм в течение 2сек (I партия), 4 сек (II партия), 6 сек (III партия), 8 сек (IV партия). Усилие на электродах машины выдерживалось в процессе сварки постоянным и составляло примерно 300 дан. Сварные образцы разрушали по месту сварки. По измеренным полуосям a и b определяли площадь $F_{\text{св}}$ эллипса, являющейся горизонтальной проекцией контактной поверхности

$$F_{\text{св}} = \pi \cdot a \cdot b.$$

На рис.3.5 представлена зависимость размеров контактной поверхности от длительности нагрева t .

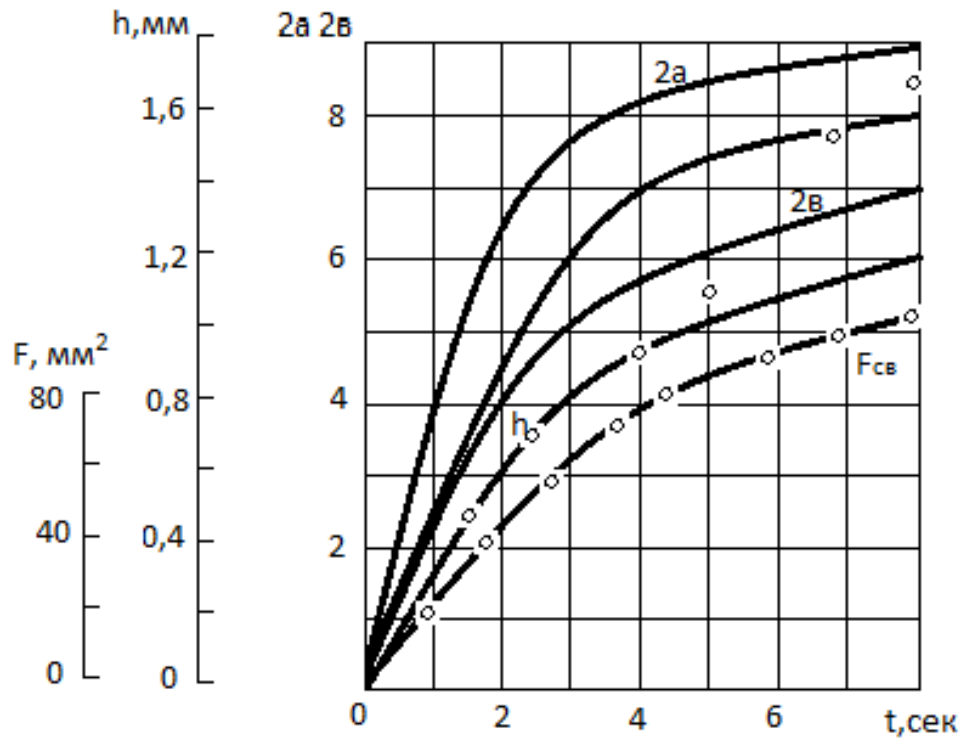


Рис.3.5 Размеры сварочного контакта в зависимости от длительного нагрева при сварке стержней $\varnothing 5 \div 10$ мм, током $I_2 = 2100$ А при усилии сжатия $P=300$ дан.

Другую партию образцов сварили тем же током в течении 8 сек и контролировали изменение осадки. График изменения осадки h во времени t также представлен на рис.3.5. Из сопоставления кривых $F_{св}(t)$ и $h(t)$ получена зависимость площади проекций контакта от осадки $F_{св}(h)$, представленная на рис.3.6. На этом же рисунке показана зависимость $F_x(t)$ площади проекции холодного контакта от осадки, полученная из опытов по холодному обмятию стержня того же диаметра и совпадающая с расчетной зависимостью для геометрических тел.

Из сопоставления $F_{св}(h)$ и $F_x(h)$ следует, что $F_{св}(h) \approx 1,8F_x(h)$.

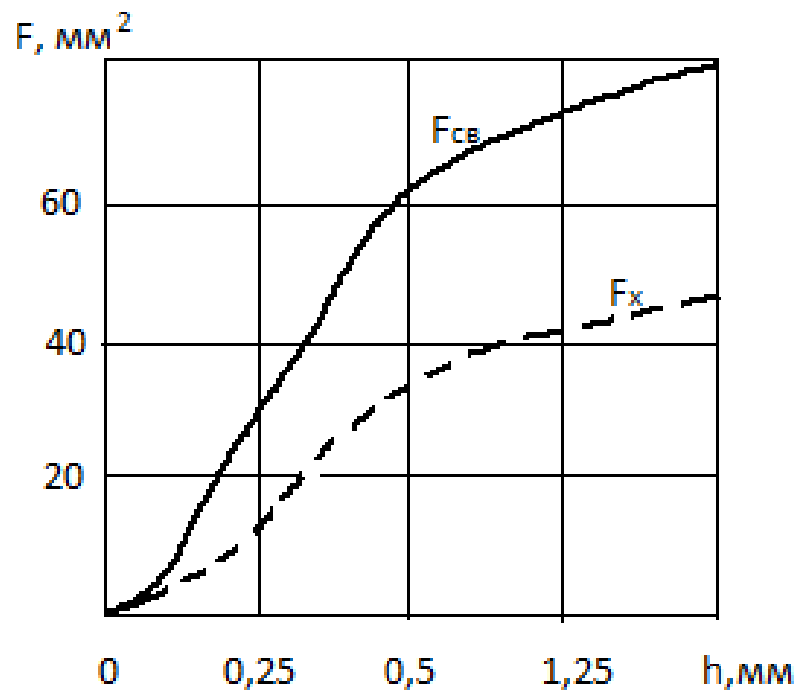


Рис.3.6. Площадь проекции контакта между стержнями в зависимости от осадки при сварке $F_{св}(h)$ и при холодном обжатии стержней $F_x(h)$.

3.2. Осадка стержней при сварке

Характер процесса осадки при сварке на двух типовых режимах

А) $I_2 = 2100$ А; $t_{св} = 8$ сек; (мягкий режим);

Б) $I_2 = 2500$ А; $t_{св} = 3,5$ сек; (жесткий режим),

изучали на образцах малоуглеродистой стали (Ст.3) диаметрами 5+10 мм. Образцы сваривали машине МТ-75 с длительным обжатием между электродами машины после выключения тока. Усилие на электродах машины составляло 300 дан.

На рис.3.7 представлен график изменения осадки и среднее значение по каждой группе опытов. Менее интенсивный рост осадки наблюдается при сварке на мягком режиме (А). За 8 сек процесса сварки осадка возрастает до 1,5 мм. В образцах, сваренных на режиме Б, примерно того же значения осадка достигает за 3,5 сек.

Таким образом, средняя за время сварки скорость осадки составляет при сварке на мягком режиме А - 0,25 мм/сек, а при сварке на жестком режиме Б - 0,57 мм/сек.

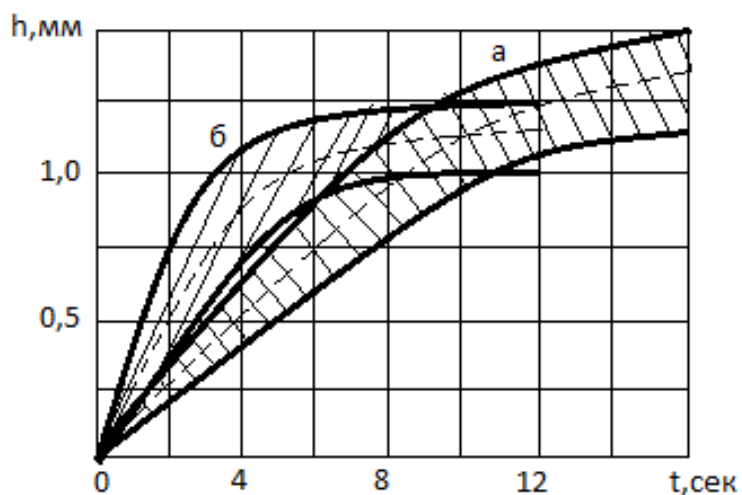


Рис 3.7. Изменение осадки стержней в процессе сварки:

а - режим А, б - режим Б;

- - - - среднее значения осадки.

После выключения тока под действием усилия Р осадка продолжает нарастать, причем более продолжительный, хотя и менее интенсивный рост осадки наблюдается в стержнях, сваренных на более мягком режиме. В образцах, сваренных на жестком режиме, темп нарастания осадки значительно снижается уже через 1-1,5 сек после выключения тока, а через 5-6 сек пластическая деформация в зоне сварочного контакта практически

прекращается. Видимо при сварке на мягком режиме в зоне сварки количество расплавленного металла больше, соответственно больше объем выдавленного металла. Это подтверждается при внешнем осмотре сварных соединений.

Таким образом, при сварке на мягком режиме часть электроэнергии, затраченной на нагрев зоны сварки, расходуется не для образования сварного соединения. Поэтому с целью экономии электроэнергии целесообразно электроконтактную сварку перекрещивающихся стержней осуществлять на жестком режиме.

В другой серии опытов, кроме осадки, измеряли и записывали сварочный ток и температуру в отдельных точках сваренного образца в процессе сварки.

По данным средней осадки, в этих опытах получена площадь проекции сварочного контакта $F_{св}$. Средняя осадка h и средняя площадь $F_{св}$ нанесены на графики (рис.3.8), из которых видно, что в конце процесса сварки, в момент выключения тока, площадь сварной точки составляет максимум значения. Удельное давление в месте соприкосновения стержней в этот момент составляет 1,5-1,6 дан/мм². В дальнейшем удельное давление еще несколько падает за счет увеличения размеров площади соприкосновения стержней, а предел текучести околоконтактной зоны, по мере охлаждения и выравнивания температуры, понижается, т.е. условия для дальнейшего развития осадки становятся все менее благоприятным.

На рис.3.7 нанесены также среднее значения тока I_2 и средняя плотность тока $j_{ср}$ в контакте для любого момента времени, полученная делением тока I_2 на площадь проекции контакта F_x , соответствующую данному моменту процесса сварки. Особенно резкое изменение плотности тока происходит в начале процесса, в течение первой секунды. Несмотря на некоторые увеличения тока в первую секунду процесса, при сварке на мягком режиме плотность тока в сварочном контакте падает почти в 10 раз (рис.3.9). Затем плотность тока изменяется медленнее, достигая к концу процесса сварки 55 А/мм². Еще более резко падает плотность тока в начальной стадии процесса при сварке на жестком режиме. За первую секунду процесса сварки плотность тока в сварочном контакте падает почти в 20 раз.

В соответствии с плотностью тока изменяются и перераспределяются источники теплоты. Наиболее резко источники теплоты перераспределяются в начале процесса. На рис.3.10 показано изменение удельного давления в сварочном контакте в зависимости от продолжительности сварки, а на рис.3.11 приведена зависимость скорости осадки dh/dt от

удельного давления в контакте K . При сварке на более мягком режиме наибольшая скорость осадки $0,6$ мм/сек наблюдается в начале процесса при максимальном удельном давлении в контакте около 70 дан/мм². Через $1-1,5$ сек после начала процесса давление снижается до 5 дан/мм² и осадка с этого момента возрастает до конца процесса сварки почти с постоянной скоростью $0,2$ мм/сек. К моменту выключения тока давление в контакте составляет $1,5$ дан/мм². Скорость осадки после выключения тока резко падает и при $K=1,4$ дан/мм² осадка практически прекращается ($\frac{dh}{dt} = 0$).

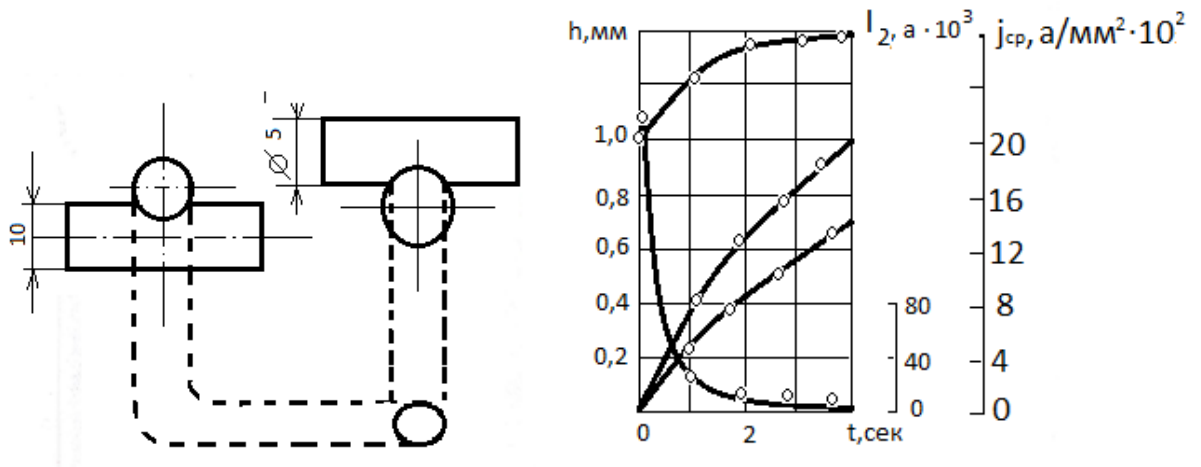


Рис.3.8. Изменение тока I_2 , осадки h между стержнями, площади сварочного контакта $F_{св}$ и средней плотности тока j_{cp} в контакте в процессе сварки при $P=300$ дан стержней диаметрами $5+10$ мм на жестком режиме.

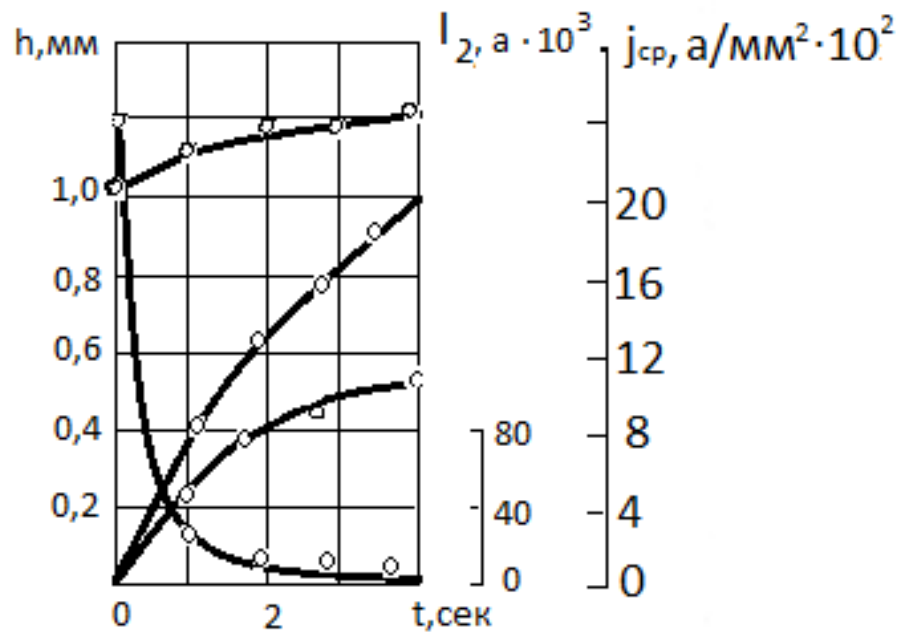


Рис.3.9. Изменение тока I_2 , осадки h между стержнями, площади сварочного контакта F_{CB} и средней плотности тока j_{cp} в контакте в процессе сварки при $P=300$ дан стержней диаметрами 5+10 мм на мягком режиме.

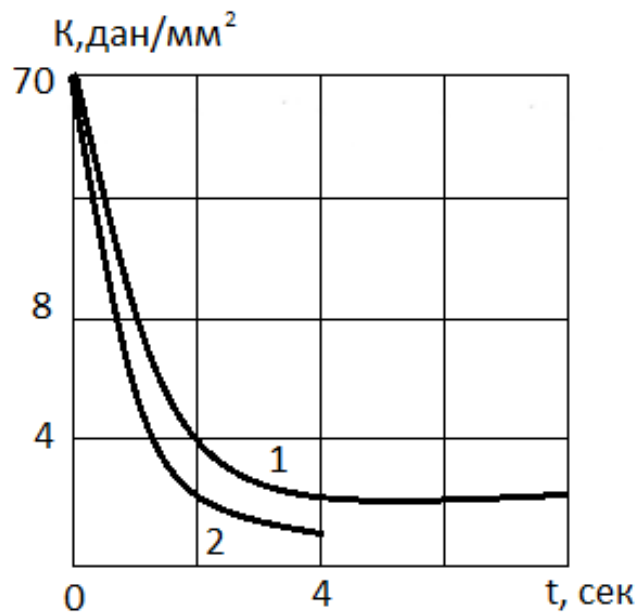


Рис.3.10. Изменение удельного давления K в сварочном контакте в зависимости от времени сварки t : 1 - мягкий режим; 2 - жесткий режим.

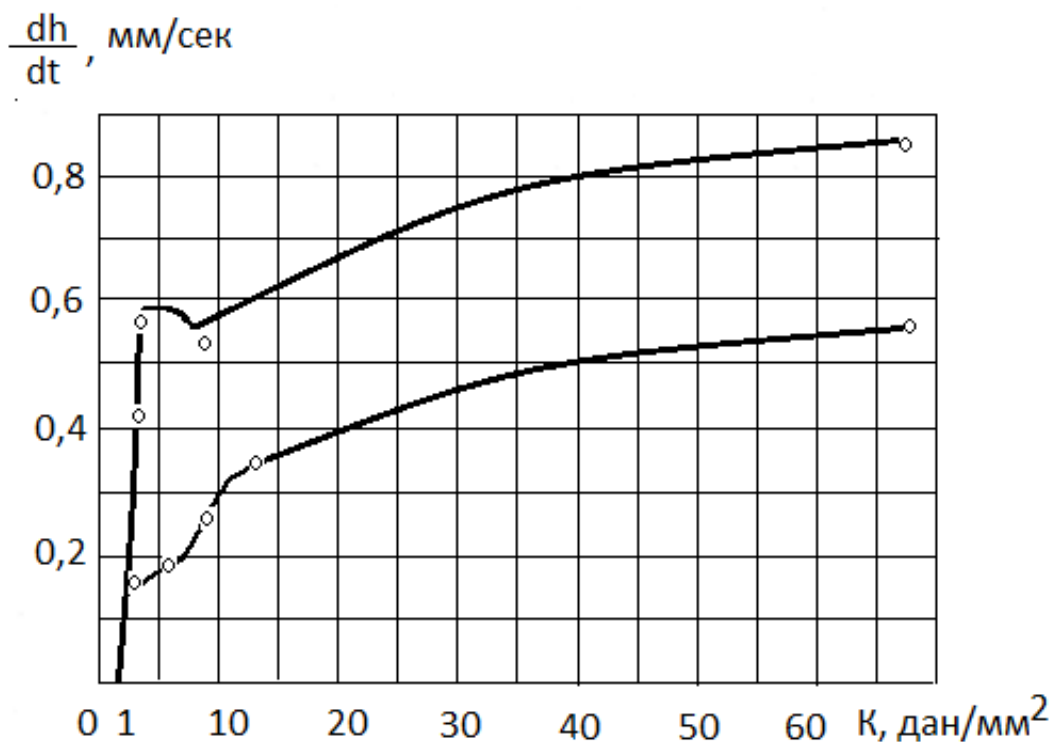


Рис.3.11. Скорость осадки dh/dt стержней в зависимости от удельного давления K в контакте: — - скорость осадки с током; - - - - скорость осадки без тока; нижняя кривая – мягкий режим; верхняя кривая – жесткий режим.

При сварке на жестком режиме скорость осадки наибольшая в начале процесса, падает в течении всего процесса сварки. При давлении в сварочном контакте около $2,5 \text{ дан/мм}^2$, еще до выключения тока происходит резкое снижение скорости осадки от 0,5 до 0,3 мм/сек. Удельное давление в сварочном контакте в момент выключения тока

составляет около $1,5 \text{ дан/мм}^2$. После выключения тока осадка продолжается в течение 5-6 сек, однако скорость осадки настолько мала, что давление в контакте практически уже не снижается. Для дальнейшего роста осадки необходимы усилия, большие, чем для осадки образцов, сваренных на более мягком режиме [76-78].

3.3 Тепловая эффективность процесса электроконтактной сварки перекрещивающихся стержней арматуры железобетона

Если считать, что эффективная мощность источников теплоты при электроконтактной сварке не изменяется за время нагрева, то ее можно определить по теплосодержанию свариваемого образца к моменту выключения тока

$$q_{\text{ср}} = \frac{\theta_{\text{обр}}}{t_{\text{св}}},$$

теплосодержание образца

$$\theta_{\text{обр}} = \eta 0,24 U_{\text{н}} I_2 t_{\text{св}} \cos \varphi_{\text{н}},$$

где $U_{\text{н}}$ - напряжение на сварочном участке вторичной цепи сварочного трансформатора;

I_2 - сварочный ток;

η - эффективный к.п.д. процесса нагрева;

$\varphi_{\text{н}}$ - угол сдвига фаз между током и напряжением на сварочном участке вторичной цепи.

Эффективный к.п.д. процесса нагрева η можно определить опытным путем, измеряя теплосодержание образца $\theta_{\text{обр}}$ в водяном калориметре и сравнивая его с общим количеством теплоты $0,24 U_{\text{н}} I_2 t_{\text{св}} \cos \varphi_{\text{н}}$, вычисленным по электрическим параметрам режима сварки:

$$\eta = \frac{\theta_{\text{обр}}}{0,24 U_{\text{н}} I_2 t_{\text{св}} \cos \varphi_{\text{н}}}.$$

По данным автора [65] калориметрическими опытами определяли теплосодержание образцов $\theta_{\text{обр}}$ и электродов $\theta_{\text{эл}}$ в зависимости от длительности сварки при двух значениях

тока: при токе $I_{2cp} = 10600 \text{ A}$ продолжительность сварки изменялась в пределах от 2 до 8 сек; при токе $I_{2cp} = 12900 \text{ A}$ продолжительность сварки изменялась в пределах от 1 до 4 сек, через 1 сек. Эксперименты были проведены на образцах из стержней диаметрами 30+16 мм.

В экспериментах электроды в процессе сварки водой не охлаждались, таким образом вся теплота, отводимая в нормальных условиях сварки охлаждающей водой, в данном случае поглощалась электродами и переносилась в калориметр. В процессе сварки измеряли сварочный ток I_2 , падение напряжения между рабочими поверхностями электродов U_n и падение напряжения U'_n на участке вторичного контура, включающем образцы и электроды.

В результате анализа экспериментальных данных были построены рис. 3.12, 3.13, 3.14, 3.15.

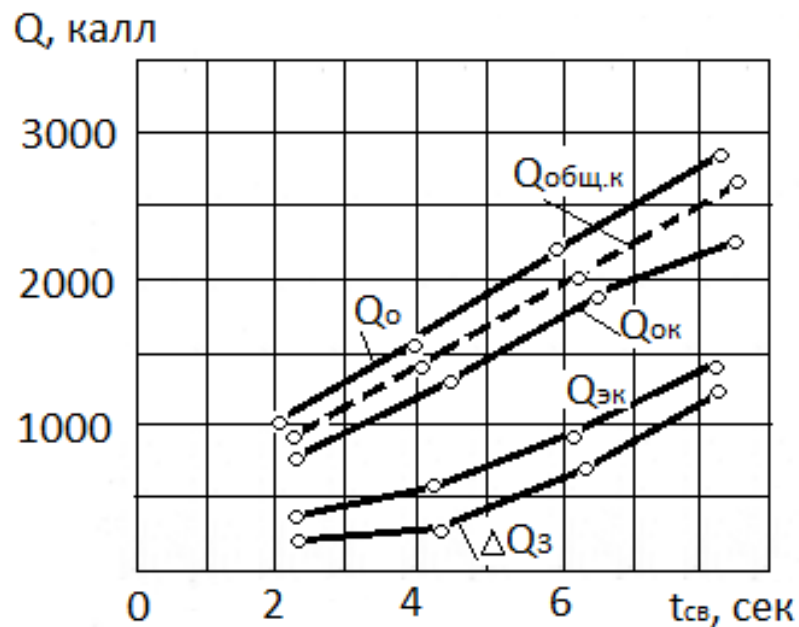


Рис. 3.12. Зависимость теплосодержания образцов и электродов от длительности нагрева током при $I_2=10600\text{A}$, $U_H = 1,57\text{ В}$, $P=300\text{ дан}$. $Q_{\text{ок}}$ - теплосодержание образца; $Q_{\text{ЭК}}$ - теплосодержание электродов (мягкий режим сварки).

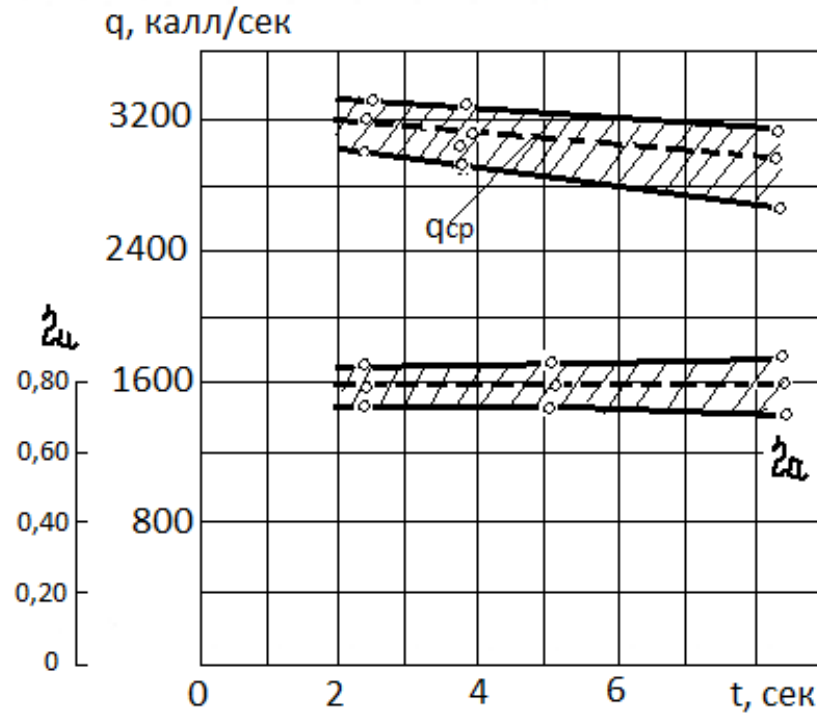


Рис. 3.13. Зависимость средней тепловой мощности $q_{\text{ср}}$ и эффективного к.п.д. процесса нагрева η от длительности протекания тока $I_2=10600\text{ А}$, $U_H = 1,57\text{ В}$, $P= 300\text{ дан}$, мягкий режим сварки.

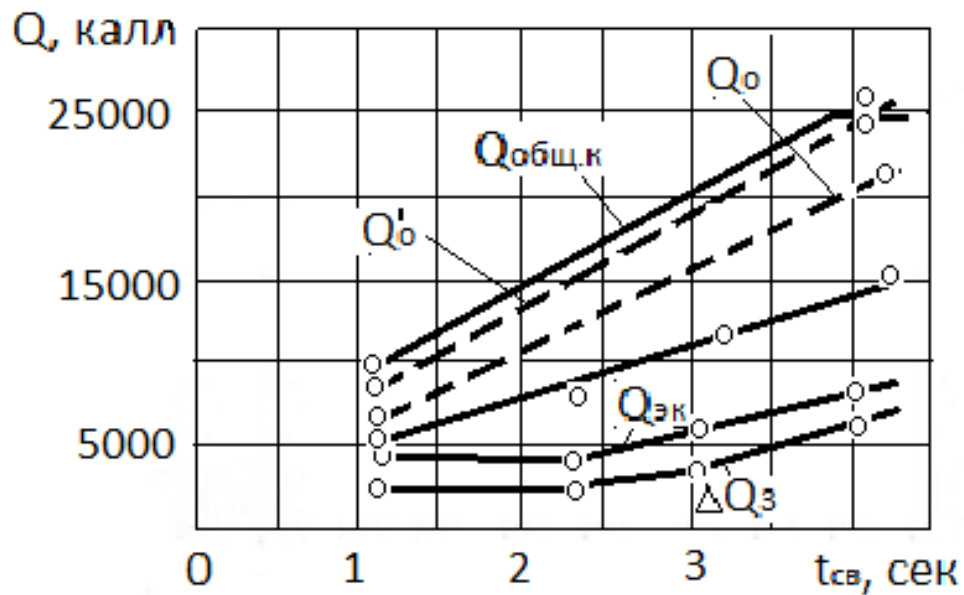


Рис. 3.14. Зависимость теплосодержания образцов и электродов от длительности нагрева током при $I_2=12900$ А, $U_H=1,788$ В, $P=300$ дан, жесткий режим сварки.

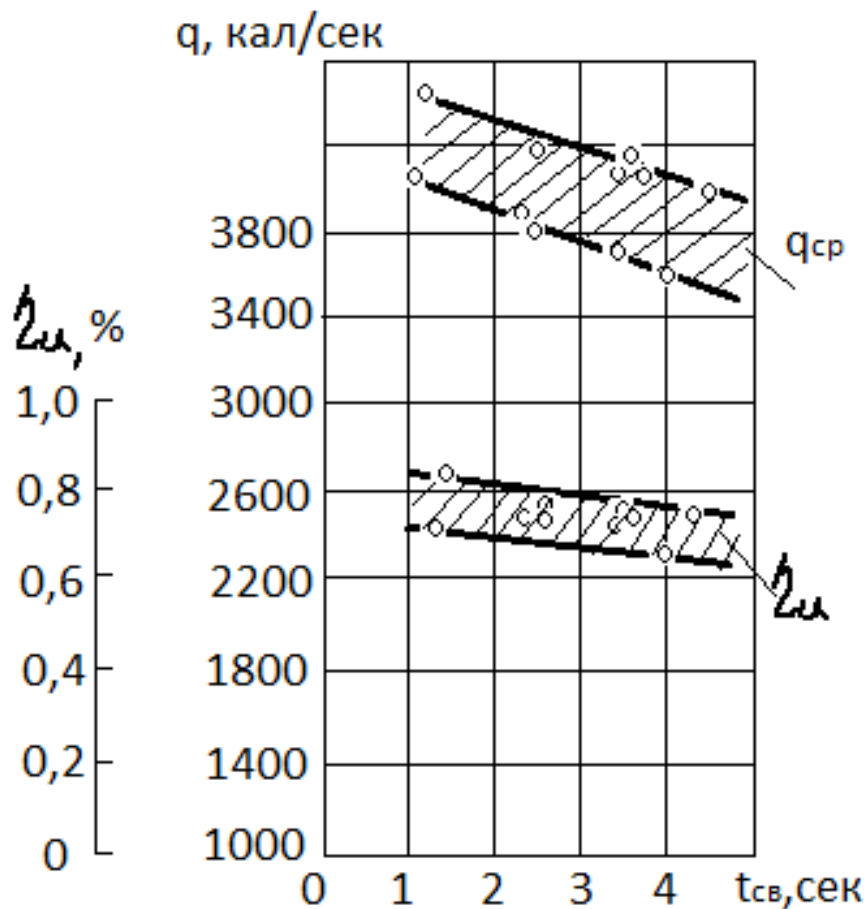


Рис. 3.15. Зависимость средней тепловой мощности $q_{ср}$ и эффективного к.п.д. процесса нагрева от длительности протекания тока при $I_2=12900$ А, $U_H =1,788$ В, $P= 300$ дан, жесткий режим сварки.

На рис.3.12 и на рис.3.14 сплошными линиями нанесены теплосодержание, полученное по эксперименту, а пунктирными - теплота, вычисленная по электрическим параметром режима сварки.

Обозначения на рисунках приняты следующие:

$Q_{ок}$ - теплосодержание образца, измеренное в калориметре;

$Q_{эк}$ - теплосодержание электродов, измеренное в калориметре;

$Q_{общ.к} = Q_{ок} + Q_{эк}$ - суммарное теплосодержание образца и двух электродов, полученное по экспериментам;

$Q_0 = 0,24 U_H I_2 t_{св} \cos \varphi_H$ - количество теплоты, выделившейся на сварочном участке вторичного контура, между электродами, подсчитанное по электрическим параметрам процесса сварки;

$Q'_0 = 0,24 U'_H I_2 t_{св} \cos \varphi_H$ - количество теплоты, выделившейся на участке вторичного контура, включающем массивные вставки электродов и сварной образец (см.рис.3.16), подсчитанное на электрическим параметрам процесса сварки;

$\Delta Q_{э} = Q_{э.к} - 0,24 U_H I_2 t_{св} \cos \varphi_H$ - количество теплоты, отведенной электродами от образца в процессе сварки, где $\Delta U_H = U'_H - U$ падение напряжения на электродах (рис.3.16).

Эффективный к.п.д. процесса нагрева $\eta_{и}$ при контактной сварке перекрещивающихся стержней составляет 0,7-0,8 при изменении тока и длительности сварки в исследованных пределах.

Высокое значение эффективного к.п.д. можно объяснить значительно меньшим охлаждающим действием электродов вследствие относительно большой удаленности их от места наибольшего разогрева стержней, а также вследствие того, что соприкосновение

электрода со стержнем осуществляется через поверхность сравнительно наибольшей площади.

Чем больше длительность сварки, тем меньше эффективный к.п.д. процесса нагрева при данном токе. Чем больше ток данной длительности сварки, тем меньше эффективный к.п.д. процесса нагрева. Однако, при данном токе длительность сварки оказывает более заметное влияние на величину к.п.д., чем ток при данной длительности сварки. Средняя эффективная мощность $q_{\text{ср}}$ источников теплоты возрастает по мере увеличения тока, при постоянной длительности сварки. С увеличением длительности сварки эффективная тепловая мощность падает.

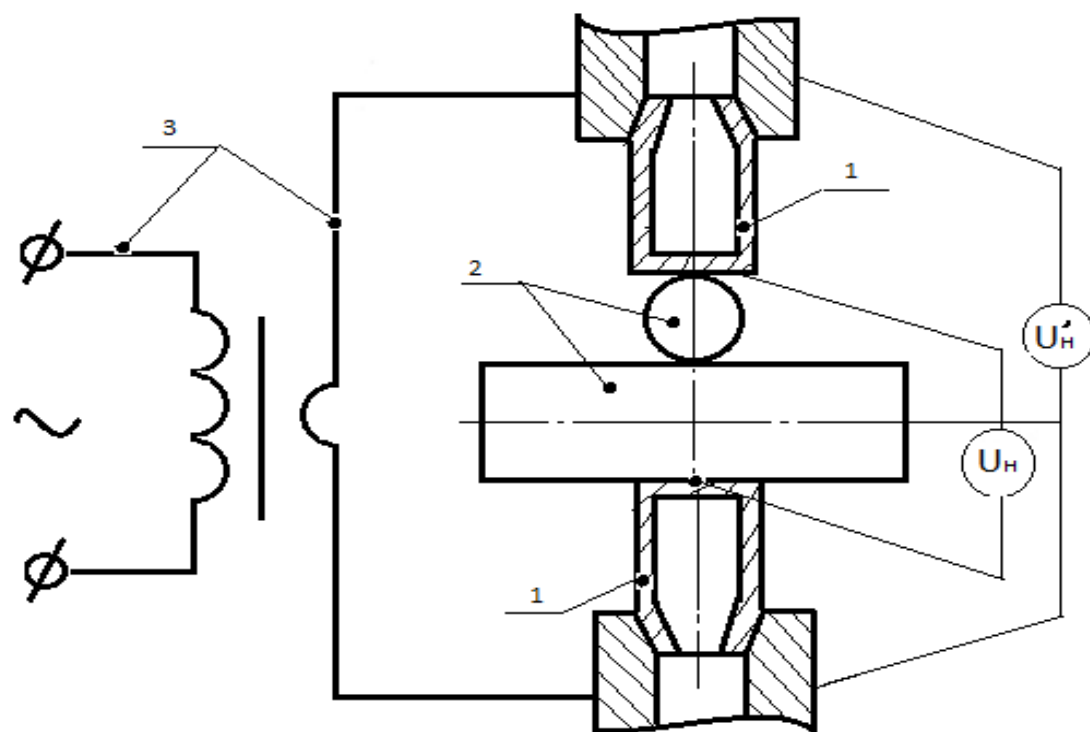


Рис.3.16. Схема измерения падения напряжения:

1-разъемный электрод; 2-сварные образцы; 3-сварочный трансформатор.

Выводы по III разделу

1. В результате анализа исследования доказано, что эффективная к.п.д. $\eta_{и}$ процесса нагрева при контактной сварке перекрещивающихся стержней высокое 0,7-0,8 и чем больше длительность сварки, тем меньше эффективный к.п.д. процесса нагрева.

2. Показано также, что чем больше ток при данной длительности сварки, тем меньше эффективный к.п.д. процесса нагрева при сварке.
3. Соотношение между осадкой и размерами холодного контакта перекрещивающихся стержней близко к отношению размеров геометрических элементов круговых цилиндров того же диаметра.
4. Площадь проекции сварочного контакта перекрещивающихся стержней примерно в 1,8 раза больше площади проекции холодного контакта при одном и том же значении осадки.
5. Осадка непрерывно растет в процессе сварки, как при жестком, так и при мягком режимах сварки, и не прекращается после выключения тока.
6. Скорость осадки при сварке на мягком режиме резко падает в момент выключения тока; при сварке на жестком режиме скорость осадки резко падает еще до выключения тока.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИХСЯ КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ

В результате анализа свойств, сплавы по свариваемости разделяют на восемь групп [79-84]. Из них арматурные стали принадлежат к первой группе, так называемые низкоуглеродистые стали. Низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 2,5% имеют среднее значения удельного электросопротивления $\rho_0 = 13 \text{ МкОм} \cdot \text{см}$, малое сопротивление деформации $\sigma_g = 200 \text{ Мпа}$ и характеризуются низкой чувствительностью к термическому циклу и выплескам. Поэтому эти стали возможно сварить как на жестких, так и на мягких режимах. Обычно применяется один импульс тока с постоянным усилием и простая циклограмма (рис.4.1, а,б). Исходя из этого, при сварке перекрещивающихся круглых стержней, изготовленных из низкоуглеродистой стали, основными параметрами режима сварки являются:

- сварочный ток $I_{\text{св}}$; кА;
- усилие сжатия между электродами $F_{\text{св}}$, дан;
- время сварки $t_{\text{св}}$, сек;
- ковочное усилие, $F_{\text{к}}$, дан;
- время проковки, $t_{\text{к}}$; сек.

Так как мы рассматриваем электроконтактную сварку перекрещивающихся круглых стержней диаметром $5 \div 10 \text{ мм}$, для получения качественной сварки нет необходимости приложить к электродам ковочное усилие, поэтому основными параметрами режима сварки в наших условиях являются: сварочный ток $I_{\text{св}}$, усилие сжатия между электродами $F_{\text{св}}$ и время сварки $t_{\text{св}}$.

Импульс сварочного тока на рис.4.1 условно показан в виде прямоугольника, в действительности сварочный ток представляет синусоиду (рис.4.2). В расчетах мы рассматриваем $I_{\text{св.д}}$ вместо обозначенного на рисунке $I_{\text{св}}$.

Для сварки применяются электроды с плоской рабочей поверхностью, электропроводностью не менее 80% электропроводности меди и твердостью НВ 120-140. Обычно применяют электроды, изготовленные из сплава БрХ. Этот сплав представляет собой медь, легированную хромом [68,69].

Важное условие повышения стойкости электродов - снижение температуры в контакте электрод-деталь.

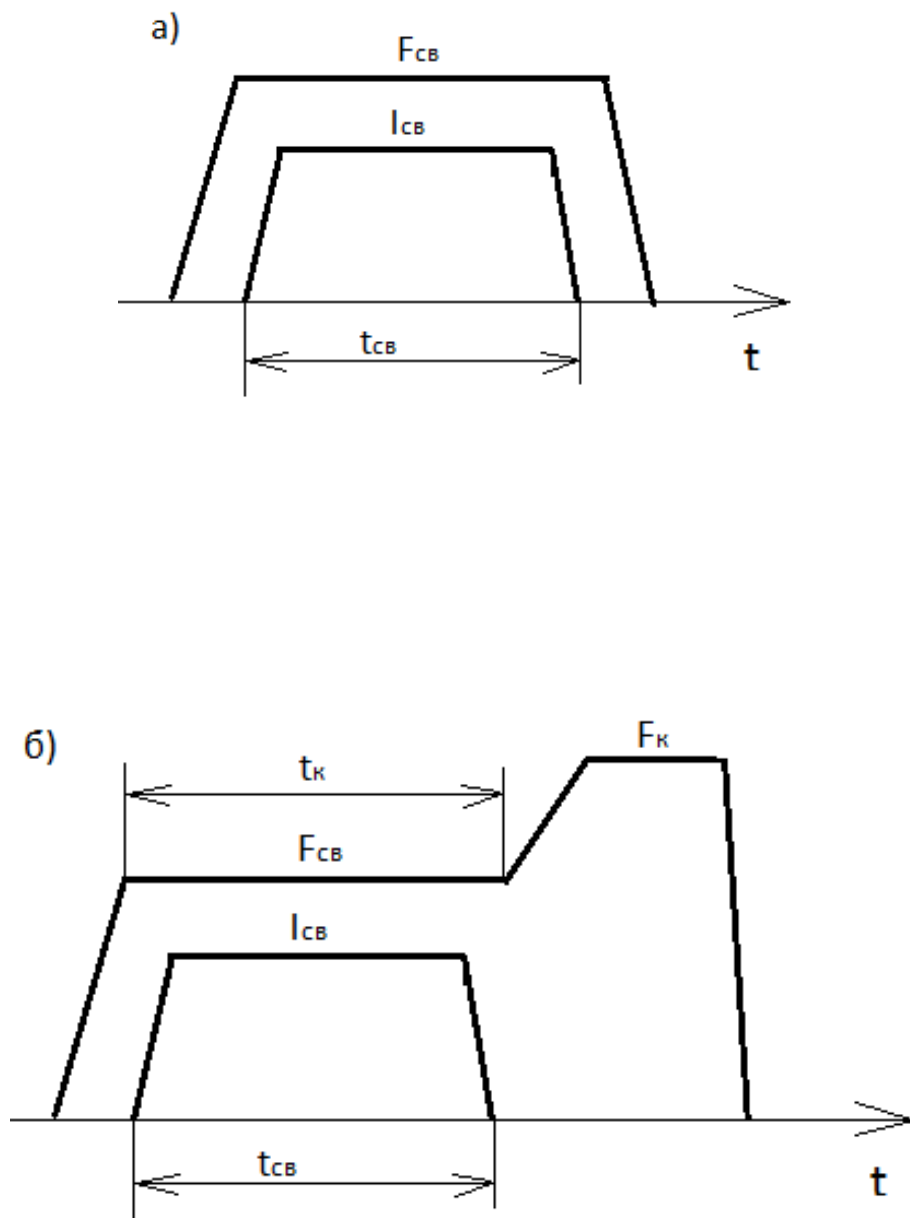


Рис.4.1 Наиболее распространенные циклограммы усилия и тока при контактной сварке перекрещивающихся круглых стержней:

а - с постоянным сварочным усилием $F_{св}$; б - с постоянным сварочным усилием и приложением ковочного усилия $F_{к}$; $t_{к}$ - время приложения ковочного усилия.

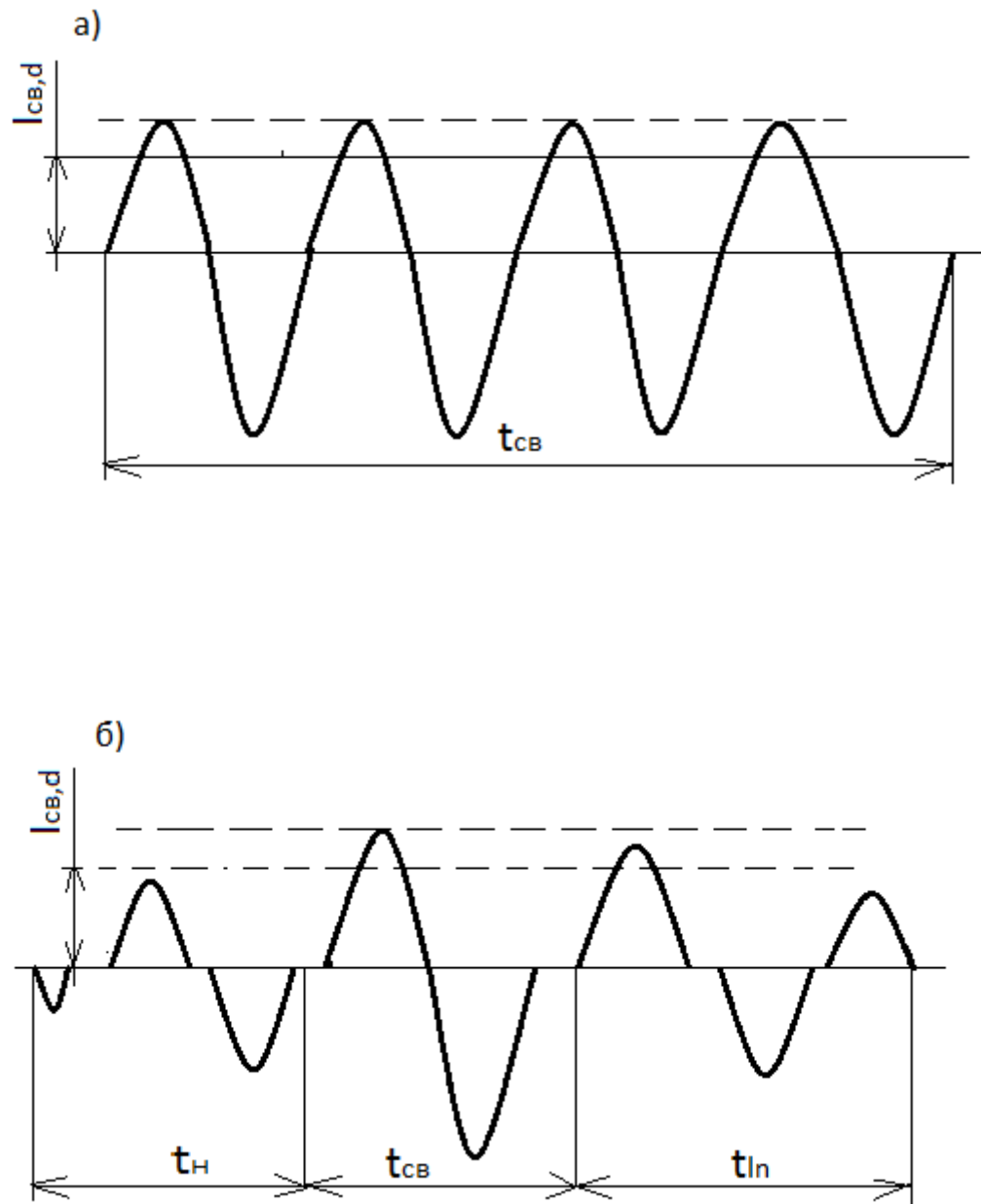


Рис.4.2 Формы импульса сварочного тока:

а - переменный ток; б - переменный ток с модуляцией; $t_{св}$ - мгновенный сварочный ток;

$I_{св,д}$ - действующий сварочный ток; $t_{н}$ - длительность нарастания тока;

$i_{\text{сп}}$ - длительность спада сварочного тока.

4.1 Распределение потенциала и поперечного тока в круглом стержне

Для определения наименьшего тока, необходимого для сварки перекрещивающихся круглых стержней, требуется определение характера распределения сварочного тока [85-87] в процессе сварки как в стержне, так и в свариваемом контакте.

Расчет распределения поперечного тока в круглом стержне (в арматуре) сводится к решению задачи о распределении потенциала $U(r, \varphi, Z)$ в однородном проводящем цилиндре.

При увеличении длин $Z_2 = Z_1$ контактных площадок источника и стока с заданными на них постоянными плотностями тока, линии тока в средней области, примыкающей к поперечной плоскости XOY симметрии источника и стока, все меньше отклоняются от поперечных плоскостей $Z = \text{const}$, а распределение потенциала в этой области стремится к плоскому, не зависящему от координаты Z (рис.4.2).

При неограниченном увеличении длин контактных площадок источника и стока $2Z_2 = 2Z_1 \rightarrow \infty$ (рис.4.4.) и сохранении на них заданных плоскостей тока ($j_1 = \text{const}$, $j_2 = \text{const}$), распределение потенциала и поперечного тока становится плоским. Понятие полного тока при этом теряет смысл; его целесообразно заменить понятием линейного тока I_1 (А/см), приходящего на единицу длины стержня и связанного с плотностью тока на контактной площадке соотношением

$$I_1 = 2j_1 \cdot \varphi_1 \cdot r_0 = 2j_2 \cdot \varphi_2 \cdot r_0.$$

Плоский потенциал в круглом стержне, ограниченном длиной $2l$ или неограниченном по всей длине с контактными площадками источника и стока, с углами охвата φ_1 и φ_2 , определяется величиной линейного тока I_1 и не зависит от длины стержня.

Для определения характера распределения плоского потенциала и поперечного тока в круглом стержне используем теорию нагрева стержней при стыковой сварке,

предложенной академиком Н.Н. Рыкалиным. По этой теории используется уравнение процесса нагрева:

$$C\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial X}\right] - \alpha(T)\frac{P}{F}(T - T_0) + 0,24\rho(T)j^2(t)[1 + \omega_k(x, t)]. \quad (4.1)$$

Используя безразмерные критерии процесса нагрева (4.1), уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau'} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^{12}} - \nu' \theta + \mu^2 \vartheta^2 (\theta + 1) + \omega_m; \quad (4.2)$$

$$\theta(\xi', 0) = 0;$$

$$\theta(\xi^1, \tau'); \quad -1 \leq \xi' \leq 1; \quad 0 \leq \tau' \leq \infty.$$

Распределение плоского потенциала $U(r, \varphi)$ в круглом стержне, нагруженном поперечным линейным током I_1 , получим из выражения (4.2) пространственного потенциала, полагая

$$\xi_1 = \xi_2 \rightarrow \infty \quad \text{при} \quad \frac{I}{2\xi_1 \Gamma_0} = I_1.$$

Уравнение (4.2) легко вычислить предельным переходом под знаком интеграла

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{I_n(\omega \rho)}{\omega I'_n(\omega)} \sin \omega \xi_{1,2} \cos \omega \xi \frac{d\omega}{\omega} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left[\frac{I_n(\omega \rho)}{\omega I'_n(\omega)} \cos \omega \xi \right] \int_0^\infty \frac{\sin U}{U} dU =$$

$$= \frac{\omega^n \rho^n Z^n (n-1)!}{2^n n! \cdot \omega \cdot \omega^{n-1}} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho^n}{n};$$

$$U(r, \varphi) = \frac{I_1}{\pi \sigma} \sum_1^\infty \left\{ \frac{1}{\varphi_1} \cos n \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \sin n \varphi_1 - \frac{1}{\varphi_2} \cos n \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_1 \right) \cdot \sin n \varphi_2 \right\} \frac{\rho^n}{n^2}. \quad (4.3)$$

Потенциал выражается степенным быстроходящимся рядом от ρ_1 , нулевой член которого равен нулю, т.к.

$$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{2} \frac{1}{n} \left[\cos n \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \frac{\sin \varphi_1}{n \varphi_1} - \cos n \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) \frac{\sin \varphi_2}{n \varphi_2} \right] = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{2n} \left[\cos n \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) - \cos n \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) \right] = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{2n} \cdot \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\varphi = 0.$$

Таким образом, потенциал центра круглого стержня, нагруженного поперечным током, $U(0, \varphi) = 0$, равен нулю при любых углах охвата φ_1 и φ_2 площадью источника и стока.

Это заключение мы сделали, когда площади со стороны электрода и свариваемого контакта φ_1 и φ_2 неодинаковы.

Когда $\varphi_1 = \varphi_2$, потенциал выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} U(r, \varphi) &= \frac{2I_1}{\pi\sigma\varphi_1} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\varphi_1 \sin n\varphi \frac{\rho^n}{n^2} = \\ &= \frac{2I_1}{\pi\sigma\varphi_1} \sum_{0}^{\infty} \sin \frac{(2m+1)\pi}{2} \sin \frac{(2m+1)\pi}{2} \varphi \frac{\rho^{2m+1}}{(2m+1)^2}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

Здесь использовано соотношение

$$\cos n \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) - \cos n \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) = 2 \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\varphi$$

$$\sin \frac{n\pi}{2} \begin{cases} 0 & \text{при } n = 2m \\ (-1)^m & \text{при } n = 2m + 1, m = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Потенциал (4.4) симметричен относительно горизонтальной оси $\varphi = 0$, потенциал которой равен нулю.

Распределение потенциала по окружности стержня при площадках с углом охвата $2\varphi_1 = 90^\circ$, вычисленное по (4.4) представлено в радиальных и прямоугольных координатах (рис.4.5). Потенциал $\frac{\sigma}{I_1} U(I, \varphi)$, выраженный в безразмерных единицах, достигает наибольшего значения 0,612 в центре контактной площадки источника и по мере удаления от центра снижается до 0,372 на краю контактной площадки и до нуля, на горизонтальной оси. Наиболее резко потенциал изменяется у края контактной площадки, где наиболее высока касательная составляющая плотности тока.

Рассмотрим изменение потенциала и плотности тока в характерных точках поперечного сечения стержня в зависимости от угла охвата $2\varphi_1$ контактных площадок.

Наибольший потенциал U_{\max} имеет место в центре площадки источника:

$$U_{\max}(\varphi_1) = U\left(I, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2I_1}{\pi\sigma\varphi_1} \sum_{1,3,5}^{\infty} \frac{\sin n\varphi}{n^2}, \quad (4.5)$$

так как $\sin^2 \frac{n\pi}{2} = \begin{cases} 0, & \text{при } n \text{ четном} \\ 1, & \text{при } n \text{ нечетном} \end{cases}$

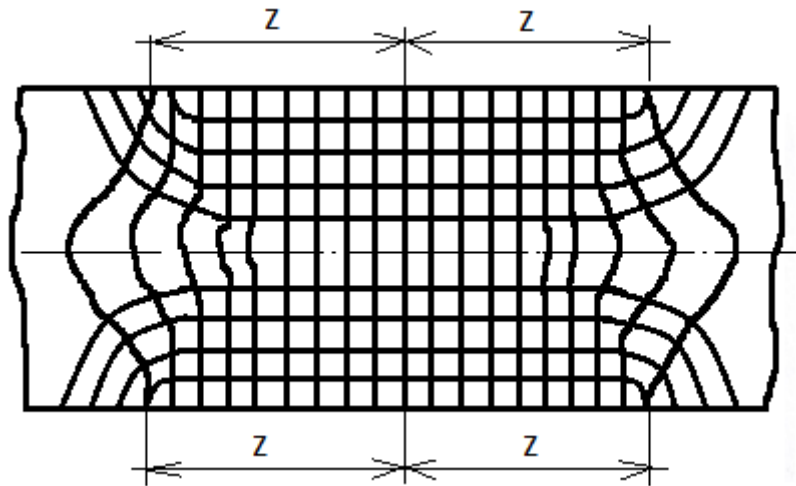


Рис.4.3 Схема распределения потенциала в диаметральной плоскости XOY при удаленных контактных площадках источника стока

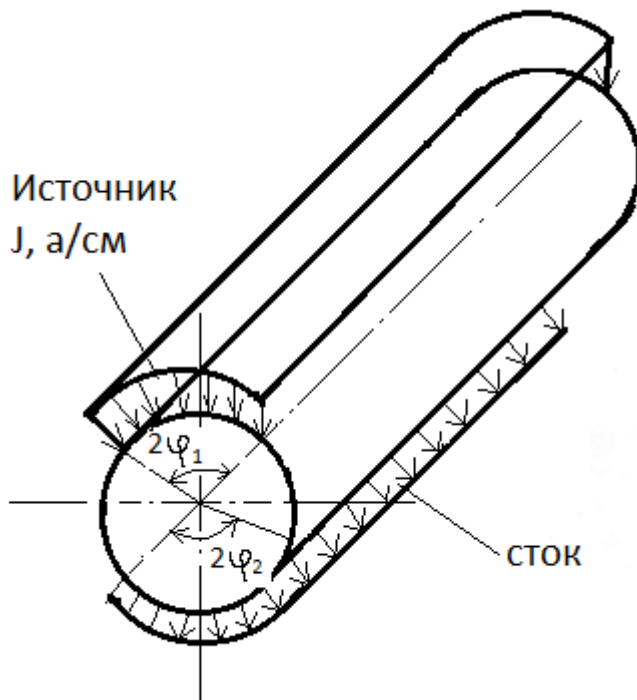


Рис.4.4 Схема нагружения стержня поперечным линейным током

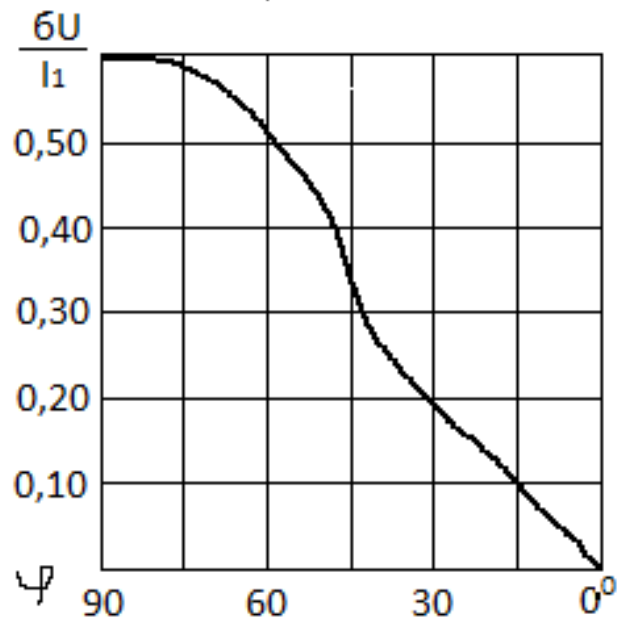


Рис 4.5 Распределение потенциала по окружности стержня, нагруженного поперечным линейным током I_1 при контактных площадках с углом охвата $2\varphi_1 = 90^\circ$

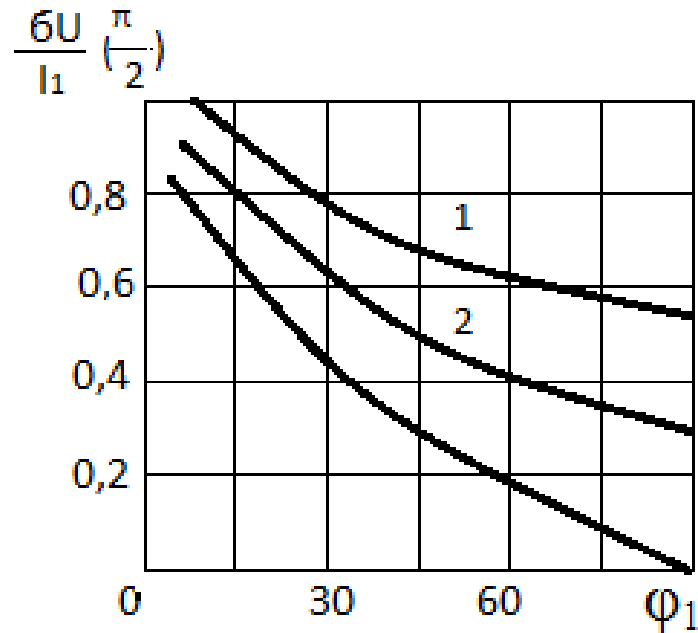


Рис. 4.6 Наибольший U_{max} (1), наименьший U_{min} (3), U усредненный U_{cp} (2) потенциалы на площадке источника в стержне диаметром $2r_0$, нагруженном линейным поперечным током I , в зависимости от угла охвата $2\varphi_1$ площадки источника или стока.

На краю площадки источника, т.е. при $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_1$, потенциал

$$U\left(I, \frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) = \frac{I_1}{\pi \sigma \varphi_1} \sum_{1,3,5}^{\infty} \frac{\sin 2n\varphi_1}{n^2} = U_{max}(2\varphi_1) \quad (4.6)$$

равен наибольшему потенциалу в центре площадки с удвоенным углом охвата $2\varphi_1$. Здесь использованы соотношения

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) = \sin\frac{n\pi}{2} \cos n\varphi_1 - \cos\frac{n\pi}{2} \sin n\varphi_1;$$

$$\sin^2\frac{n\pi}{2} = \begin{cases} 1, & \text{при } n \text{ нечетном} \\ 0, & \text{при } n \text{ четном} \end{cases}$$

$$\sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{2} = 0$$

Осредненный по площадке источника потенциал

$$U_{cp}(\varphi_1) = \frac{1}{\varphi_1} \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_1}^{\frac{\pi}{2}} U(1, \varphi) d\varphi = \frac{2I}{\pi\sigma\varphi_1^2} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin^2 n\varphi_1}{n^3}. \quad (4.7)$$

Здесь выражение (4.4) проинтегрировано почлено под знаком суммы $\frac{\pi}{2}$

$$\begin{aligned} \sin \frac{n\pi}{2} \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin n\varphi d\varphi &= \frac{1}{n} \left[\cos n \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1 \right) - \cos \frac{n\pi}{2} \right] \sin \frac{n\pi}{2} = \\ &= \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \left[\cos \frac{n\pi}{2} \cdot \cos n\varphi_1 + \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\varphi_1 \right] = \frac{1}{n} \sin n\varphi_1 \end{aligned}$$

при $n=1,3,5,\dots$.

Вычисленные по формулам (4.5), (4.6) и (4.7) значения наибольшего, наименьшего и осредненного потенциалов на площадке источника, в зависимости от угла охвата площадки, представлены на рис.4.6. При постоянной величине линейного тока $I_1 = const$ наибольший, наименьший и осредненный потенциалы убывают с увеличением угла охвата I_1 площадки источника, достигая наименьших значений при площадке, охватывающей полуокружность, $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}$;

$$\frac{\sigma U_{max}(\frac{\pi}{2})}{I_1} = \frac{4}{\pi^2} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin^n \frac{\pi}{2}}{n^2} = \frac{4}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)^2} = \frac{4}{\pi^2} G = 0,3718,$$

где $G = 0,916$ - постоянная Каталана.

$$\frac{\sigma U_{cp}(\frac{\pi}{2})}{I_1} = \frac{8}{\pi^3} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2}}{n^3} = \frac{8}{\pi^3} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^3} = 0,2516$$

При неограниченном уменьшении угла охвата площадки ($\varphi \rightarrow 0$) потенциалы бесконечно возрастают.

Плотность тока по вертикальному радиусу ОУ равна вертикальной составляющей $j_\rho \left(\rho, \frac{\pi}{2} \right)$, так как горизонтальная составляющая плотности тока равна нулю, ввиду симметрии распределения относительно вертикального радиуса ОУ:

$$j_\rho \left(\rho, \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{\sigma}{r_0} \frac{\partial}{\partial \rho} U(\rho, 0) = -\frac{2I_1}{\pi \varphi_1 r_0} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \sin n \varphi_1 \frac{\rho^{n-1}}{n}. \quad (4.8)$$

Плотность тока в центре стержня О (рис.4.7,а)

$$j_\rho \left(0, \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{2I_1}{\pi r_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1}. \quad (4.9)$$

Плотность тока в центре контактной площадки

$$j_\rho \left(1, \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{2I_1}{\pi \varphi_1 \Gamma_0} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin n \varphi_1}{n} = \frac{2I_1}{\pi \varphi_1 r_0} \frac{\pi}{4} = -\frac{I_1}{2 \varphi_1 r_{01}}.$$

Плотность тока в точке (1,0) на конце горизонтального радиуса ОХ, равна касательной составляющей плотности тока j_φ по окружности стержня $\rho = 1$ (рис.4.7,б)

$$j_\varphi(1,0) = -\frac{\sigma}{r_0} \frac{\partial}{\partial \varphi} U(1,0) = -\frac{2I_1}{\pi \varphi_1 r_0} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\varphi_1}{n} = -\frac{I_1}{\pi \varphi_1 r_0} \ln \frac{1+\sin \varphi_1}{1-\sin \varphi_1}. \quad (4.10)$$

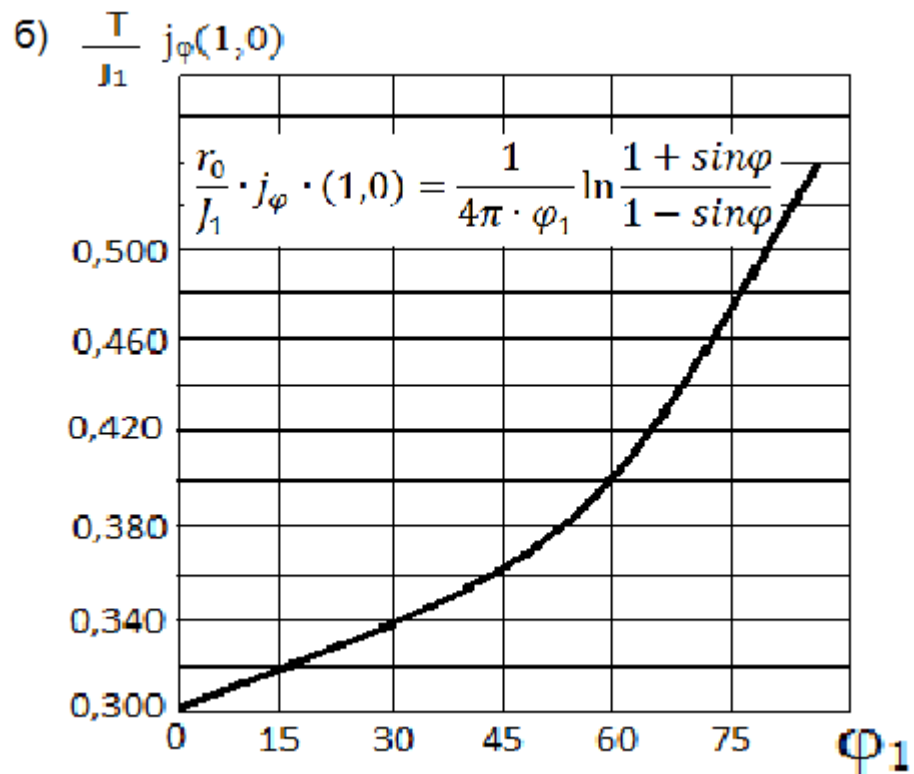
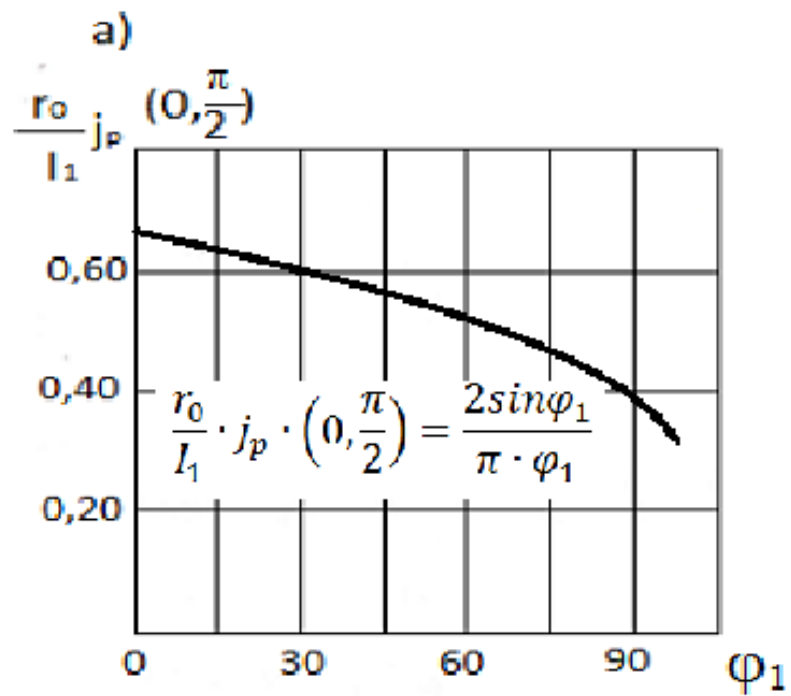


Рис.4.7 Плотности тока в стержне диаметром $2r_0$, нагруженном линейным током I_1 , в зависимости от угла охвата $2\varphi_1$ площадки источника и стока:
а) в центре; б) на краю горизонтального радиуса.

Знак минус в выражениях (4.9) и (4.10) означает, что вектор плотности тока направлен в сторону отрицательных координат.

Плотность тока в центре (4.9) выраженная в безразмерных единицах

$$\frac{r_0}{I_1} j_\rho \left(0, \frac{\pi}{2}\right).$$

При заданной величине линейного тока I_1 несколько убывает с увеличением угла охвата $2\varphi_1$ от $\frac{2}{\pi} = 0,636$ при $\varphi_1 = 0$ до $\frac{4}{\pi^2} = 0,404$ при $\varphi_1 = 90^\circ$, то есть всего лишь на 36%. Плотность тока (4.10) на конце горизонтального радиуса, равная $\frac{1}{\pi} = 0,318$ при $\varphi_1 = 0$, возрастает с увеличением угла охвата, стремясь к бесконечности при $\varphi_1 = 90^\circ$.

Когда источник и сток являются линейными, возможны следующие варианты.

Пусть при постоянной величине линейного тока I_1 одинаковые контактные площадки неограниченно уменьшается ($\varphi_1 \rightarrow 0$), стягиваясь к образующим цилиндра $(I, \pm \frac{\pi}{2})$. В пределе получим цилиндр, нагруженный поперечным током, вызванным линейным источником по образующей $(I, \frac{\pi}{2})$ и линейным стоком по образующей $(I, -\frac{\pi}{2})$.

Распределение потенциала получим, полагая в выражении (4.4) $\varphi_1 \rightarrow 0$ и суммируя ряд согласно известному соотношению

$$U(\rho, \varphi) = \frac{2I_1}{\pi\sigma} \sum_{1,3,\dots}^{\infty} \sin n\varphi \frac{\rho^n}{n} = \frac{I_1}{2\pi\sigma} \ln \frac{1+2\rho\sin\varphi + \rho^2}{1-2\rho\sin\varphi + \rho^2}. \quad (4.11)$$

Потенциал по вертикальному радиусу

$$U\left(\rho, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{I_1}{\pi\sigma} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho}, \quad (4.12)$$

по окружности стержня ($\rho = 1$)

$$U(1, \varphi) = \frac{I_1}{2\pi\sigma} \ln \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (4.13)$$

возрастает от нуля на горизонтальном диаметре и по мере приближения к линейному источнику стремится к бесконечности, как $\ln \varepsilon$, где ε - расстояние до источника $\varepsilon \rightarrow 0$.

Плотности тока по вертикальному радиусу

$$j_\rho \left(\rho, \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{2I_1}{\sigma r_0} \cdot \frac{1}{1-\rho^2} . \quad (4.14)$$

И по окружности стержня (касательная составляющая, так как нормальная всюду на окружности равна нулю)

$$j_\rho (1, \varphi) = -\frac{1}{\pi r_0} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} . \quad (4.15)$$

Выражение, в безразмерных единицах $\frac{i\mu_0}{I_1}$, возрастает от значений $\frac{2}{\pi}$ и $\frac{1}{\pi}$ на горизонтальном диаметре и, по мере приближения к источнику, стремится к бесконечности как ε^{-1} (рис.4.8).

Плотность тока по горизонтальному диаметру (касательная составляющая)

$$j_\varphi (\rho, 0) = -\frac{\sigma}{r_0} \cdot \frac{\partial}{\rho\partial\rho} U(\rho, 0) = -\frac{2I}{\pi r_0} \cdot \frac{1}{1+\rho^2} , \quad (4.16)$$

выраженная в безразмерных единицах, монотонно убывает от $\frac{1}{\pi} = 0,636$ в центре стержня до $\frac{1}{\pi} = 0,318$ на его окружности (рис.4.9).

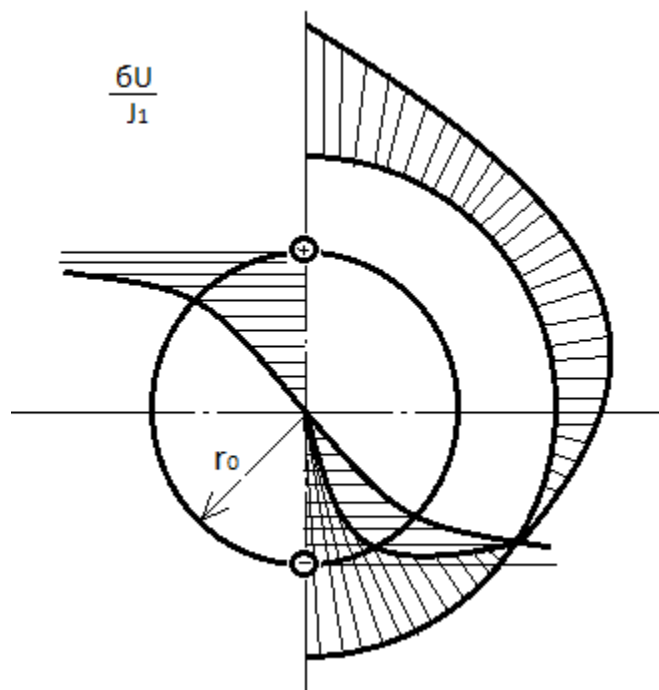


Рис.4.8 Распределение потенциала по окружности и по вертикальному радиусу r_0 стержня, нагруженного поперечным током.

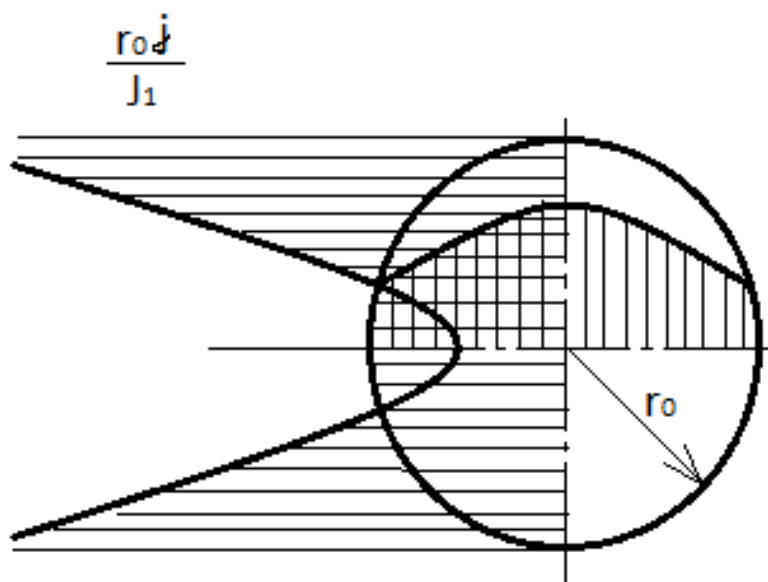


Рис.4.9. Распределение плотности тока по окружности, нагруженного поперечным током I_1 .

4.2 Определение наименьшего тока, необходимого для сварки перекрещивающихся круглых стержней

В предыдущих разделах были рассмотрены целый ряд вопросов:

- распределение поперечного тока в однородном круглом стержне;
- распределение потенциала и поперечного тока в круглом стержне;
- нагрев при контактной сварке перекрещивающихся стержней при контактной электросварке;
- опытные исследование процесса нагрева при контактной электросварке перекрещивающихся круглых стержней;
- теоретические исследования процесса нагрева стержней;
- анализ процесса нагрева стержней.

Решение этих задач позволило разработать методику определения наименьшего тока, необходимого для электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней.

Для определения этого тока задаемся необходимой максимальной температурой в контакте

$$T_{\max} = \frac{1}{\beta} \theta_{\max} , \quad (4.17)$$

где θ_{\max} - максимальная безразмерная температура; β - температурный коэффициент, $\frac{1}{0c}$.

Допустим, что необходимая максимальная температура в контакте, $\vartheta_{Nt} = 1$ равна температуре предельного состояния $\theta_{\max} = \theta_{\text{пр}}$.

Тогда на основании (2.8)

$$\theta_{\max} = \frac{1 - \cos\mu}{\cos\mu};$$

$$T_{\max} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1 - \cos\mu}{\cos\mu};$$

откуда

$$\mu = \arccos \frac{1}{1 + \beta T_{\max}} . \quad (4.18)$$

Определив, таким образом, значение μ , при котором достигается заданная температура в контакте, и зная теплофизические коэффициенты для данной марки стали, из выражении (4.18) находим отношение

$$\frac{I_{св}^2}{F_{пр}}$$

где $I_{св}$ - наименьший ток, необходимый для нагрева контакта до заданной температуры;

$F_{пр}$ - площадь сварной точки (площадь горизонтальной проекции в тот момент, когда температура в контакте достигает предельного состояния).

Подставив в выражение (4.18) вместо μ его значение

$$\mu = \frac{I_{св}}{2\pi(r_{от})_{пр}} \sqrt{\frac{0,24\mu\rho_0}{\lambda}};$$

получим

$$\frac{I_{св}}{2\pi(r_{от})_{пр}} \sqrt{\frac{0,24\mu\rho_0}{\lambda}} = \arccos \frac{1}{1 + \beta T_{max}};$$

откуда

$$\frac{I_{св}^2}{F_{пр}} = \frac{2\pi\lambda(\arccos \frac{1}{1 + \beta T_{max}})^2}{0,24\beta\rho_0},$$

где $F_{пр} = 2\pi(r_{от})_{пр}^2$.

Выразив $F_{пр}$ через диаметр d_1 меньшего стержня, получим

$$\frac{I_{св}^2}{m \frac{\pi d_1^2}{4}} = (\arccos \frac{1}{1 + \beta T_{max}})^2 \frac{2\pi\lambda}{0,24\beta\rho_0}, \quad (4.20)$$

где m - отношение площади $F_{пр}$ к площади поперечного сечения стержня $\frac{\pi d_1^2}{4}$.

Из выражения (4.20) имеем:

$$I_{св} = \pi d_1 \sqrt{\frac{m}{2} \cdot \frac{\lambda}{0,24\beta\rho_0} \cdot \arccos \frac{1}{1 + \beta T_{max}}}. \quad (4.21)$$

Коэффициент m для данной марки стали определяется из опыта. Для малоуглеродистой стали, по нашим опытам, $m_{min} = 0,6$. Чем больше m , тем относительно позже наступает предельное состояние в контакте, тем выше необходимый для сварки ток.

Ниже приведен пример определения минимального тока, необходимого для сварки стержней диаметрами 5+10 мм из малоуглеродистой стали:

$$d_1 = 0,5 \text{ см},$$

$$\rho_0 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{max}} = 1500^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda = 0,1 \text{ калл/см} \cdot \text{сек} \cdot ^{\circ}\text{C},$$

$$m_{\text{min}} = 0,6.$$

С учетом этих данных

$$I_{\text{min}} = \sqrt{\frac{0,6}{2} \cdot \frac{0,1 \cdot 10^9}{0,24 \cdot 5 \cdot 13}} \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot \arccos \frac{1}{1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1500} = 2050 \text{ А}.$$

Минимальное значение тока, необходимого для сварки стержней диаметрами 5+10мм из низкоуглеродистой стали, полученное расчетным путем близко к экспериментальным значениям, показанным на рис.1.7 линейными участками (см. Глава1).

4.3 Определение плотности тока в центре стержня и усилия сжатия между электродами

Вектор плотности тока $j_0 = j(0,0,0)$ в центре стержня, т.е. на середине вертикального диаметра, соединяющего центры контактных площадок источника и стока, совпадает со своей вертикальной составляющей $j(0,0,0)$, так как горизонтальные составляющие вектора плотности тока равны нулю по условиям симметрии. Плотность тока j_0 в центре стержня характеризует степень растекания поперечного тока по стержню. По горизонтальной диаметральной плоскости ХОУ вертикальная составляющая плотности тока $j_\rho(\rho, 0, \xi)$ достигает максимума, равного j_0 в центре О. По вертикальному диаметру АВ вертикальная составляющая $j_\rho(\rho, \frac{\pi}{2}, 0)$ плотности тока, при равных контактных площадках достигает минимума, равного j_0 в центре О; при неравных площадках минимум

плотности тока несколько смещается по вертикальному диаметру в сторону большей площадки.

Плотность тока в центре $j_0(\varphi, \xi, \varphi_2, \xi_2)$ при неравных контактах площадок вычислим, полагая $\xi = 0$ распределения вертикальной составляющей $j_\rho(0, \frac{\pi}{2}, \xi)$ плотности тока по продольной оси стержня OZ:

$$j_0(\varphi, \xi, \varphi_2, \xi_2) = j_\rho\left(0, \frac{\pi}{2}, 0\right) = \frac{2}{\pi^2} j_1 \sin\varphi_1 \int_0^\infty \frac{\sin\omega \xi_1 d\omega}{\omega I_1'(\omega)} + \frac{2}{\pi^2} j_2 \sin\varphi_2 \int_0^\infty \frac{\sin\omega \xi_1 d\omega}{\omega I_1'(\omega)}. \quad (4.22)$$

При равных контактных площадках, плотность тока в центре $j_0(\varphi, \xi)$ получим, полагая в выражении (4.22): $j_2 = j$; $\varphi_2 = \varphi_1$; $\xi_1 = \xi_2$.

Тогда оба слагаемых становятся равными:

$$j_0(\varphi_1, \xi_1) = \frac{4}{\pi^2} j_1 \sin\varphi_1 \int_0^\infty \frac{\sin\omega \xi_1 d\omega}{\omega I_1'(\omega)}. \quad (4.23)$$

При точечных источнике и стоке плотность тока в центре $j(0,0)$ получим, полагая в выражении (4,23): $\varphi_1 = 0$ и $\xi_1 = 0$ и вводя вместо неограниченно возрастающий плотности тока j_1 в контактной площадке величину тока I по соотношению

$$j_1 = \frac{I}{4z_1\varphi_1 r_0} \quad \text{и} \quad j_2 = \frac{I}{4z_2\varphi_2 r_0},$$

$$j(0,0) = \frac{I}{\pi^2 r_0^2} \int_0^\infty \frac{d\omega}{I_1'(\omega)} = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{I}{\pi r_0}. \quad (4.24)$$

Вычислим интеграл выражения (4.24). Заменим производную бесселевой функции значением самой функции согласно известному соотношению

$$2I_n'(U) = I_{n-1}(U) + I_{n+1}(U).$$

Тогда

$$K = \int_0^\infty \frac{d\omega}{I_1'(\omega)} = 2 \int_0^\infty \frac{d\omega}{I_0(\omega) + I_2(\omega)}. \quad (4.25)$$

Подынтегральная функция интеграла (4.25) равна единице при $\omega=0$ и с воздействием аргумента убывает, стремясь к нулю. Интеграл удобно вычислить по формуле механических квадратов в пределах от $\omega=0$ до достаточно большого значения $\omega=\omega_1$, оценивая остаточный член приближенно:

$$K = 2 \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{I_0(\omega)+I_2(\omega)} + \Delta K(\omega_1). \quad (4.26)$$

Для вычисления остаточного члена воспользуемся асимметрическим разложением бesselовой функции

$$I_n(U) \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi U}} e^U \left[1 - \frac{4n^2 - 1^2}{1! 8U} + \frac{(4n^2 - 1^2)(4n^2 - 3^2)}{2! (8U)^2} - \dots \right]$$

и ограничимся двумя членами разложения

$$\Delta K(\omega_1) = 2 \int_{\omega_1}^{\infty} \frac{d\omega}{I_0(\omega)+I_2(\omega)} \approx 2\sqrt{2\pi} \int_{\omega_1}^{\infty} \frac{e^{-\omega\sqrt{\omega d\omega}}}{\left(1+\frac{1}{8\omega}\right)+\left(1-\frac{15}{8\omega}\right)}.$$

Заменив переменную $\omega = U^2$, имеем

$$\begin{aligned} \Delta K(\omega_1) &= 2\sqrt{\pi} \int_{\sqrt{\varphi_1}}^{\infty} \frac{e^{-U^2} U^2 dU}{7} \approx 2\sqrt{2\pi} \int_{\sqrt{\varphi_1}}^{\infty} \left(U^2 + \frac{7}{8} \right) e^{-U^2} dU = \\ &= \sqrt{2\pi\varphi_1} e^{-U_1} + \frac{11\pi}{4\sqrt{2}} (1 - \operatorname{erf} \sqrt{\omega_1}). \end{aligned}$$

Разлагая $\operatorname{erf}(u)$ в асимптотический ряд и ограничиваясь нулевым и первым членами, получим

$$\Delta K(\omega_1) \approx \sqrt{2\pi\omega_1} + \frac{11\sqrt{\pi}}{4\sqrt{2\omega_1}} e^{-\omega_1}.$$

Приближенное значение K по формуле Симпсона составляет $K=3,55$, поэтому:

$$j_0(0,0) = 1,13 \frac{I}{\pi r_0^2}.$$

Наибольшая плотность тока в центре $j_{0 \max}$, очевидно, соответствует

$$j_{0 \max} = \frac{3,55}{\pi} \cdot \frac{I}{\pi r_0^2} = 1,33 \frac{I}{\pi r_0^2}.$$

При неравных контактных площадках плотность тока в центре, выраженную соотношением (4.19) и (4.20), можно представить полусуммой плотности тока в центре $j_0(\varphi_1, \xi_1)$ и плотности тока в центре $j_0(\varphi_2, \xi_2)$.

Выражая плотность тока $j_0(\varphi_1, \xi_1)$ и $j_0(\varphi_2, \xi_2)$, получим

$$j_0(\varphi_1, \xi_1, \varphi_2, \xi_2) = \frac{I}{2\pi^2 r_0^2} \left[\frac{\sin \varphi_1 P(\xi_1)}{\varphi_1 \xi_1} + \frac{\sin \varphi_2 P(\xi_2)}{\varphi_2 \xi_2} \right].$$

Таким образом, расчет и анализ плотности тока в центре при неравных площадках источника и стока сводится к расчету и анализу той же величины при равных площадках.

Исходя из этого, при расчете плотности тока в свариваемом стержне, токопроводящий участок представлен в виде прямоугольных элементов поверхности цилиндра площадью

$$F_1 = 4Z_1 \varphi_1 r_0,$$

где F_1 - площадь контакта между электродом и стержнем

$$F_2 = 4Z_2 \varphi_2,$$

где F_2 - площадь контакта между свариваемыми перекрещивающимися стержнями.

Здесь Z_1 и Z_2 - половина длины контакта (источника и стока); φ_1 и φ_2 - половина угла охвата контактов при сварке; r_0 - радиус поперечного сечения свариваемого стержня.

Плотность тока в центре стержня $j_0(\varphi; \xi_1; \varphi_2; \xi_2)$, согласно (4.30) выражения

$$j_0(\varphi_1, \xi_1, \varphi_2, \xi_2) = \frac{I}{2\pi^2 r_0^2} \left[\frac{\sin \varphi_1}{\xi_1 \varphi_1} P(\xi_1) + \frac{\sin \varphi_2}{\xi_2 \varphi_2} P(\xi_2) \right], \quad (4.31)$$

где

$$\xi_1 = \frac{z_1}{r_0}; \quad \xi_2 = \frac{z_2}{r_0};$$

$$P(\xi_1) = \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega \xi_1 d\omega}{\omega I_1'(\omega)};$$

$$P(\xi_2) = \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega \xi_2 d\omega}{\omega I_2'(\omega)};$$

$I_1'(\omega)$ - первая производная функции Бесселя первого рода первого порядка.

Рассмотрим случай сварки стержней диаметрами 5+10 мм. Для стержня диаметром 10 мм ($r_0 = 0,5$ см) контактные площадки, образовавшиеся в результате обмятия стержней усилием 300 дан перед сваркой при диаметре рабочей поверхности электродов 20 мм, имеют следующие размеры (рис.4.10):

площадка между стержнями

$$2Z_1=1,0 \text{ мм}; \quad \xi_1 = \frac{Z_1}{r_0} = \frac{0,5}{5} = 0,1;$$

$$2\varphi_1 r_0=1,4 \text{ мм}; \quad \varphi_1 = \frac{\varphi_1 r_0}{r_0} = \frac{1,4}{5} = 0,038;$$

площадь между стержнями и электродом

(4.32)

$$2Z_2=15 \text{ мм}; \quad \xi_2 = \frac{Z_2}{r_0} = \frac{7,5}{5} = 1,5;$$

$$2\varphi_2 r_0=0,1 \text{ мм}; \quad \varphi_2 = \frac{\varphi_2 r_0}{r_0} = \frac{0,05}{5} = 0,011;$$

$$\frac{\sin \varphi_1}{\varphi_1} \approx 1;$$

$$\frac{\sin \varphi_2}{\varphi_2} \approx 1;$$

и выражение (4.31) для этого случая примет следующий вид:

$$j_0(\xi_1, \xi_2) = \frac{I}{2 \cdot \pi^2 \cdot r_0^2} \left[\frac{P(\xi_1)}{\xi_1} + \frac{P(\xi_2)}{\xi_2} \right], \quad (4.33)$$

т.е. при данных размерах контактных площадок плотность тока стержня зависит в основном от продольных размеров площадок (ξ_1 и ξ_2), а поперечными размерами ($\varphi_1 r_0$ и $\varphi_2 r_0$) можно пренебречь.

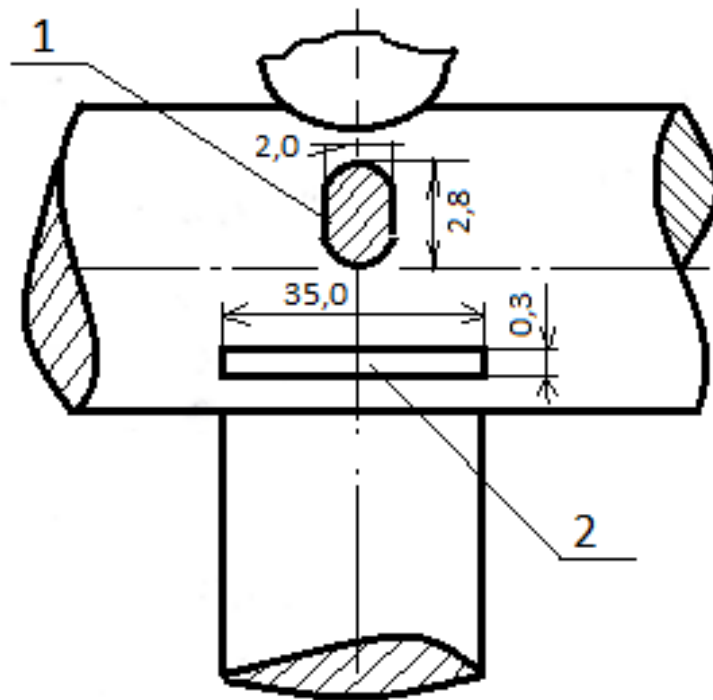


Рис.4.10. Схема расположения контактных площадок на поверхности стержня:
1- контактная площадка между стержнями; 2- контактная площадка между стержнем и электродом.

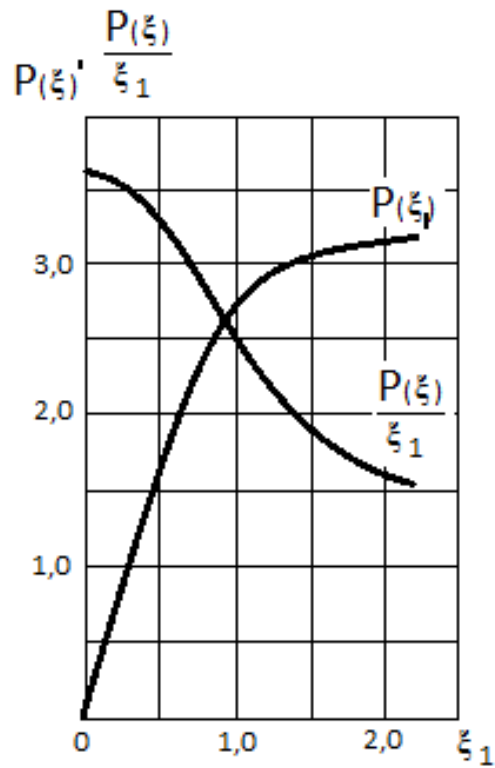


Рис.4.11 Отношение $P(\xi)$ от ξ_1 .

Таким образом контактные площадки в данном случае можем рассматривать как линейные источник тока и сток конечной длины на поверхности бесконтактного круглого стержня.

Поставив в выражение (4.33) значения ξ_1 и ξ_2 из (4.32), $I = I_2$ и $r_0 = 0,5$ см. получим

$$j_0(\xi_1, \xi_2) = \frac{J_2}{2 \cdot \pi^2 \cdot 0,5^2} \left[\frac{P(0,1)}{0,1} + \frac{P(1,5)}{1,5} \right].$$

Значения $\frac{P(0,1)}{0,1}$ и $\frac{P(1,5)}{1,5}$ возьмем из рис.4.11

$$\frac{P(0,1)}{0,1} = \frac{0,35}{0,1} = 3,5;$$

$$\frac{P(1,5)}{1,5} = \frac{3,0}{1,5} = 2,0;$$

$$j_0(\xi_1, \xi_2) = \frac{J_2}{2 \cdot \pi^2 \cdot 0,5^2} (3,5 + 2,0) = 5,5 \frac{J_2}{2 \cdot \pi^2 \cdot 0,5^2}. \quad (4.34)$$

Вычислим плотность тока в центре большого стержня по этой схеме применительно условиям, что стержни изготовлены из Ст3

$$\rho_0 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$C\gamma = 0,79 \text{ кал/см}^3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

ток в начале процесса

$$J_2 = 2100 \text{ А.}$$

Линейные источники и сток

$$j_0(\xi_1, \xi_2) = 5,5 \cdot \frac{2100}{2 \cdot \pi^2 \cdot 25} = 5,5 \cdot \frac{2100}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 25} = \frac{11550}{560} = 23,1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Давление в зоне контакта при сварке

$$K = \frac{P}{F} \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2} = 5,5 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}.$$

Расчетное значение площадки в зоне контакта

$$F = \frac{2100 \text{ а}}{231,0 \text{ а/см}^2} = 90,9 \text{ мм}^2.$$

Усилие сжатия между электродами

$$P_{св} = K \cdot F = 5,5 \cdot 90,9 = 500 \text{ дан.}$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследование процесса электроконтактной сварки перекрещивающихся круглых стержней, т.е. арматур железобетона, показал:
 - размеры и формы контакта зависят от размеров и форм стержней и электродов, а также от усилия сжатия между электродами;
 - площадь контакта между свариваемыми стержнями зависит от осадки при сварке $F_{св}(h)$ и при холодном обмятии стержней $F_x(h)$

$$F_{св}(h) = 1,8 F_x(h) ;$$

- при сварке стержней в зоне контакта удельное давление имеет постоянное значение и зависит от твердости материала стержней

$$K \approx 0,6HB;$$

но при сварке стержней малого диаметра (до 5 мм)

$$K \approx 1,28HB .$$

2. Экспериментально определена картина изменения температуры в зоне сварки. Выявлено, что необходимые скорости нагрева имеют место в начальной стадии процесса. Точка околосварочной области нагревается до температуры плавления основного металла в течение 1,5-2 сек.
3. Предельная температура точек околосварочной области со стороны малого стержня на 100-150° С выше, чем со стороны большого стержня.
4. Установлено, что чем больше длительность сварки, тем меньше эффект полезного действия процесса нагрева. При данном значении тока, предложено сварку перекрещивающихся круглых стержней осуществлять на жестком режиме ($t_{св} < 4 \text{сек}$).

5. Установлено, что плотность тока в центральной части контакта зависит только от длины контакта между свариваемыми стержнями, а также от длины контакта между электродами стержня.
6. На основе проведенных опытов и сопоставления опытных данных с результатами расчета температуры околоконтактной области в предельном состоянии, предложена методика определения наименьшего тока, необходимого для сварки стержней.
7. Разработана методика определения усилия сжатия между электродами в центре контакта сварки с учетом необходимого наименьшего сварочного тока перекрещивающихся круглых стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология бетона строительных изделий и конструкций: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов дневного и заочного обучения специальности 290600 /Сост. Д.И.Гладков. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005. – 24 с.
2. Прыкин Б.В. Проектирование и оптимизация технологических процессов заводов сборного железобетона. – Киев: Вища школа, 1976. – 302с.
3. Прыкин Б.В., Бойко В.Е., Дробот В.В. Технологическое проектирование арматурного производства. – Киев: Будивельник, 1977. – 196с.
4. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 671с.
5. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1971. – 359с.
6. ГОСТ 28737-90. Балки фундаментные железобетонные для стен зданий промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Технические условия. – М.: Госстройком СССР, 1990. – 12с.
7. ОНТП-07-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона. – М.: Высшая школа, 1986. – 51с.
8. Справочник по производству сборных железобетонных изделий. /Под ред. К.В.Михайлова и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 440с.
9. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. Изд. 4-е. – М.: Стройиздат, 1991. – 767с.
10. Байков В.Н., Дроздов П.Ф., Трофимов И.А. и др. Железобетонные конструкции. Специальный курс. – М.: Стройиздат, 1981. - 768с.

11. Мурашев В.И., Сигалов Э.Е., Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс. – М.: Госстройиздат, 1962. – 660с.
12. Улицкий И.И., Ривкин С.А. и др. Железобетонные конструкции (расчет и конструирование). /Под ред. С.А.Ривкина. Изд 3-е, перераб. и доп. – Киев: Будивельник, 1973. – 875с.
13. СНИП 11-6-74. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия. – М., 1976.
14. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуца Ю.П. и др. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. /Под ред. А.А.Гвоздева. – М.: Стройиздат, 1978. – 208с.
15. Цай Т.Н. Строительные конструкции. В 2-х томах. – М.: Стройиздат, 1985. – 462с.
16. Руководство по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения). Ленинград: Промстройпроект ЦНИИ промзданий, НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1978. – 129с.
17. Вахненко Н.Ф., Могилат А.Н. и др. Строительные конструкции зданий и сооружений. Стройиздат, М., 1980. – 423с.
18. Бернштейн С.А. Основы динамики сооружений. – М.-Л.: Гостройиздат, 1938. – 160с.
19. Сехниашвили Э.А. Инженерный метод расчета упругих систем на свободные колебания. – Тбилиси: Цодна, 1960. – 345с.
20. Кальницкий А.А., Пешковский Л.М. Расчет и конструирование железобетонных фундаментов гражданских и промышленных зданий и сооружений. – М.: Высшая школа, 1974. – 264с.
21. Типовые железобетонные конструкции зданий и сооружений для промышленного строительства. /Под ред. Г.И.Бердичевского. – М.: Стройиздат, 1981. – 489с.
22. Аксельрод Ф.А., Миркин А.М. Оборудование для контактной сварки: Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 70с.
23. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272с.
24. Чулошников П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 232с.
25. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – 440с.

26. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. – М.: Высшая школа, 1971. – 760с.
27. Львов Н.С., Гладков Э.А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов. – М.: Машиностроение, 1982. – 301с.
28. Кучук-Яценко С.Н., Лебедев В.К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. – Киев: Наукова думка, 1976. – 215с.
29. Контроль качества сварки. /Под ред. В.Н.Волченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 328с.
30. Гельман А.С. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1960. – 368с.
31. Гуляев А.И. Технология точечной и рельефной сварки сталей. – М.: Машиностроение, 1978. – 244с.
32. Теоретические основы сварки. /Под ред. В.В.Фролова. – М.: Высшая школа, 1970. – 592с.
33. Глебов Л.В., Пескарев М.А., Фейгенбаум Д.С. Расчет и конструирование машин контактной сварки. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 423с.
34. Исаев А.П., Шашин Д.М., Шаламберидзе М.Ш. Оценка прочности сварных узлов малогабаритных реле по параметрам процесса конденсаторной сварки. /Труды МВТУ, №363, Москва, 1981, с.66-72.
35. Исаев А.П., Шашин Д.М., Шаламберидзе М.Ш. Схема механических испытаний для оценки качества сварных соединений малогабаритных деталей. /Изв. Вузов. Машиностроение, №3, Москва, 1982, с.105-109.
36. Шаламберидзе М.Ш., Моисеенко Д.Б., Исаев А.П. Оценка качества сварных соединений узлов реле, выполняемых конденсаторной сваркой с использованием обобщенного показателя. /Труды МВТУ, №434, Москва, 1985, с.60-67.
37. Шаламберидзе М.Ш. Математическая модель контактной точечной сварки. /Сборник трудов Грузинского технического университета, Тбилиси, №2 (418), с.42-46.
38. Суламанидзе А.К., Шаламберидзе М.Ш., Дарчиашвили Ц.М., Конава Ж.Ж. Влияние формы свариваемой детали на образование литого ядра. /Georgian Engineering News, No.1 (Vol. 49), 2009, pp.80-85.

39. Шаламберидзе М.Ш. Вопросы моделирования контактной точечной сварки. /Сборник трудов Грузинского технического университета, Тбилиси, №4 (418), с.42-46.
40. Пустильник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288с.
41. Шаламберидзе М.Ш. Прогнозирование выплесков в процессе конденсаторной сварки по перемещению подвижного электрода. /Труды Грузинского политехнического института, №13 (310), Тбилиси, 1986.- 68-73 с.
42. Шаламберидзе М.Ш. Алгоритм контроля качества магнитной системы реле типа РЭС. /Труды Грузинского политехнического института, №13 (310), Тбилиси, 1986.- 64-68 с.
43. Акименко А.Д. Процессы теплообмена при получении непрерывного стального слитка. /Труды по машиностроению и металлургии, 1960, 20, Вып. 1, 15-18 с.
44. Будак Б.М., Соловьева Е.В., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи. /Журнал вычислительной математики и математической физики, 1965, 5 №5, 75-78 с.
45. Геращенко О.А. Основы теплотрии. – Киев: Наукова думка, 1971. – 192с.
46. Данишевский С.К., Сведе-Швец Н.И. Высокотемпературные термопары. – М.: Металлургия, 1977. – 232с.
47. Датчики для измерения температуры в промышленности. – Киев: Наукова думка, 1972. – 222с.
48. Демченко В.Ф., Хорунжий Ю.Г., Тарасевич Н.И. Математическое обеспечение для исследования процессов спецэлектрометаллургии. Киев, 1974.- 12-23 с.
49. Исаченко В.М., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 438с.
50. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 260с.
51. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 413с.
52. Иваненко Д, Соколов А. Классическая теория поля. – М.-Л., 1951.-480с.
53. Цимбалова В.А. Электротепловые процессы при контактной сварке перекрещивающихся стальных стержней. Автореферат. к.т.н.. – М., 1956.-14с.

54. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм и рядов. – М.: Гостехиздат физ-мат. Лит., 1963.-1108с.
55. Бродский А.Я. О параметрах режима контактной электросварки перекрещивающихся стержней железобетонных конструкций. /Автоматическая сварка, №1, 1954.
56. Волченко В.Н., Косырев В.Ф., Евгеньев И.Е. Выбор режима точечной сварки пересекающихся стержней арматуры. /Сварочное производство, №10, 1956.
57. Рыкалин Н.Н. Нагрев стержней током при сварке в стык сопротивлением. /Сварочное производство, №4, 1967.
58. Адашинский С.А. Охлаждение тонких стальных листов при точечной сварке. /Сварочное производство, №8, 1955.
59. Рыкалин Н.Н., Пугин А.И. Влияние поверхностного эффекта на нагрев стальных стержней при контактной стыковой сварке. /Сварочное производство, №4, 1954.
60. Т. Окамото. Электрическая сварка сопротивлением. – М.: Оргаметалл, 1956.
61. Рабинович И.Я. Основы теории контакта и теплопередачи при стыковой сварке сопротивлением. – М.: Машгиз, 1959.
62. Гельман А.С. Контактная электросварка. – М.: Машгиз, 1949.- 324с.
63. Кочергин К.А. Контактная сварка. – М.: Машиностроение 1987.-240с.
64. Пугин А.И. Роль электрического контакта в процессе образования сварного соединения. Электрические контакты. /Труды. Госэнергоиздат, 1958.
65. Кочергин К.А. Выбор технологии контактной сварки. – Л.: Судпромгиз, 1958.– 60с.
66. Пугин А.И. Влияние поверхностного эффекта на нагрев стальных стержней при контактной стыковой сварке. /Сварочное производство, №7, 1959.-65с.
67. Пугин А.И. Электротепловые процессы при сварке стержней в стык сопротивлением. /Сварочное производство, 1956.
68. Гельман А.С., Павличенко В.С. Влияние активного и индуктивного сопротивления на процесс сварки оплавлением. /Сварочное производство, №4, 1961.
69. Шаламберидзе М.Ш., Хвадагиани А.И., Цкалобадзе А.П., Сахвадзе Д.В. Способ изготовления электродов для электроконтактной точечной сварки. Авт. свидетельство СССР №1660902, Б23КМ130. Приоритет изобретения 6 июля 1989 г. 0707.91. Бюллетень №25.

70. Шаламберидзе М.Ш., Хвадагиани А.И., Сахвадзе Д.В. Способ изготовления электродов для электроконтактной сварки. Авт. свидетельство СССР №1798087, Б23К11/10. Приоритет изобретения 15 июля 1990 г. 28.02.93. Бюллетень №8.
71. Гельман А.С. Начальное электрическое сопротивление при точечной сварке /Автоматическая сварка, №7, 1961.
72. Гельман А.С. Тепловые процессы при электроконтактной сварке. /В сб. «Вопросы теории сварочных процессов». – М.: Машгиз, 1948.
73. Городецкий П.Г. Явление поверхностного эффекта при периодических токах. /Автоматическая сварка, №5, 1951.
74. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963.
75. Кабанов Н.С., Слепак Э.С. Технология стыковой электроконтактной сварки. – М.: Машгиз, 1970. - 264с.
76. Адашинский С.А. Процесс охлаждения стальных листов и стержней при точечной сварке. /Сварочное производство, 1953.
77. Лебедев В.К., Яворский Ю.Д. Применение критериев подобия для определения режимов контактной сварки. /Автоматическая сварка, №8, 1960.
78. Рыкалин Н.Н. Тепловые процессы при контактной сварке. /Сварочное производство, 1959.
79. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М: Высшая школа, 1967.-600с.
80. Кропивницкий Н.Н., Кучер А.М., Пугачева Р.В., Шорников П.Н. Технология металлов. – Л.: Ленинградское отделение изд. Машиностроение, 1980. – 150с.
81. Орлов Б.Д. и др. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1980. – 352с.
82. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 575с.
83. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 647с.
84. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 472с.
85. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 407с.
86. Миронов Ю.М., Свечанский А.Д. О характере протекания тока в ванне расплавленного шлака. /Электротехника, 1966, №1, с. 59-62

87. Левин С.С. Режимы точечной сварки тяжелой арматуры железобетонных конструкций и испытание прочности сварных соединений. – М.: Изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1958.
88. Волченко В.Н. Разработка метода испытания сварных соединений пересекающихся стержней. /Сварочное производство, №6, 1965.
89. Пхакадзе Т.И., Шаламберидзе М.Ш., Мгалоблишвили К.Д, Дадунашвили Г.Г. Определение сварочного тока при контактной многоточечной сварке. /Журнал «Измерительная техника» Vol. 53, №8, 2010.- 55-57 с.
90. Грей Э, Метьюз Б.Т. Функции Бесселя и их приложение к физике и механике. – М.: 1959.
91. Оспанова С., Зивзивадзе Л., Шаламберидзе М. К вопросу разработки энергосберегающей технологии сварки арматуры из перекрещивающихся круглых стержней. /III Международная научная конференция «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития», Кутаиси, 2015.10.24-25. - 237-241с.
92. Оспанова С., Зивзивадзе Л., Шаламберидзе М Особенности разработки энергосберегающей технологии изготовления металлической сетки.. /“GEORGIAN ENGINEERING NEWS”, Тбилиси, 2014, 48-51 с.
93. Выбор критерия оценки качества электроконтактной сварки арматуры железобетонной конструкции. /“GEORGIAN ENGINEERING NEWS”, Тбилиси, 2015, 48-50 с.
94. Оспанова С., Хвадигиани А., Шаламберидзе М. Опытное исследование процесса нагрева при электроконтактной сварке перекрещивающихся круглых стержней. /“GEORGIAN ENGINEERING NEWS”, Тбилиси, 2015.- 80-83с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Примеры расчета параметров режима сварки перекрещивающихся круглых стержней малого диаметра.

1. Пример определения минимального тока, необходимого для сварки стержней диаметрами 3+5 мм из низкоуглеродистой стали.

В результате анализа расчетов тепловых процессов при сварке перекрещивающихся круглых стержней, а также проведенных исследований температурного поля при сварке получена следующая зависимость определения сварочного тока:

$$I_{св} = \pi d_1 \sqrt{\frac{m}{2} \cdot \frac{\lambda}{0,24\beta\rho_0} \cdot \arccos \frac{1}{1 + \beta T_{max}}}$$

Коэффициент m для малоуглеродистой стали определяется экспериментально и по нашим опытам для сварки стержней малого диаметра $m=0,6$.

И чем больше его значения тем относительно позже наступает температурное предельное состояние в контакте сварки и тем выше необходимый для сварки ток. При сварке в паре стержней разного диаметра режим сварки определяется по стержням малого диаметра, поэтому для расчета сварочного тока в рассматриваемом случае берем $d_1 = 0,3$ см.

Для малоуглеродистой стали

$$T_{max} = T_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$$

Удельное сопротивление стержней

$$\rho_0 = 13 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Температурный коэффициент

$$\beta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ } 1^{\circ}\text{C}$$

Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = 0,1 \text{ ккал/см} \cdot \text{сек}^{\circ}\text{C}$$

С учетом этих данных

$$I_{св} = \sqrt{\frac{0,6}{2} \cdot \frac{0,1 \cdot 10}{0,24 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \cdot \pi \cdot \arccos \frac{1}{1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}} = 1950 \text{ А.}$$

2. Пример определения усилия сжатия между электродами.

В результате расчета, анализа электрического поля и плотности тока при сварке перекрещивающихся круглых стержней установлено, что плотность тока

$$j_0(\xi_1, \xi_2) = \frac{I}{2\pi r_0^2} \left[\frac{P(\xi_1)}{\xi_1} + \frac{P(\xi_2)}{\xi_2} \right]$$

т.е. при данных размерах контактных площадок плотность тока стержня зависит в основном от продольных размеров площадок ξ_1 и ξ_2 .

$$\xi_1 = \frac{Z_1}{r_0}$$

$$\xi_2 = \frac{Z_2}{r_0}$$

r_0 - радиус поперечного сечения стержня;

Z_1 - размер отпечатка по абсциссу между стержнями при холодном обмятии;

Z_2 - размер отпечатка обмятии между электродами и стержня.

При холодном обмятии стержней 3+5 мм (при давлении 500 дан)

$$Z_1 = 0,5 \text{ мм}$$

$$Z_2 = 5 \text{ мм}$$

Соответственно

$$\xi_1 = \frac{0,5}{2,5} = 0,2$$

$$\xi_2 = \frac{5}{2,5} = 2,0$$

Значения

$$\frac{P(0,2)}{0,2} = \frac{0,5}{0,2} = 2,52$$

$$\frac{P(2,0)}{2,0} = \frac{3,25}{2,0} = 1,625$$

Возьмем из рис. 4.11. плотность тока:

$$j = \frac{1950}{2\pi r_0^2} [2,5 + 1,625] = \frac{1950}{2\pi 1,5^2} \cdot 4,125 = \frac{8043,75}{44,3682} = 569,3 \Delta/\text{мм}^2$$

$$\text{Т.к. } j = \frac{I}{j} = \frac{1950}{569,3} = 3,4$$

Удельное давление $K = 1,28 \text{ НВ}$; $K = 1,28 \cdot 146,6 = 187,6 \text{ дан}/\text{мм}^2$

$$K = \frac{P}{S} = 146,6 \cdot 1,28 = 187,6 \text{дан/мм}^2$$

Усилие между электродами

$$P = K \cdot S = 187,6 \cdot 3,4 = 600 \text{ дан}$$

Таким образом, параметры режима сварки являются:

$$I_{\text{св}} = 1950 \text{ А}; \quad P = 600 \text{ дан}; \quad t_{\text{св}} \leq 4 \text{ сек.}$$