

# Сварка, родственные процессы и технологии

УДК 621.791.05

DOI: 10.14529/met160217

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ФОРМ РАЗДЕЛКИ КРОМОК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С КОНСТРУКТИВНЫМ НЕПРОВАРОМ

**Н.Л. Зайцев, И.А. Ильин**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

К сварным конструкциям наряду с обеспечением заданной прочности предъявляют требования по уменьшению количества наплавленного металла. В этой связи практический интерес представляют сварные соединения с конструктивным непроваром. Недостаток таких соединений – высокая концентрация напряжений в вершине непровара. Для соединений высокопрочных сталей непровар опасен с точки зрения возникновения хрупких и квазихрупких разрушений при низких уровнях прикладываемых нагрузок.

Для повышения сопротивляемости разрушению высокопрочных сталей с непроварами предлагается выполнять корень шва пластичными (мягкими), а остальную часть высокопрочными (твёрдыми) электродами. В настоящей работе представлены результаты исследования напряжённо-деформированного состояния и сопротивляемости разрушению механически неоднородных угловых сварных соединений и влиянию на них геометрических параметров разделки кромок и соотношения механических свойств твёрдого и мягкого металлов шва. Исследование напряжённо-деформированного состояния выполняли методом конечных элементов (МКЭ).

МКЭ-расчёты и эксперименты на реальных сварных соединениях показали, что применение композитных швов при изготовлении угловых сварных соединений высокопрочных сталей с непроварами позволяет повысить их несущую способность при одновременной экономии дорогостоящих аустенитных электродов.

*Ключевые слова: механическая неоднородность; «твёрдый» и «мягкий» металлы; композитный шов; граница сплавления; конструктивный непровар; разделка кромок свариваемых деталей.*

К сварным конструкциям наряду с обеспечением необходимой прочности предъявляют требования по уменьшению количества наплавленного металла. В этой связи практический интерес представляют сварные соединения с неполным проплавлением (конструктивным непроваром) присоединяемых деталей. Недостаток таких соединений – высокая концентрация напряжений в вершине непровара. Для соединений высокопрочных сталей непровар опасен с точки зрения возникновения хрупких и квазихрупких разрушений при низких уровнях прикладываемых нагрузок.

Квазихрупкие разрушения происходят в результате исчерпания локальной пластичности металла шва. Поэтому для увеличения сопротивляемости разрушению соединений высокопрочных сталей с непроварами сварные швы выполняют из менее прочного вязкого материала с высоким запасом пластичности. На практике такой технологический приём используют для предотвращения возникновения горячих трещин в корне шва. Можно также рекомендовать композитные швы, корень которых выполнять пластичными («мягкими»), а остальную часть – высокопрочными («твёрдыми») электродами [1]. О преимуществах такого приёма можно судить по результатам следующего эксперимента.

Из листа органического стекла вырезали пластины размером 300×70×4 мм. В центре пластин выполняли прорезы одинаковой длины  $L = 25$  мм с радиусом скругления в вершине надреза  $\rho = 0,2$  мм. Образцы разрушали растяжением. В вершинах надрезов части образцов перед испытанием вводили нихромовые проволоки и пропускали через них электрический ток такой силы, что проволоки разогревались до температуры чуть выше 100 °С. Разогрев проволоки приводил к размягчению оргстекла в локальной зоне вокруг вершины надреза. В результате прочность образцов, в вершинах надрезов которых оргстекло перед разрушением было разогрето, возросла в 2,5 раза.

Работы по исследованию особенностей напряжённо-деформированного состояния и прочности, в которых бы приводились рекомендации по выбору оптимальных с точки зрения несущей способности и расхода наплавленного металла геометрических форм разделок для заполнения их однородными и композитными швами, практически отсутствуют. В предлагаемой статье представлены результаты исследования напряжённо-деформированного состояния и сопротивляемости разрушению механически неоднородных угловых сварных соединений и влияния на них геометрии разделки кромок (параметров  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $c/a$ ,

## Сварка, родственные процессы и технологии

$a/b$ ,  $h_M$ ,  $h_T$ , рис. 1) и соотношения механических свойств «твёрдого» и «мягкого» металлов.

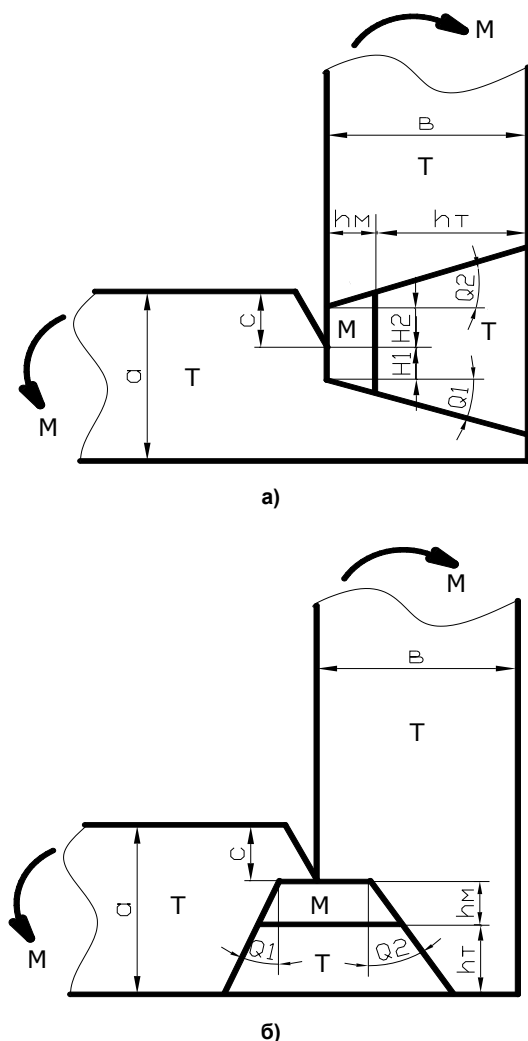


Рис. 1. Эскизы моделей сварных соединений: а – тип I; б – тип II

Для прогнозирования прочности сварных соединений использовали экспериментально-расчётный метод [2]. Метод базируется на результатах испытания образцов с непроварами и программе МКЭ-расчёта напряжённно-деформированного состояния, позволяющей получить распределение напряжений в соединении на всех стадиях его упруго-пластического нагружения, включая предельную (момент разрушения).

Сварные соединения нагружали изгибающим моментом. В расчётах принимали, что радиус скругления в вершине непровара  $\rho = 0$ . В качестве критерия разрушения использовали достижение в контрольном элементе, примыкающем к вершине непровара, максимальным нормальным напряжением  $\sigma_1$  критической величины  $\sigma_1 = \sigma_{1кр}$ . Принимали, что как только напряжение в контрольном элементе достигнет критической величины  $\sigma_{1кр}$ , произойдёт страгивание трещины из вершины непровара.

Момент  $M^*$ , при котором это произойдёт, считали предельным. Величину  $\sigma_{1кр}$  получали из МКЭ-расчёта напряжённно-деформированного состояния сварного образца с непроваром в момент его разрушения. При этом в МКЭ-расчёт закладывали полученные из эксперимента величину разрушающего момента  $M^*$ , диаграммы деформирования металлов шва и основного.

Экспериментальную часть работы и МКЭ-расчёты выполняли для угловых сварных соединений стали 35ГС. Однородный мягкий и корневую часть композитного шва заполняли электродами марки ЦЛ-II (тип Э-04Х20Н9) ГОСТ 10052-75, внешнюю часть композитного шва – электродами марки ВИ-1С-6 (тип Е15Г1ХСМ-0-В20) ГОСТ 9466-75. После сварки образцы подвергали закалке и низкому отпуску. В результате такой термической обработки основной металл и металл внешней части композитного шва имели примерно одинаковые механические характеристики. Сварные образцы разрушали статическим изгибом. Диаграммы деформирования получали из испытаний на растяжение цилиндрических образцов используемых материалов.

Результаты расчёта предельных моментов  $M^*$  для угловых соединений типов I и II (см. рис. 1) показали следующее.

Для соединений с однородными мягкими швами при прочих одинаковых условиях ( $a, b, c = \text{const}$ ) наименьшую сопротивляемость разрушению показали разделки без притупления ( $H_1 = H_2 = 0$ ). При этом увеличение углов от  $Q_1 = Q_2 = 25^\circ$  до  $Q_1 = Q_2 = 50^\circ$  приводит к незначительному увеличению прочности. Последнее объясняется тем, что вершина непровара упирается в узкую корневую часть мягкого шва. Вследствие сдерживания деформаций металла мягкого шва более прочным основным металлом деформативная способность этой части шва ограничена. При нагружении такого соединения нормальные напряжения вблизи вершины непровара интенсивно растут и быстро достигают критического уровня  $\sigma_{1кр}$ . По-видимому, это самая нежелательная разделка. Следует заметить, что на практике (при качественной сварке) за счёт проплавления основного металла корень шва приобретает не столь острую форму. Это, как будет показано ниже, положительно сказывается на прочности соединений.

Создание притупления увеличивает сопротивляемость сварных соединений разрушению. Прочность становится тем выше, чем больше величина притупления  $H_1$  и  $H_2$ . Однако относительную величину притупления  $H_1/b = H_2/b$  не следует делать больше 0,1, так как получаемое при дальнейшем возрастании величины  $H/b$  увеличение расхода наплавленного металла не оправдывается пропорциональным ростом прочности. При одинаковых притуплениях  $H_1$  и  $H_2$  увеличение углов разделки от  $Q_1 = Q_2 = 25^\circ$  до  $Q_1 = Q_2 = 50^\circ$  не при-

водит к заметному увеличению прочности. Поэтому предпочтительнее разделка с  $Q_1 = Q_2 = 0^\circ$  (так называемая щелевая разделка), поскольку на её заполнение расходуется наименьший объём наплавленного металла.

Из МКЭ-расчётов следует, что прочность соединений типа I, когда вершина непровара лежит на границе сплавления (рис. 1, а), и типа II, когда вершина непровара упирается в мягкий металл (рис. 1, б), отличается незначительно. В результате может сложиться впечатление о равнозначности этих соединений. Однако следует иметь в виду, что прочность определяли по моменту страгивания трещины из вершины непровара без учёта кинетики изменения напряжённо-деформированного состояния при её продвижении. Разработанная МКЭ-программа позволяет рассматривать соединения с различной глубиной непровара и продвигать трещину в мягкий металл, вообще говоря, на любую величину и следить за изменением напряжённо-деформированного состояния и прочности сварного соединения.

Чтобы оценить изменение прочности при проникновении трещины в металл шва продвигали трещину из вершин непроваров на 0,05 толщины листа  $a_1$ . В соединении типа I трещину продвинули по границе сплавления, а в соединении типа II – вглубь шва по оси его симметрии. Как показали испытания натуральных сварных соединений таких типов, именно по этим направлениям распространяются трещины из вершин непроваров. В первом случае это привело к незначительному снижению прочности, во втором к существенному (более чем в 1,5 раза) увеличению прочности. После страгивания трещины и некоторого заглубления её вершины в мягкий металл шва трещина вязнет в нём и для её дальнейшего продвижения необходимо увеличивать прикладываемую нагрузку. Эксперимент, проведенный на натуральных сварных соединениях, подтвердил, что прочность соединений типа II с притуплением кромок выше прочности соединений типа I.

Выполненные расчёты также показали, что наиболее опасными случаями являются находже-

ние непровара на линии сплавления шва с основным металлом (соединение типа I) или же смещение непровара от оси симметрии шва (в соединении типа II). Поэтому нежелательно применять разделки без притупления, так как в этом случае всегда имеется опасность некачественного формирования шва и, следовательно, большая вероятность распространения трещины по линии сплавления при низких уровнях разрушающих нагрузок. Разделки с притуплениями  $H_1 = H_2 > 0$  позволяют без особых затруднений выполнить корневой слой качественно. В этом случае при разрушении трещина пройдёт по оси симметрии шва и прочность соединения вырастет.

МКЭ-расчёты с композитными швами подтвердили, что они имеют более высокую прочность по сравнению с такими же соединениями, выполненными однородными мягкими швами.

Таким образом, выполненные исследования показали, что с точки зрения прочности более предпочтительными оказались угловые сварные соединения типа II (см. рис. 1, б). Применение композитных швов в практике изготовления сварных соединений высокопрочных сталей с непроварами позволяет повысить их несущую способность при одновременной экономии дорогостоящих аустенитных электродов. Сказанное в полной мере относится и к стыковым сварным соединениям высокопрочных сталей, так как явления происходящие в окрестностях вершин непроваров этих соединений будут подобными.

#### Литература

1. Бакии, О.А. Прочность и деформационная способность сварных соединений с композитной мягкой прослойкой / О.А. Бакии, Ю.И. Анисимов, Р.С. Зайнулин // Сварочное производство. – 1976. – № 10. – С. 3–5.

2. Прочность сварных соединений с трещинами в твёрдых прослойках при статическом нагружении / О.А. Бакии, Н.Л. Зайцев, Л.А. Вайсман, К.М. Гумеров // Сварочное производство. – 1985. – № 6. – С. 32–34.

**Зайцев Николай Леонидович**, канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zaitcevn1@susu.ru.

**Ильин Иван Александрович**, магистрант кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 26 октября 2015 г.

## BEVELLING SELECTION FOR FILLED WELDS WITH CONSTRUCTIVE FAULTY FUSION

N.L. Zaytsev, zaitcevn@susu.ru,  
I.A. Il'in

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Regarding welded constructions, not only their strength is of interest, but also saving of the weld metal consumption. For the latter, constructive faulty fusion of the joint can be used. But such joints suffer from stress concentration at the faulty fusion tip. When high-strength steels are used, this may lead to brittle or quasi-brittle failure, even under low loads.

To raise the failure resistance power of fillet welded high-strength steels with the constructive faulty fusion, it is suggested to use a composite weld, where the root pass is made with a ductile (soft) welding rod and the rest of the passes with a high-strength (hard) one.

Results of the study of stress-strain state and fracture resistance of mechanically heterogeneous fillet joints are presented, and the effects of fillet's bevelling geometry and ratio of mechanical properties of the hard and the soft weld rod metal are analyzed. The stress-strain state was studied using finite element method (FEM). FEM calculations and experiments with real weld joints demonstrate that the joint strength may be raised and expensive austenitic weld rods may be saved at the same time if composite joints are used in making fillet weld joints of high-strength steels with constructive faulty fusion.

*Keywords: mechanical heterogeneity, ductile and hard metal, composite weld, fusion line, constructive faulty fusion, bevelling.*

### References

1. Bakshi O.A., Anisimov Yu.I., Zaynulin R.S. [The Strength and Deformation Capacity of Composite Welds with a Ductile Layer]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1976, no. 10, pp. 3–5. (in Russ.)
2. Bakshi O.A., Zaytsev N.L., Vaysman L.A., Gumerov K.M. [The Strength of Statically Loaded Welds with Fractures in Brittle Layers]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1985, no. 6, pp. 32–34. (in Russ.)

*Received 26 October 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Зайцев, Н.Л. Выбор рациональных форм разделки кромок сварных соединений с конструктивным непроваром / Н.Л. Зайцев, И.А. Ильин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 113–116. DOI: 10.14529/met160217

### FOR CITATION

Zaytsev N.L., Il'in I.A. Bevelling Selection for Filled Welds with Constructive Faulty Fusion. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 113–116. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160217