

УДК 621.791.3

## ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ КРОМОК НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ДУГОВОЙ ПАЙКЕ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ

канд. техн. наук, доц. Ю.А. ЦУМАРЕВ

(Белорусско-Российский университет, Могилев);

д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается проблема сохранения защитного цинкового покрытия при дуговой пайке оцинкованной стали тугоплавкими припоями на основе меди. Для выбора оптимального варианта подготовки кромок для дуговой пайки, который в большей мере сохраняет целостность покрытия и его защитные свойства при минимальной ресурсоемкости процесса, проведены расчеты полей рабочих напряжений для паяных соединений как со скосом кромки, так и без него. Установлено, что, используя паяные соединения с угловыми швами, имеющими скос кромки, можно более чем в 2 раза снизить рабочее сечение швов с соответствующим уменьшением затрат и термического воздействия на околошовную зону. Предложены паяные соединения с подготовкой кромок, в которых сечение угловых швов уменьшается по мере удаления от края шва к его середине.

**Введение.** В настоящее время быстрыми темпами расширяется объем применения оцинкованной стали при изготовлении изделий промышленного назначения. Это обусловлено высокой коррозионной стойкостью и сравнительно низкой стоимостью заготовок из этого материала. Соответствующим образом возрастает использование неразъемных соединений из оцинкованной стали. При этом наибольшее применение находит оцинкованная малоуглеродистая сталь толщиной до 5...6 мм [1], а для создания неразъемных соединений достаточно широко применяется дуговая пайка [2, 3], преимущества которой связаны с возможностью понижения температуры процесса не менее чем на 500 °С за счет уменьшения температуры плавления присадочного материала (припоя).

Цинк обеспечивает хорошую защиту поверхностей стальных деталей, однако покрытия из этого материала легко повреждаются при создании неразъемных соединений из-за термического воздействия электрической дуги. Это в первую очередь обусловлено низкой температурой кипения цинка, составляющей 906 °С. Заметную роль играют также процессы испарения и окисления цинка при температурах, превышающих температуру плавления. Поэтому проблема сохранения защитного цинкового покрытия является основной при дуговой пайке оцинкованной стали.

Имеющиеся литературные данные об успешном применении дуговой пайки оцинкованной стали относятся к деталям толщиной порядка 1 мм [3]. С увеличением толщины соединяемых оцинкованных листов увеличивается сечение паяного шва и пропорционально ему возрастает погонная энергия процесса [4]. Влияние величины погонной энергии на нагрев околошовной зоны, а значит, и защитного покрытия проявляется в быстром росте максимальных температур нагрева и продолжительности пребывания точек соединения в опасном с точки зрения сохранности покрытия интервале температур. Чем выше погонная энергия процесса, тем больше повреждается защитное покрытие и тем шире область его выгорания, прилегающая к паяному шву. Для оценки термического влияния на паяемый металл можно воспользоваться известными выражениями, позволяющими рассчитывать размер зоны нагрева, максимальные температуры точек, находящихся в околошовной зоне, а также продолжительность пребывания той или иной точки в опасном интервале температур [5, 6]. При использовании схемы линейного источника тепла в пластине максимальная температура нагрева на расстоянии  $y_0$  определится из выражения, приведенного в работе [5]:

$$T_{max} = T_n + \frac{q}{\sqrt{2\pi\nu\epsilon\delta y_0}} \left(1 - \frac{by_0}{2a}\right), \quad (1)$$

где  $q$  – эффективная мощность источника нагрева;  $\nu$  – скорость сварки;  $\delta$  – толщина пластины;  $\epsilon$  – объемная теплоемкость;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $b$  – коэффициент температуропроводности;  $T_n$  – начальная температура паяемого изделия.

Общая ширина зоны, нагретой выше заданного приращения температур  $\Delta T$  и расположенной по обе стороны от оси шва, может быть найдена по [5]:

$$2l = \frac{q\sqrt{2}}{\nu\epsilon\delta\Delta T}. \quad (2)$$

Длительность пребывания металла при температуре, выше заданной  $T$ , можно приближенно оценить из следующего выражения, приведенного в работе [6]:

$$t_n = \frac{1}{4\pi a(T - T_n)^2} \left( \frac{q}{v\delta_{cp}} \right)^2 \quad (3)$$

Как следует из выражений (1), (2), максимальная температура нагрева и ширина нагретой зоны, прилежащей к паяному шву, прямо пропорционально зависят от величины погонной энергии  $q/v$ . Еще быстрее с ростом погонной энергии увеличивается продолжительность пребывания основного металла с покрытием в опасном интервале температур. Выражение (3) показывает, что эта температура пропорционально квадрату погонной энергии. Таким образом, при двукратном уменьшении погонной энергии можно обеспечить двукратное снижение максимальной температуры нагрева и ширины нагретой зоны при одновременном четырехкратном сокращении времени пребывания материала покрытия в перегретом состоянии.

**Постановка задачи.** В практике дуговой пайки используют нахлесточные и тавровые соединения с угловыми швами, аналогичными сварным. Отличие состоит только в использовании присадочного металла (припоя) с более низкой температурой плавления, чем у стали, а также в отсутствии заметного проплавления основного металла в паяном соединении. Поэтому при пайке угловых швов, так же как и при сварке, могут быть использованы соединения с подготовкой (скосом) кромок и без нее. При этом известно [7], что сварные соединения с угловыми швами, имеющие скос кромки, обладают меньшей площадью поперечного сечения и поэтому требуют меньшей погонной энергии для их выполнения.

Чтобы предложить оптимальный вариант подготовки кромок для дуговой пайки, который в большей мере сохраняет целостность покрытия и его защитные свойства при минимальной ресурсоемкости процесса, нами были проведены расчеты полей рабочих напряжений для паяных соединений как со скосом кромки, так и без него. Один из сравниваемых вариантов представлял тавровое паяное двустороннее соединение без скоса кромки с катетом 6 мм. Другой – паяное соединение со скосом кромки под углом  $45^\circ$ , величину которого выбрали из условия доступа горелки к корню выполняемого шва [7]. В обоих случаях в качестве припоя использован сплав на основе меди. Глубину скоса выбрали таким образом, чтобы площади разрушения в обоих вариантах были одинаковы, используя для этого следующую формулу [8]:

$$0,707K = \frac{b \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

где  $K$  – катет углового паяного шва в соединении, не имеющем скоса;  $b$  – глубина скоса;  $\alpha$  – угол скоса.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Для прочностных расчетов был использован метод конечных элементов и пакет программ «COSMOS», мощные функциональные возможности которого позволяют решать проблемы, связанные со сходимостью вычислительного процесса. Расчетная схема показана на рисунке 1. Результаты расчета проиллюстрированы рисунком 2.

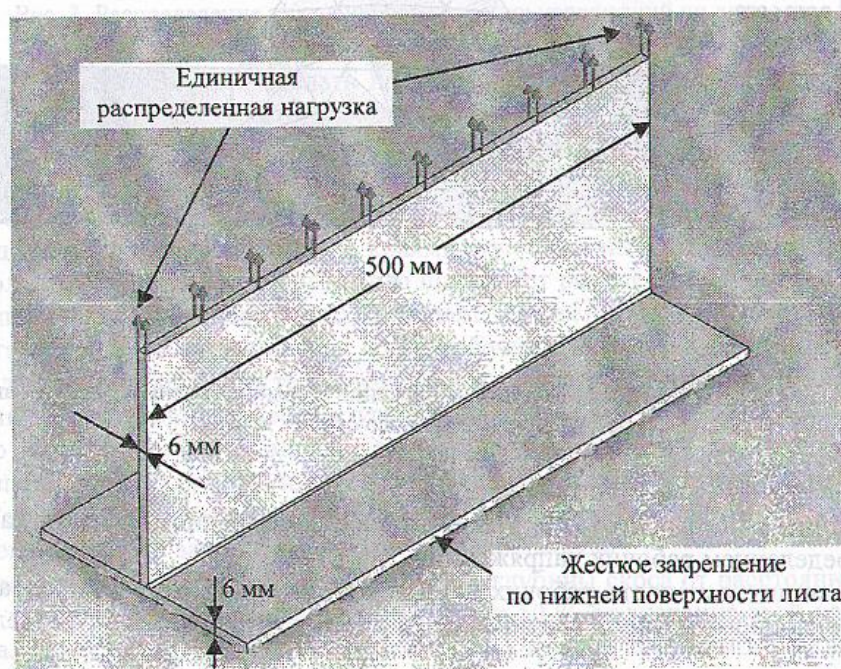


Рис. 1. Расчетная схема таврового паяного соединения

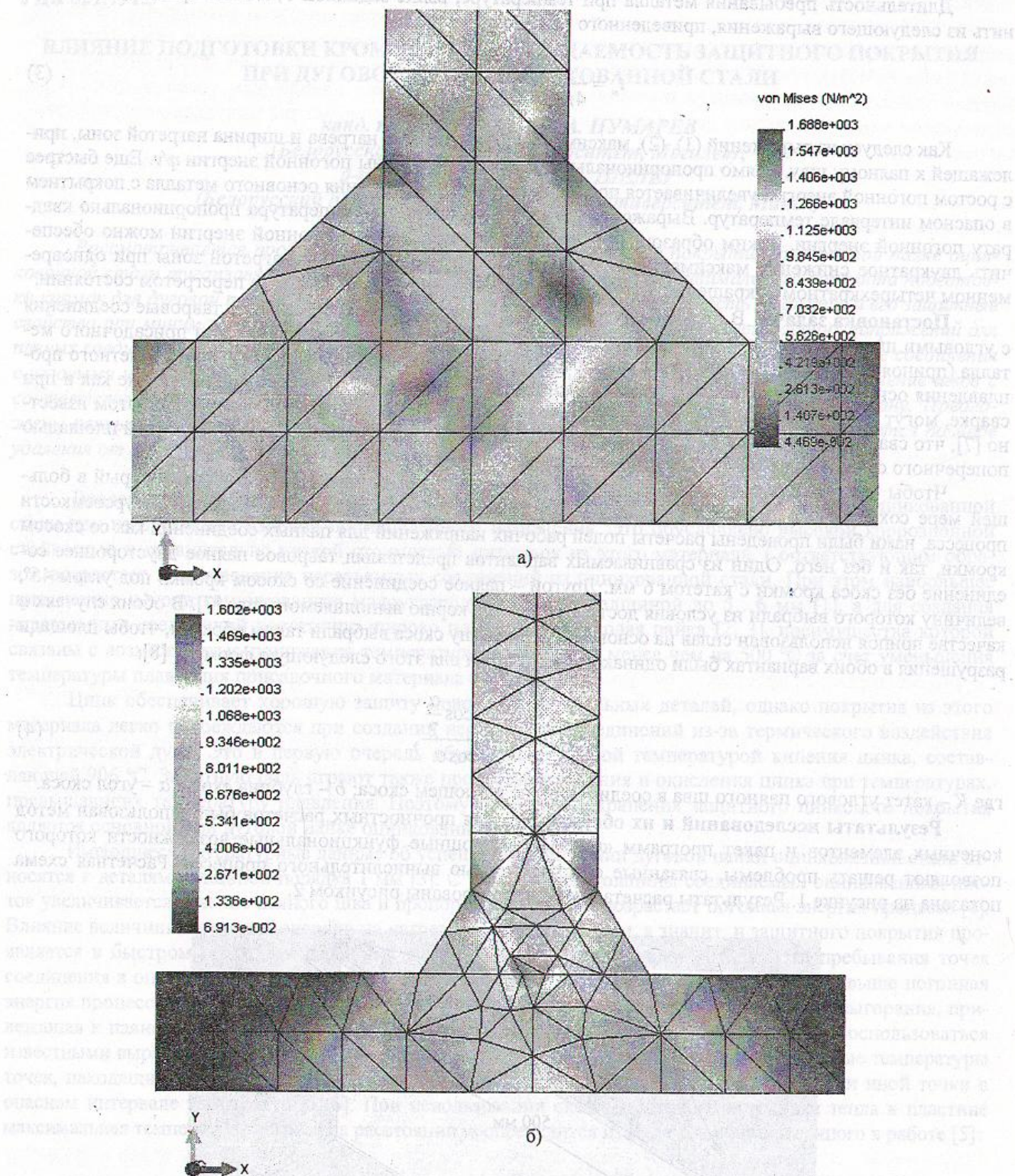


Рис. 2. Распределение интенсивности рабочих напряжений в паяном соединении с угловыми швами:  
а – без скоса кромок; б – со скосом кромок

Результаты расчета (см. рис. 2) показали:

- паяное соединение без подготовки кромок в своем поперечном сечении характеризуется неравномерным распределением рабочих напряжений;
- максимальная интенсивность рабочих напряжений имеет место в зоне сплавления, а также в месте перехода от основного металла вертикального листа к угловому шву. Ее величина составляет 1550...1650 Па;
- в соединении со скосом кромок области концентрации напряжений имеют меньшую протяженность, а уровень максимальных напряжений несколько ниже, чем в соединении без подготовки

кромки. По данным проведенного расчета он составляет 1400...1450 Па, что на 10...15 % ниже уровня, характерного для соединения без скоса кромки. Следует также отметить, что во втором варианте практически полностью устранена концентрация рабочих напряжений в опасной зоне, прилежащей к корню углового шва.

Важным для теории и практики дуговой пайки оцинкованной стали результатом является то, что одновременно с некоторым уменьшением уровня рабочих напряжений в паяном соединении обеспечено снижение площади поперечного сечения углового шва с величины 18 мм<sup>2</sup> до 8,66 мм<sup>2</sup>, т.е. более чем в 2 раза. Как было показано выше, это позволяет выполнять дуговую однопроходную пайку с вдвое меньшим уровнем погонной энергии и соответствующим образом снизить термическое воздействие на материал покрытия.

В результате проведенных расчетов было установлено, что рабочие напряжения неравномерно распределены и по длине углового шва. Как показано на рисунке 3, средняя часть шва длиной примерно 80...85 % от его общей длины находится под действием напряжений, уровень которых значительно (в 1,6 раза) ниже их величины в крайних точках.

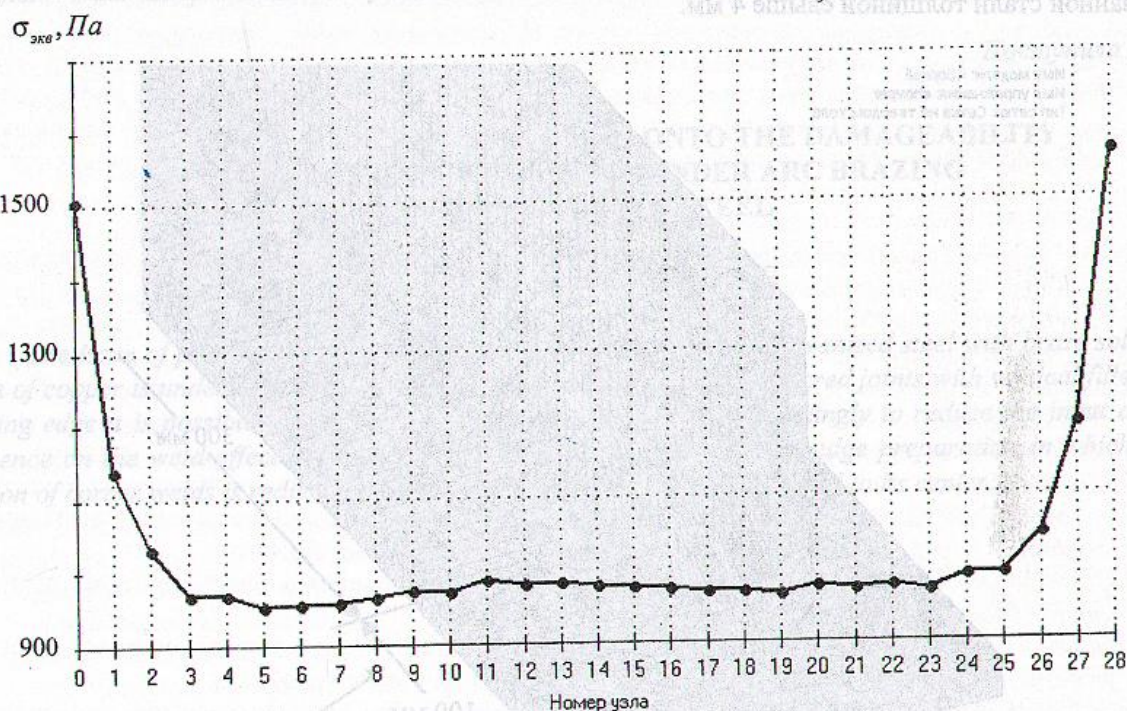


Рис. 3. Распределение интенсивности рабочих напряжений по длине шва

Результаты расчетов позволили сделать предположение о целесообразности использования паяных соединений с угловыми швами, у которых катет и, соответственно, рабочее сечение уменьшаются по мере удаления от края шва к его середине. Такое паяное соединение показано на рисунке 4. Это соединение, не имеющее подготовки кромок, выполняется таким образом, чтобы средняя часть шва длиной около 60 % от общей его протяженности имела катет 4 мм. При этом края шва имеют катет величиной 6 мм, а на участках, соединяющих среднюю часть с краями, катет плавно изменяется по линейному закону. Соответственно большая (средняя) часть углового шва имеет рабочее сечение в 2,25 раза меньше, чем у аналогичного по прочности шва с постоянным сечением. В таком паяном соединении требуемая несущая способность достигается за счет выравнивания полей рабочих напряжений при минимальном объеме наплавленного металла и меньшем уровне термического воздействия на покрытие.

Однако техника выполнения подобных угловых швов достаточно сложна и характеризуется низкой стабильностью геометрических размеров. Это обусловлено отсутствием ориентиров, необходимых для точного управления процессом пайки. Поэтому предложено использовать подготовку кромок, которая обеспечила бы переменное сечение угловых швов за счет переменной глубины скоса кромки.

Были рекомендованы три варианта выполнения таких скосов:

- первый характеризуется линейной зависимостью глубины скоса от расстояния до края шва. При этом минимальная глубина скоса в центре шва составляет 50 % от значения этой величины, имеющего место на краю шва. Такая схема изменения глубины скоса кромки соответствует квадратичной зависимости сечения шва от расстояния до его центра, причем минимальное значение площади поперечного сечения составляет 25 % от максимального;

- второй характеризуется постоянной глубиной скоса в средней части шва, длина которой составляет 50...70 % от его общей длины. Глубина скоса здесь в 1,5 раза меньше ее максимальной величины;

- третий отличается простотой выполнения скоса. При его выполнении получают три участка, на каждом из которых глубина скоса постоянна. Два одинаковых крайних участка имеют длину по 15...20 % от общей длины паяного шва. Глубина скоса в средней части длиной 60...70 % от общей длины шва в 1,5 раза меньше, чем на краю соединения. Поэтому основная часть паяного шва, длина которой составляет 60...70 %, имеет поперечное сечение в 2,25 раза меньшее, чем у шва постоянного сечения.

Все эти варианты обеспечивают уменьшение объема углового шва примерно на 35 % по сравнению с паяным швом, у которого скос кромки постоянной глубины. Соответствующим образом сокращаются затраты и термическое воздействие на околошовную зону, при котором уменьшается повреждение защитного цинкового покрытия. При сравнении с пайкой без подготовки кромок сокращение ресурсоемкости составляет 55...60 %. Все это достигнуто без снижения несущей способности паяного соединения, за счет выравнивания полей напряжений. Таким образом, полученные результаты и предложенные технические решения по конструкциям скоса кромок создают предпосылки для использования дуговой пайки оцинкованной стали толщиной свыше 4 мм.

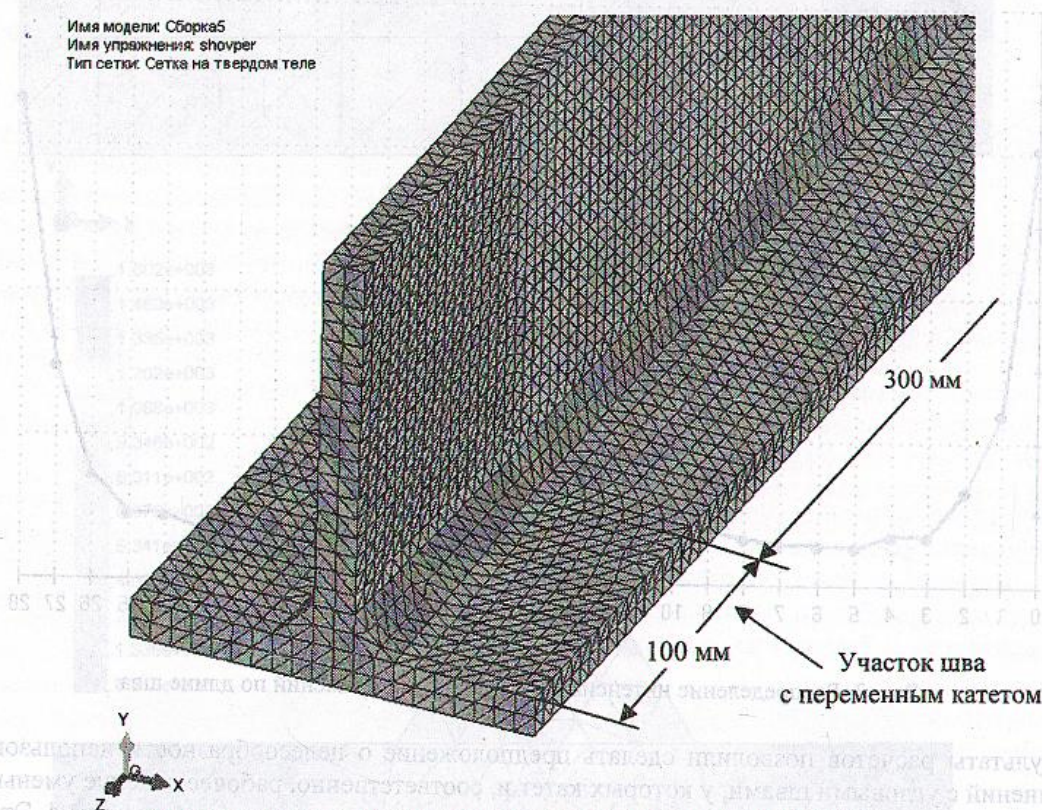


Рис. 4. Схема паяного соединения с катетом переменной величины

#### Выводы:

- 1) показано, что за счет подготовки кромок при дуговой пайке оцинкованной стали можно не менее чем в 2 раза сократить рабочее сечение угловых швов и соответствующим образом уменьшить погонную энергию процесса и термическое воздействие его на защитное цинковое покрытие;
- 2) предложены конструкции паяных соединений с угловыми швами для дуговой пайки оцинкованных сталей, которые характеризуются скосом кромок с глубиной, уменьшающейся по мере удаления от края шва к его середине;
- 3) установлено, что при выполнении паяных соединений, имеющих скос кромки переменной глубины, достигается уменьшение объема паяного шва на 35 % и соответствующее сокращение ресурсоемкости процесса без снижения несущей способности соединения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Слуцкая, Т.М. Полуавтоматическая сварка оцинкованного металла голый легированной проволокой / Т.М. Слуцкая, А.А. Тюрин // Автоматическая сварка. – 1970. – № 3.

2. Миддельдорф, К. Тенденции развития технологий соединения материалов / К. Миддельдорф, Д. фон Хоффе // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 39 – 47.
3. Дуговая пайка тонколистовой низкоуглеродистой стали / В.Ф. Хорунов [и др.] // Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие: тез. стенод. докл. междунар. науч.-техн. конф., Киев, 24 – 26 нояб. 2008 г.; ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – Киев, 2008. – С. 112.
4. Куликов, В.П. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В.П. Куликов. – Минск: Экоперспектива, 2003. – 415 с.
5. Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.
6. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
7. Иващенко, Т.А. Уменьшение массы наплавленного металла угловых швов тавровых соединений с разделкой кромок / Т.А. Иващенко, Н.С. Снежков // Сварочное производство. – 1991. – № 8. – С. 14 – 15.
8. Паяное соединение внахлестку: пат. 5134 Респ. Беларусь, МПК(2006) В 23 К 3/00 / С.К. Павлюк, Ю.А. Цумарев, А.В. Лупачев, Е.Н. Цумарев. – № и 20080487; заявл. 17.06.08; опубл. 30.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.

Поступила 07.05.2009

### THE EFFECT EDGE PREPARATION ONTO THE DAMAGEABILITY OF PROTECTIVE COVERING UNDER ARC BRAZING OF GALVANIZED STEEL

J. TSUMAREV, V. SHELEG

*The issue of preservation of zinc coating under arc brazing of galvanized steel with braze solders on the basis of copper is under consideration. It was established that using soldered joints with vertical fillet weld with canting edge it is possible to halve the weld throat area and correspondingly to reduce the input and thermal influence on the weld-affected zone. Suggested soldered joints with the edge preparation in which the cross-section of corner welds is reduced while distancing from the edge of the weld to its center.*