

621.791  
К 906

Министерство высшего и среднего специального образования СССР  
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Инженер Кульневич Т.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И  
ЭНЕРГОЕМКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ  
ВЛИЯНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Специальность 05.167 —  
"Машины и технология сварочного производства"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1970

ЧПИ

621.791.05:539.4

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства".

Научный руководитель работы - доктор технических наук, профессор БАКШИ О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор СТЕПАНОВ В.В. и старший научный сотрудник, кандидат технических наук ПРОН Р.З.

Ведущее предприятие - Челябинский станкостроительный завод им.С.Орджоникидзе.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета механико-технологического факультета по присуждению учёных степеней или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах (отзыв направляется в 2-х экземплярах, заверенных печатью).

Автореферат разослан 11 сентября 1970 г.

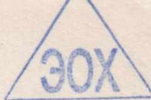
Защита диссертации состоится 21 октября 1970 года на заседании Совета по присуждению учёных степеней при механико-технологическом факультете Челябинского политехнического института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Наш адрес: г.Челябинск-44, проспект им.В.И.Ленина, 76, Политехнический институт, Совет по присуждению учёных степеней при механико-технологическом факультете.

ПРЕДСЕДТЕЛЬ СОВЕТА -

*Харин С.Ф.* (Харин С.Ф.)



Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Инженер Кульневич Т.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И  
ЭНЕРГОЕМКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ  
ВЛИЯНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Специальность 05.167 —

"Машины и технология сварочного производства"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1970

ЧЕЛЯБИНСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства".

Научный руководитель работы - доктор технических наук, профессор БАКЛИИ О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор СТЕПАНОВ В.В. и старший научный сотрудник, кандидат технических наук ШРОН Р.З.

Ведущее предприятие - Челябинский станкостроительный завод им.С.Орджоникидзе.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета механико-технологического факультета по присуждению учёных степеней или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах (отзыв направляется в 2-х экземплярах, заверенных печатью).

Автореферат разослан 16 сентября 1970 г.

Защита диссертации состоится 21 октября 1970 года на заседании Совета по присуждению учёных степеней при механико-технологическом факультете Челябинского политехнического института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Наш адрес: г.Челябинск-44, проспект им.В.И.Ленина, 76, Политехнический институт, Совет по присуждению учёных степеней при механико-технологическом факультете.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА -

доцент, к.т.н.

*Графиня* (Харин С.Ф.)

Стремление снизить вес конструкции, не уменьшая, а иногда и увеличивая ее работоспособность, заставляет искать пути применения новых высокопрочных материалов и усовершенствования методов расчета прочности.

Если в недалеком прошлом конструкторы при выборе материала интересовались преимущественно основной расчетной характеристикой стали — ее пределом текучести, то в настоящее время, когда при выполнении расчетов прочности используется метод предельных состояний, основанный на анализе упруго-пластического состояния, требуется учитывать и другие характеристики металла, прежде всего, характеристики его пластичности.

Анализ поведения сварных соединений в условиях упруго-пластического деформирования проводился О.А.Бакши, В.А.Винокуровым, В.С.Касаткиным, С.А.Куркиным, А.М.Макарой, Г.П.Михайловым, Д.И.Навроцким, Г.А.Николаевым, Н.О.Окербломом и др.

В последние годы в работах О.А.Бакши, Л.М.Качанова, А.Н.Монашкова, А.Л.Немчинского, Н.О.Окерблома, Р.З.Шрона и др. были рассмотрены особенности поведения сварных соединений при упруго-пластической деформации с учетом фактора механической неоднородности. Было показано, что при растяжении и изгибе в сварных соединениях с относительно тонкой мягкой прослойкой в результате совместной деформации различных по своим свойствам участков на стадии пластической деформации в прослойке развивается объемное напряженное состояние с тремя растягивающими компонентами нормальных напряжений. При этом жесткость напряженного состояния увеличивается по мере уменьшения относительной толщины мягкой прослойки. Указанное явление обуславливает существенно иное поведение сварных соединений по сравнению с однородным металлом в таких же условиях деформирования. Учет изменения напряженного состояния в отдельных участках сварного соединения, вызванного механической неоднородностью последнего, позволяет существенно уточнить расчетные методы оценки прочности сварных конструкций и повысить их эксплуатационную надежность. В упомянутых работах получены количественные зависимости для приближенной оценки прочностных характеристик сварных соединений с плоской мягкой прослойкой. Сопоставление полученных различными авторами экспериментальных значений прочности сварных соединений с этими рас-

четными формулами показало, что в определенном интервале значений относительной толщины прослойки  $\kappa$  сходимость расчета с экспериментом зависит от степени механической неоднородности соединения, оцениваемой величиной  $\kappa_{\epsilon} = \frac{\sigma_{\epsilon}^T}{\sigma_{\epsilon}^M}$ , где  $\sigma_{\epsilon}^T$  и  $\sigma_{\epsilon}^M$  - временное сопротивление соответственно твердого и мягкого металлов. В связи с этим возникает необходимость учета степени механической неоднородности в формулах для расчетной оценки прочности.

Нужно отметить также, что на практике часто встречаются мягкие прослойки, имеющие не плоскую, а сложную фигурную форму, например X-образные, V-образные, K-образные швы. Представляет интерес проанализировать влияние формы мягкого шва и его геометрических параметров на прочность и деформационную способность сварного соединения.

В ряде случаев имеется необходимость расчетной оценки не только прочностных, но и пластических свойств соединений с мягкой прослойкой.

Цель настоящей работы состояла в дальнейшем исследовании работоспособности сварных соединений в направлениях:

- а) разработки методики количественного учета влияния степени механической неоднородности на прочность сварного соединения;
- б) изучения влияния геометрических параметров мягкого шва на работоспособность сварного соединения;
- в) развития методов расчетной оценки пластичности и энергоемкости сварных соединений при растяжении.

Работа состоит из четырех глав. Кроме выводов по каждой главе, в конце работы приводятся общие выводы и практические рекомендации.

ПЕРВАЯ ГЛАВА диссертации содержит обзор литературы, касающейся причин возникновения механической неоднородности сварных соединений и ее влияния на их работоспособность. Рассматриваются современные представления о влиянии геометрии разделки шва и степени механической неоднородности на работоспособность сварных соединений.

Показано, что характер и степень механической неоднородности сварных соединений зависят от химического состава свариваемых материалов, их исходного состояния, способа и режимов сварки, режима последующей термической обработки и т.д. При этом

прочность сварных соединений в значительной мере определяется относительной толщиной мягкой прослойки  $\alpha$ , под которой понимается отношение толщины прослойки к толщине (диаметру) соединяемых деталей.

По мере уменьшения толщины мягкой прослойки прочность соединения возрастает, в связи с увеличением действия контактного упрочнения. При этом в зависимости от механических свойств металла прослойки и ее относительной толщины разрушение может носить вязкий или хрупкий характер.

Большое влияние на поведение сварных соединений при нагружении, особенно на величину и характер распределения пластических деформаций, оказывает степень их механической неоднородности.

Повышение жесткости напряженного состояния в прослойке сопровождается смягчением напряженного состояния в прилегающем более твердом металле, поэтому пластические деформации твердого металла могут начаться при средних напряжениях меньших его предела текучести в условиях свободного деформирования.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ диссертации выполнен теоретический и экспериментальный анализ влияния степени и характера механической неоднородности на прочность сварных соединений.

Рассмотрено два основных случая:

а) соединение состоит только из мягкой прослойки (шва) и твердого основного металла, например соединения, прошедшие после сварки термическую обработку;

б) соединения характеризуемые наличием по обе стороны мягкого шва околошовной зоны с более высокими прочностными свойствами по сравнению с основным металлом.

Как показал анализ литературных данных и анализ проведенных автором экспериментов, интервал значений  $\alpha$ , в котором расчет по обычным формулам контактного упрочнения хорошо совпадает с экспериментальными значениями тем шире, чем больше отличается свойства прослойки от свойств основного металла, т.е. чем ближе фактические условия испытания к принятой при выводе формул схеме. Однако при уменьшении  $\alpha$ , начиная с некоторого  $\alpha = \alpha_p$ , наблюдается неполная реализация контактного упрочнения, которая проявляется особенно заметно в соединениях, не имеющих в своем сос-

таве подкрепляющих шов участков более прочных, чем основной металл.

Основной причиной неполной реализации эффекта контактного упрочнения, как показано в работе, является вовлечение в пластическую деформацию прилегающих к шву участков более прочного металла, в результате чего ослабляется сдерживание им деформаций прослойки.

Для количественной оценки степени реализации контактного упрочнения в зависимости от механической неоднородности соединений было изготовлено II партий образцов компактного сечения с плоскими прослойками, отличавшихся друг от друга величиной  $k_e = \frac{\sigma_r}{\sigma_g}$ , а также наличием или отсутствием подкрепляющих участков, в качестве которых выступала зона термического влияния (ЗТВ). Девять партий образцов, прошедших термическую обработку после сварки имели  $k_e = 1,03 + 2,1$ . В двух партиях образцы испытывались в исходном после сварки состоянии, величина  $k_e$  у них составляла I,II и I,67, а  $k'_e = \frac{\sigma_{e'}^{\text{ЗТВ}}}{\sigma_e}$  была равна I,75 в обоих случаях.

Для того, чтобы в расчетных формулах учесть неполную реализацию контактного упрочнения, введено понятие о коэффициенте реализации теоретической прочности  $k_p$ , под которым понимается отношение фактической прочности соединения к теоретической в той области, где действует контактное упрочнение.

Как показала статистическая обработка опытных данных, величина  $k_p$  находится в тесной корреляции с параметром, представляющим собой отношение прочности твердого металла к той теоретической вязкой прочности прослойки, которую она имела бы, будучи скрепленной с идеально-упругими твердыми частями. Минимальное значение коэффициент реализации  $k_p^{\text{min}}$  имеет при  $\alpha = \alpha_e$ , когда теоретическая прочность прослойки равна временному сопротивлению прилегающего твердого металла.

Для приближенного построения кривой прочности прослойки с учетом степени реализации ее контактного упрочнения достаточно знать величину  $\alpha_p$  и  $k_p^{\text{min}}$ , а также уровень прочности прилегающего к прослойке металла  $\sigma_g^r$ . Зависимости для определения  $\alpha_p$  и  $k_p^{\text{min}}$  образцов компактного сечения из углеродистых и низколегированных сталей, полученные с помощью статистической



обработки в настоящей работе, имеют следующий вид:

$$\alpha_p = \frac{0,12 K_g + 0,08}{0,53 K_g - 0,35}, \quad (1)$$

$$K_p^{\min} = 1,25 - 0,25 K_g. \quad (2)$$

Таким образом, применительно к случаю статического растяжения формулу для оценки вязкой прочности мягкой прослойки в общем виде можно записать так:

$$\sigma_g = \sigma_g^m \cdot K_{\alpha} \cdot K_p, \quad (3)$$

где  $K_{\alpha}$  - коэффициент контактного упрочнения, равный для компактного сечения  $\frac{9l}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\alpha}$ , для пластин  $\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\frac{9l}{4} + \frac{1}{4\alpha}\right)$ .

Сопоставление экспериментальных значекий прочности образцов тех партий, которые не использовались при статистической обработке, а также данных других авторов, в том числе зарубежных (К. Сато, Т. Дои и М. Тойода), с рассчитанными по формулам (1) + (3) показало, что с введением коэффициента реализации  $K_p$  заметно улучшилась сходимость теоретических и опытных значений прочности механически неоднородных сварных соединений.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ диссертации рассматривается влияние геометрических параметров разделки на прочность при статическом растяжении сварного соединения с мягким швом.

Учет влияния геометрии мягкого шва на вязкую прочность сварных соединений предлагается производить по формулам для плоской прослойки с подстановкой в них вместо  $\alpha$  приведенного (эквивалентного) значения  $\alpha = \frac{F_w}{d^2}$  ( $F_w$  - площадь поперечного сечения шва,  $d$  - толщина соединяемых деталей).

Экспериментальная проверка производилась на 6 партиях образцов компактного сечения и пластин, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей толщиной 10, 16, 20 и 30 мм. Степень механической неоднородности указанных образцов изменялась в пределах  $K_{\alpha} = 1,1 \div 2,2$ . Угол разделки кромок изменялся от 0 до 90°, зазор в корне шва - от 0,1 до 15,0 мм. Варьировалось также положение корня шва по высоте сечения. Для изуче-

ния распределения пластических деформаций на образцы накатывались делительные сетки по методу Я.Б.Фридмана и Т.К.Зиловой.

При определении  $\sigma_g^m$  учитывалось изменение свойств металла шва с уменьшением  $\alpha$ , вызываемое различной долей участия основного металла в шве, а также изменением условий формирования структуры шва.

Результаты испытаний образцов показали удовлетворительную сходимость расчета и опыта. Расчетные значения определяли с учетом  $k_p$ .

Показано, что форма и геометрические параметры сварного шва, металл которого обладает пониженным по сравнению с основным металлом временным сопротивлением, оказывают существенное влияние на прочность сварного соединения. В области действия контактного эффекта вязкая прочность соединений по мере уменьшения угла раскрытия кромок или зазора в корне шва возрастает, что объясняется уменьшением  $\alpha$ , и, следовательно, увеличением контактного эффекта.

В то же время при чрезмерном сокращении сборочного зазора и угла раскрытия разделки увеличивается опасность появления хрупкого разрушения, даже в швах, заваренных вязким материалом, особенно при наличии в них дефектов.

Показано, что влияние дефектов зависит от их расположения. Дефекты, находящиеся в наиболее узкой части шва, в большей степени способствуют хрупкому разрушению, чем дефекты такой же величины, но расположенные в широкой части.

На прочность соединения с мягким швом оказывает влияние положение притупления по высоте сечения. При одинаковых параметрах разделки, (зазор, угол раскрытия, притупление), наибольшей прочностью обладают соединения с симметричным X-образным швом, наименьшей - соединения с V-образной разделкой. Это обстоятельство также объясняется изменением величины  $\alpha$ , эти швов, а следовательно, и различной степенью действия контактного эффекта. Поэтому, когда соображения прочности являются главенствующими при выборе соединения, целесообразно назначать швы с X-образной разделкой. Надо также иметь в виду, что эти швы вызывают наименьшие по сравнению с другими разделками деформации соединений и наименьший расход электродных материалов.

В главе приводятся экспериментальные данные, подтверждающие влияние степени компактности сечения образцов на прочность механически неоднородных сварных соединений. Показано, что с увеличением степени компактности сечения прочность соединения, характеризуемая величиной  $\sigma_c$ , снижается.

Это обстоятельство необходимо учитывать при проведении контрольных испытаний соединений с мягким швом путем изготовления из них образцов с соответствующей компактностью сечения. Указанное замечание целесообразно учесть в ГОСТах, нормалях и технических условиях на испытания сварных соединений.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА диссертации посвящена исследованию деформационной способности и энергоемкости сварных соединений с мягким швом при растяжении и получению расчетных зависимостей для определения этих важных характеристик сварного соединения.

В предыдущих работах, посвященных сварным соединениям с мягкой прослойкой, была установлена качественная картина зависимости деформационной способности и энергоемкости соединения от параметра  $\alpha$ . Однако до настоящего времени не было сделано попыток получения расчетных формул для оценки пластичности и энергоемкости таких сварных соединений.

При выводе указанных расчетных зависимостей были приняты следующие допущения, базирующиеся на накопленных экспериментальных данных:

а) истинное сопротивление мягкой прослойки разрыву  $S_k$  не зависит от величины  $\alpha$ ;

б) закон контактного упрочнения распространяется на любую степень пластической деформации мягкой прослойки.

Записывая условие  $S_k = S_k^m$  в виде  $\frac{\sigma_k \cdot K_\alpha}{1 - \psi_k} = \frac{\sigma_k^m}{1 - \psi_k^m}$ , получаем следующие формулы для оценки относительного сужения мягкой прослойки  $\psi_k$ , работающей в составе сварного соединения: для образцов компактного сечения

$$\psi_k^{kc} = 1 - \left( \frac{\sigma_1}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\alpha} \right) (1 - \psi_k^m), \quad (4)$$

для пластин

$$\psi_k^m = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sigma_1}{4} + \frac{1}{4\alpha} \right) (1 - \psi_k^m). \quad (5)$$

Здесь  $\Psi_k^m$  - относительное сужение металла мягкой прослойки, испытанного в свободном состоянии.

Как видно из формул (4) и (5), пластичность мягкой прослойки, оцениваемая величиной ее относительного сужения, в значительной степени зависит от величины параметра  $\alpha$ , причем с уменьшением  $\alpha$  величина  $\Psi_k$  также уменьшается, что полностью согласуется с представлениями о характере работы мягкой прослойки в составе механически неоднородного сварного соединения.

Следует особо подчеркнуть, что формулы (4) и (5) справедливы в том диапазоне значений  $\alpha$ , где действует контактное упрочнение, а разрушение происходит вязко. В области, где контактное упрочнение отсутствует, величина  $\Psi_k$  полностью определяется исходными пластическими свойствами металла мягкой прослойки  $\Psi_k^m$ .

Экспериментальная проверка формул производилась на 17 партиях образцов, имевших различную степень механической неоднородности и прослойки (швы) различной формы.

Кроме того, справедливость указанных формул была проверена на многочисленных экспериментах других авторов, в том числе зарубежных. Во всех случаях получена удовлетворительная сходимость опыта с расчетом.

При выводе формул для расчетной оценки относительного удлинения было принято, что в процессе деформации образующая внешней поверхности шейки образца приобретает форму квадратичной параболы, а разрушение прослойки происходит по середине длины шейки. Как показал анализ литературных данных и экспериментальные данные автора, такие допущения для не слишком тонких прослоек и не очень больших значений  $\kappa_g$  вполне справедливы.

Для случая, когда степень механической неоднородности велика так, что основной металл не вовлекается в пластическую деформацию, относительное удлинение мягкой прослойки в составе сварного соединения определяется следующими формулами, полученными из условия сохранения объема прослойки в процессе пластической деформации:

для соединений компактного сечения

$$\left(\delta_k^{np}\right)^{\kappa_g} = \frac{15}{3 + 4 \sqrt{\left(\frac{57}{4} + \frac{1}{2\sqrt{3}\alpha}\right)(1 - \Psi_k^m)} + 8 \left(\frac{57}{4} + \frac{1}{2\sqrt{3}\alpha}\right)(1 - \Psi_k^m)} - 1, \quad (6)$$

для пластин

$$\left(\delta_{\kappa}^{np}\right)^{na} = \frac{3}{1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right) (1 - \psi_{\kappa}^m)} - 1 \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) видно, что при равных условиях относительное удлинение мягкой прослойки в основном зависит от двух параметров - исходной пластичности мягкого металла, характеризуемой величиной  $\psi_{\kappa}^m$ , и от величины  $\alpha$ . С увеличением  $\psi_{\kappa}^m$  относительное удлинение увеличивается, с уменьшением  $\alpha$  величина  $\delta_{\kappa}^{np}$  уменьшается, что обусловлено усилением действия контактного эффекта, зависящего от параметра  $\alpha$ .

Следует отметить, что формулы (6) и (7) справедливы лишь в области значений  $\alpha$ , где действует контактный эффект и при вязком характере разрушения. Они также применимы только до некоторого максимального значения относительной толщины мягкой прослойки  $\alpha_{\kappa p}^{max}$ , при которой шейка в момент разрыва занимает всю длину прослойки, равную  $2d_0$ .

Формулы для определения относительного удлинения всего сварного соединения имеют вид

для компактного сечения

$$\delta_{\kappa}^{kc} = \frac{1}{n} \left\{ \left[ \frac{15}{3(1-\psi_i^T) + 4\sqrt{\kappa_{\alpha}(1-\psi_{\kappa}^m)(1-\psi_i^T)} + 8\kappa_{\alpha}(1-\psi_{\kappa}^m)} - 1 \right] \alpha + (n-\alpha) \delta_i^T \right\}, \quad (8)$$

для пластин

$$\delta_{\kappa}^{na} = \frac{1}{n} \left\{ \left[ \frac{3}{(1-\psi_i^T) + 2\kappa_{\alpha}(1-\psi_{\kappa}^m)} - 1 \right] \alpha + (n-\alpha) \delta_i^T \right\}, \quad (9)$$

где  $\psi_i^T$  и  $\delta_i^T$  - соответственно относительное уменьшение площади поперечного сечения и относительное удлинение твердого основного металла, соответствующее данной степени нагружения;

$\kappa_{\alpha}$  - коэффициент контактного упрочнения;

$n = \frac{l_0}{d_0}$  - кратность образца.

Если основной металл в пластической деформации не участвует, то  $\delta_i^T$  и  $\psi_i^T$  обращаются в нуль.

Из формул (8) и (9) видно, что относительное удлинение механически неоднородных сварных соединений с мягкой прослойкой в значительной степени зависит от того, вовлекается или нет в

пластическую деформацию твердый основной металл. Кривые зависимости величины  $\delta_k$  от  $\kappa$  для таких соединений всегда имеют минимум, который для каждого соотношения прочностных и пластических свойств твердого и мягкого металлов имеет свое значение. При уменьшении  $\kappa$  до этого минимума, относительное удлинение в основном определяется пластичностью прослойки и действием контактного эффекта. При дальнейшем уменьшении  $\kappa$  относительное удлинение соединения возрастает от этого минимума, вследствие вовлечения в пластическую деформацию основного металла.

Экспериментальная проверка зависимостей осуществлялась на тех же 17 партиях образцов с плоскими и фигурными прослойками, которые были использованы для оценки  $\Psi_k$ . Кроме того, было проведено сравнение с опытными данными других авторов. Во всех случаях получена удовлетворительная сходимость расчета с опытом.

Для упрощенного расчета энергоемкости сварных соединений с мягкой прослойкой условная диаграмма нагружения  $\sigma(\delta)$  заменена на эквивалентную ей по площади диаграмму идеально упруго-пластичного материала. Эквивалентное напряжение приближенно определялось по формуле

$$\sigma_s = \frac{\sigma_s \cdot \delta_k + \sigma_T (\delta_k + \delta_T)}{2 \delta_k + \delta_T} \quad (10)$$

Энергоемкость сварного соединения для случая, когда основной металл не вовлекается в пластическую деформацию, выражается следующей зависимостью:

$$A = \sigma_s^{np} \nu^{np} (\delta_k^{np} + 0,5 \delta_T^{np}) + \frac{(\sigma_s^m)^2}{2 E^T} \kappa_{\kappa}^2 \nu^T \quad (11)$$

В случае, когда основной металл вовлекается в пластическую деформацию энергоемкость сварного соединения выражается в виде:

$$A = \sigma_s^{np} \nu^{np} (\delta_k^{np} + 0,5 \delta_T^{np}) + \sigma_{vi}^T \cdot \nu^T (\delta_i^T + 0,5 \delta_T^T) \quad (12)$$

В формулах (11) и (12):

$$\sigma_s^{np} = \frac{\sigma_s^m \delta_k^{np} + \sigma_T^m (\delta_k^{np} + \delta_T^{np})}{2 \delta_k + \delta_T} \cdot \kappa_{\kappa};$$

$\nu^{np}$  и  $\nu^T$  — соответственно объемы металла прослойки и твердого основного металла;

$\delta_{\kappa}^{\text{пр}}$  - относительное удлинение прослойки, определенное по формулам (6) и (7);

$E^{\Gamma}$  - модуль упругости твердого металла;

$$\sigma_{\text{дл}}^{\Gamma} = \frac{\sigma_{\text{с}}^{\text{м}} \kappa_{\text{с}} \delta_{\text{дл}}^{\Gamma} + \sigma_{\text{с}}^{\Gamma} (\delta_{\text{дл}}^{\Gamma} + \delta_{\text{с}}^{\Gamma})}{2 \delta_{\text{дл}}^{\Gamma} + \delta_{\text{с}}^{\Gamma}}$$

Из анализа формул (II) и (I2) можно видеть, что энергоемкость рассматриваемых соединений также существенно зависит от параметра  $\kappa$ .

В области отсутствия контактного эффекта  $\kappa > \kappa_{\text{кр}}$  по мере уменьшения  $\kappa$  энергоемкость также должна уменьшаться, так как при этом сокращается объем пластически деформируемого мягкого металла.

В области  $\kappa < \kappa_{\text{кр}}$  с уменьшением  $\kappa$  энергоемкость мягкой прослойки  $A_{\text{пр}}$  будет продолжать уменьшаться. Это обстоятельство вызвано не только дальнейшим уменьшением базы пластической деформации  $\nu^{\text{пр}}$ , но и снижением относительного удлинения прослойки  $\delta_{\kappa}^{\text{пр}}$ , связанным с усилением действия контактного эффекта. Увеличение прочности соединения в этой области несколько уменьшает темп падения величины  $A_{\text{пр}}$ , но не перекрывает смещения пластических свойств прослойки. Что же касается энергоемкости сварного соединения в целом, то она в области  $\kappa < \kappa_{\text{кр}}$  во многом будет зависеть от величины и соотношения механических характеристик основного металла и металла мягкой прослойки.

При некотором значении  $\kappa$  наступает такой момент, когда снижение энергоемкости соединения  $A$ , связанное с уменьшением энергоемкости мягкой прослойки  $A_{\text{пр}}$  полностью компенсируется работой пластических деформаций основного металла  $A^{\Gamma}$ . При дальнейшем уменьшении  $\kappa$  энергоемкость всего сварного соединения будет возрастать и, главным образом, определяться работой деформации основного металла  $A^{\Gamma}$ .

Сравнение расчетных и опытных данных по энергоемкости показало удовлетворительную сходимость их в том числе для соединений с X-образной и V-образной разделкой.

Было исследовано влияние геометрии мягкого шва (угла разделки кромок, зазора в корне шва, положения корня шва по высоте сечения) на относительное сужение, относительное удлинение и энергоемкость рассматриваемых сварных соединений. Расчетные значения

этих характеристик были получены путем подстановки в приведенные выше формулы вместо  $\alpha$  значения  $\alpha_0$ , фигурных швов.

Во всех случаях получена удовлетворительная сходимость расчета с опытом.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В области значений  $\alpha$ , близких к  $\alpha_0$ , когда прочность прослойки приближается к уровню прочности основного металла, наблюдается неполная реализация контактного упрочнения. Это обусловлено пластической деформацией прилегающего к прослойке основного металла, в результате чего ослабляется сдерживание им деформаций прослойки.

При увеличении степени механической неоднородности соединений область неполной реализации контактного упрочнения сдвигается в сторону меньших  $\alpha$ , одновременно с этим величина реализации теоретически возможного контактного упрочнения может уменьшаться. Неполная реализация контактного упрочнения более существенно проявляется в соединениях, не имеющих в своем составе "подкрепляющих" шов участков, более прочных, чем основной металл.

2. Предложен метод построения кривой прочности сварных соединений с мягкой прослойкой с учетом неполной реализации контактного упрочнения.

На основе результатов статистической обработки получены для сварных соединений углеродистых и среднелегированных сталей расчетные зависимости для определения критических значений  $\alpha_{cr}^{min}$  и  $\alpha_p$ .

Тем самым открывается возможность оценки расчетным путем прочности сварных соединений не только от относительной толщины мягкой прослойки, но и от степени механической неоднородности.

Сравнение указанных расчетных зависимостей с опытными данными, полученными как в настоящей работе, так и другими авторами, показало удовлетворительную сходимость.

3. Форма и геометрические параметры сварного шва, металл которого обладает пониженным по сравнению с основным металлом



сопротивлением пластическим деформациям, оказывают существенное влияние на прочность сварного соединения.

Приближенная оценка вязкой прочности при растяжении соединения с мягким швом может производиться по расчетным зависимостям, полученным для плоских прослоек, путем условного приведения фигурной формы шва к эквивалентной плоской прослойке. Этот способ прост и, как показали эксперименты, приемлем в качестве первого приближения.

4. Прочность соединения с мягким швом по мере уменьшения угла раскрытия кромок и зазора в корне шва (при неизменных других параметрах) возрастает. Это объясняется соответствующим уменьшением параметра  $\alpha$ , и связанным с ним увеличением действия контактного эффекта. Увеличению прочности с уменьшением  $\alpha$ , могут способствовать и другие факторы, например увеличение доли основного металла в шве.

Чрезмерное уменьшение угла раскрытия кромок и сборочного зазора опасно, так как с уменьшением этих параметров возрастает жесткость объемного напряженного состояния и вероятность хрупкого разрушения, чему в значительной степени способствует также наличие дефектов в шве. При этом следует иметь в виду, что наибольшую опасность представляют дефекты, находящиеся в узкой части шва. Поэтому особое внимание необходимо уделять качественной заварке корня шва.

5. Экспериментально подтверждено, что прочность сварного соединения с мягким швом (прослойкой) зависит от степени компактности сечения, с увеличением которой прочность соединения в области значений  $\alpha$ , отвечающих контактному упрочнению, снижается.

При оценке механических свойств сварных соединений больших толщин на основе вырезки из них образцов, необходимо учитывать различие в величинах  $\alpha$  и степени компактности сечения образцов и реального соединения. В противном случае возможны ошибки в оценке не только уровня прочности, но и пластичности, энергоемкости, места и характера разрушения соединения.

Указанное замечание должно быть учтено ГОСТами, нормами и техническими условиями на испытания механически необходимых сварных соединений.

6. Получены и экспериментально подтверждены формулы для расчетной оценки относительного сужения мягкой прослойки в месте разрыва (как в случае осесимметричной, так и плоской деформации).

Показана возможность использования этих формул для определения относительного сужения фигурного мягкого шва, работающего в составе сварного соединения.

7. Получены и экспериментально подтверждены формулы для расчетной оценки относительного удлинения и энергоемкости (работы деформации) сварных соединений с мягкой прослойкой.

Показана возможность использования указанных формул для определения относительного удлинения и энергоемкости сварных соединений, имеющих мягкий шов, отличный от плоского (X-образный или V-образный).

Относительное удлинение и энергоемкость механически неоднородных сварных соединений с мягким швом по мере уменьшения угла раскрытия и зазора в корне шва изменяются по сходным кривым, имеющим каждая свой минимум. При проектировании сварных соединений необходимо проводить соответствующий расчет, чтобы избежать таких величин геометрических параметров сварного шва, при которых пластические свойства и энергоемкость соединения имеют минимальные значения.

8. При конструировании соединений, выборе технологии сварки и сварочных материалов нужно руководствоваться не только технологическими и экономическими соображениями, но и расчетной оценкой их работоспособности. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы металл шва не оказался мягкой прослойкой. Если это невозможно, но приняты меры против образования дефектов в корне шва и металл обладает достаточной вязкостью, можно обеспечить повышение прочности за счет сужения разделки шва. Такой способ применим при сравнительно близких соотношениях прочностных свойств металла шва и основного металла. Если различия в механических свойствах этих материалов велики, то для обеспечения равнопрочности могут потребоваться чрезмерно узкие, нетехнологичные разделки. В этом случае пластичность и энергоемкость могут быть повышены за счет расширения разделки шва. Это необходимо учитывать при выборе разделки кромок, сварочных материалов и режимов сварки.

9. В связи с колебаниями свойств основного и присадочного материалов существует вероятность появления мягких швов в конструкциях, где предполагается равнопрочность металла шва основному металлу. Во избежание этого целесообразно для ответственных конструкций оговаривать не только нижние, но и верхние значения прочностных свойств основного металла.

Расчетную оценку работоспособности сварного соединения, имеющего в своем составе мягкий шов, необходимо производить по нижним значениям механических свойств металла шва и по верхним - основного металла.

10. Результаты проведенной работы нашли отражение в Основных положениях на сборку и сварку ответственных конструкций (ОП-69), а также приняты для внесения в руководящие материалы по конструктивно-технологическому проектированию сварных конструкций, разрабатываемые по заданию Госкомитета по науке и технике Совета Министров СССР.

Отдельные результаты работы экспонировались в 1966 году на ВДНХ, участником которой был автор.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Кульневич Т.В. О влиянии степени механической неоднородности на работоспособность сварных соединений. Сб. "Неоднородность сварных соединений и ее влияние на их работоспособность", Челябинск, 1968.

2. Бакши О.А., Пиксаев Б.П., Кульневич Т.В., Моношков А.Н. Оценка прочности сварных соединений из термоупрочненных сталей. Сб. "Вопросы сварочного производства". Труды ЧПИ, № 63. Челябинск, 1968.

3. Кульневич Т.В. О влиянии формы и геометрических параметров сварного стыкового шва на прочность соединения при статическом растяжении. Сб. "Вопросы сварочного производства". Труды ЧПИ, № 63, Челябинск, 1968.

4. Бакши О.А., Кульневич Т.В. Влияние геометрии мягкого стыкового шва на несущую способность сварного соединения при растяжении. "Сварочное производство", 1970, № 9

5. Кобзев И.Ф., Коршун (Кульневич) Т.В. Сварка трением на Челябинском тракторном заводе. "Автоматическая сварка", 1962, № 1.

6. Кульневич Т.В. Влияние геометрии мягких швов на пластичность сварных стыковых соединений. Сб. "Вопросы сварочного производства". Труды ЧПИ, № 63, Челябинск, 1968.

7. Бакши О.А., Кульневич Т.В. Расчетная оценка относительного удлинения сварных соединений с мягким швом. Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ, секции МТ и АТ факультетов. Челябинск, 1970.

8. Кульневич Т.В. Расчет относительного сужения мягкой прослойки в месте разрыва. Сб. "Теория и практика сварочного производства". Труды ЧПИ, № 82, Челябинск, 1970.

9. Бакши О.А., Кульневич Т.В. К расчетной оценке относительного удлинения сварных соединений с мягким швом. Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ; секции МТ и АТ факультетов. Челябинск, 1970.

Материалы диссертации были доложены автором:

1) на XVI научно-технической конференции ЧПИ, Челябинск, 1963;

2) на XVII научно-технической конференции ЧПИ, Челябинск, 1964;

3) на Всесоюзном координационном научно-техническом совещании "Неоднородность сварных соединений и ее влияние на их работоспособность", 1968;

4) на симпозиуме "Вопросы теории и практики сварочного производства, прочности сварных конструкций и методики преподавания сварочных дисциплин в вузах". Челябинск, 1969;

5) на XXIII научно-технической конференции ЧПИ, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина. Челябинск, 1970.

---

ФБ 26229 - 4/IX-70г. Сдано в печать 5/IX-70г. Формат 80х90 1/16. Объем  
1,125 п.л.; 1 уч.-изд.л. Отпечатано на "Ротапринте" ЧИ. Тираж 140 экз.  
Заказ № 204.