



УДК 621.791.052:539.3

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАПЛАВКЕ ВАЛИКА НА ПЛАСТИНУ ИЗ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Н. О. ЧЕРВЯКОВ, инж., чл.-кор. НАН Украины К. А. ЮЩЕНКО  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что при наплавке на никелевый сплав максимальные продольные растягивающие напряжения достигают предела текучести материала. В случае наплавки с предварительным подогревом до 900 °С происходит снижение остаточных напряжений на 30 %.

*Ключевые слова:* высокопрочные никелевые сплавы, остаточные напряжения, метод сеток, предел текучести, подогрев

При производстве нагруженных узлов и деталей, эксплуатирующихся при высоких температурах, широкое применение находят никелевые дисперсионно-твердеющие сплавы с  $\gamma$ -упрочнением. Однако они имеют неудовлетворительную свариваемость из-за склонности к образованию трещин при сварке плавлением и последующей термообработке.

При изготовлении узлов газотурбинных двигателей с целью снижения чувствительности к образованию дефектов при сварке и обеспечения требуемых свойств сварных соединений никелевых сплавов, все чаще в качестве сопутствующей технологической операции применяется высокотемпературный подогрев. Его роль в образовании трещин в соединениях при сварке плавлением исследована мало. Положительное влияние подогрева связывается с релаксационными процессами как во время сварки, так и при охлаждении.

Практический интерес представляет исследование характера распределения остаточных сварочных напряжений при сварке с подогревом и при комнатной температуре. Наиболее часто для определения сварочных напряжений используются экспериментальные механические методы, основанные на измерении перемещений, вызванных снятием закрепления с элементов конструкции с остаточными напряжениями. Эти методы дают более высокую точность измерения по сравнению с физическими, использующими связь между остаточными напряжениями и некоторыми физическими свойствами материалов [1, 2].

В качестве приборов, измеряющих перемещение, используют механические, в частности деформометры, и тензорезисторы, а также различного рода делительные сетки и хрупкие покрытия. При использовании деформометров (в соответствии с их конструкцией) для измерений в пластине высверливают базовые отверстия. Учитывая сложности, связанные с механической обработкой никелевых сплавов, и особенности их структурного состояния, для определения остаточных напряжений использовался метод сеток [3].

Суть этого метода состоит в том, что на поверхность материала наносится сетка с заданными параметрами. В процессе деформирования образца сетка искривляется таким же образом, что и поверхность. Измерив искривления элементов сетки и обработав полученные результаты, можно определить величину деформации исследуемого объекта. Преимуществом этого метода является наглядность, достоверность, простота.

При исследовании использовали сетку из системы взаимно перпендикулярных линий, направления которых совпадают с направлениями выбранных осей координат. Сетку наносили с двух сторон пластины алмазным инструментом, обеспечивающим толщину линии 0,010 мм. Перед наплавкой валика поверхность пластины полировали, затем на нее наносили сетку с расстоянием между линиями 2 мм на базе 50 мм. Расстояние между линиями сетки вдоль оси OX перед разрезкой и после тщательно измеряли с помощью инструментального микроскопа БМИ-1 с продольным и поперечным ходом предметного стола и микрометрическими винтами (цена деления 0,005 мм). Погрешность измерения на выбранной базе не превышала 10 %. Использовалось 10-кратное увеличение. Разрезку пластины выполняли на электроэрозионном вырезном станке с ЧПУ (модель 4532Ф3). В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду с антикоррозионными присадками.

Отработку методики исследования продольных остаточных напряжений выполняли на пластине (размер 140×50×4 мм) из высоколегированной стали с пределом текучести 250 МПа. Автоматическую аргодуговую наплавку вольфрамовым электродом пластины в незакрепленном состоянии выполняли по центру на следующем режиме:  $I_{св} = 80$  А;  $U_d = 25...26$  В;  $v_{св} = 4$  мм/ч. После наплавки с проплавлением и полного охлаждения пластину разрезали на электроэрозионной установке, обеспечивающей минимальные вносимые деформации и нагрев изделия. Ширина реза составляла 1...1,5 мм.

Разность между размерами ячеек сетки до разрезания пластины и после дает упругую составляющую деформации  $\epsilon = \epsilon_{упр}$ . Учитывая, что исследуются пластины небольшой ширины и толщины, влияние напряжения  $\sigma_y$  принимается незначительным, а продольные остаточные напряжения для случая одноосного напряженного состояния подсчитываются по формуле

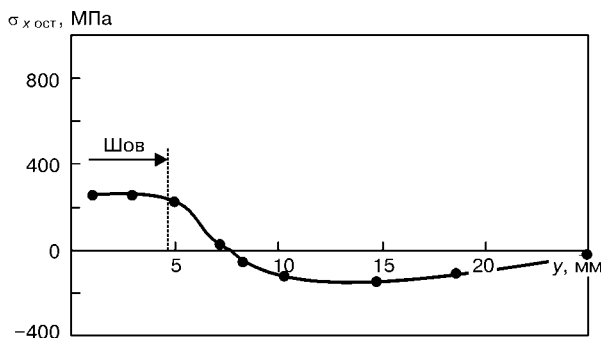


Рис. 1. Остаточные напряжения в пластине из стали X20Ni16Ag6 после наплавки валика

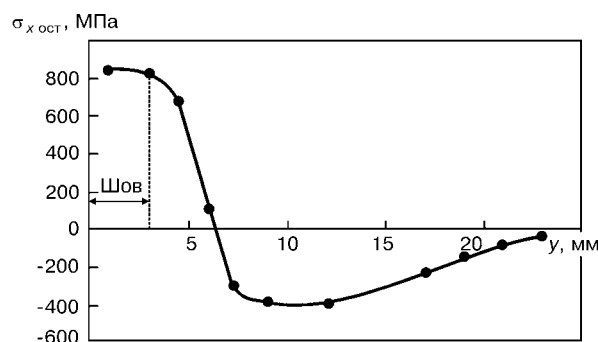


Рис. 2. Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава после наплавки валика

© Н. О. Червяков, К. А. Ющенко, 2002

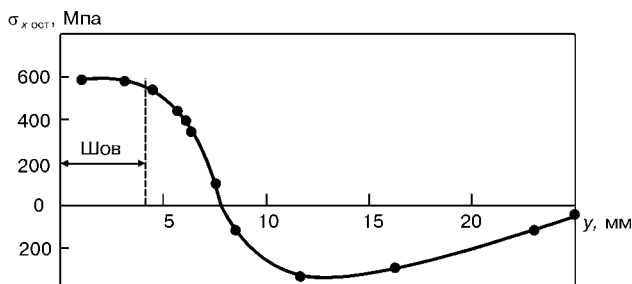


Рис. 3. Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава при сварке с предварительным подогревом

$$\sigma_{\text{ост}} = \epsilon_x E = \frac{n_1 - n_2}{B} E,$$

где  $n_1 - n_2$  — разность между размерами сетки в продольном направлении до разрезания пластины и после;  $E$  — модуль упругости материала;  $B$  — база измерения.

Максимальные растягивающие напряжения, примерно равные пределу текучести свариваемого металла, возникают в шве и вблизи него (рис. 1). При переходе от шва к околошовной зоне они постепенно уменьшаются, меняют знак и становятся сжимающими.

Остаточные напряжения в пластине из никелевого сплава системы легирования Cr-Co-W-Al-Ti с пределом текучести 850 МПа определяли по приведенной выше методике. Аргодуговую наплавку без присадки на пластине из никелевого сплава размером 105×50 мм и толщиной 3 мм выполняли на следующем режиме:  $I_{\text{св}} = 60$  А;  $U_{\text{д}} = 10,5$  В;  $v_{\text{св}} = 6$  м/ч.

It is shown that cladding on a nickel alloy induces maximum longitudinal tensile stresses which amount to a yield point of the material. Cladding with preheating to 900 °C results in a decrease of 30 % in residual stresses.

Поступила в редакцию 10.07.2001

УДК 621.791.92

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ СТАЛИ М76 ПОСЛЕ НАПЛАВКИ АУСТЕНИТНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Я. П. ЧЕРНЯК, Г. В. БУРСКИЙ, инженеры, В. К. КАЛЕНСКИЙ, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что с увеличением погонной энергии при наплавке образцов из стали М76 проволокой типа ПП-Нп-06Г13Х13Н2МФ работа разрушения металла ЗТВ повышается. Соответственно увеличивается и уровень сопротивляемости металла ЗТВ образованию холодных трещин.

*Ключевые слова:* наплавка, зона термического влияния, погонная энергия, термические циклы, холодные трещины

При восстановительной наплавке изношенных боковых поверхностей желобчатых трамвайных рельсов из стали М76 аустенитными проволоками без предварительного подогрева, под первым наплавленным валиком на границе сплавления или в металле ЗТВ (вблизи от этой границы) возникали холодные трещины типа откол. Исключить их образование удалось при наплавке первого валика на повышенной погонной энергии [1]. Чтобы обосновать необходимость этой особенности технологии наплавки рельсов следовало получить количественную оценку сопротивляемости металла ЗТВ стали М76 образованию холодных трещин после наплавки аустенитной проволокой на разных погонных энергиях.

Максимальные растягивающие напряжения, достигающие предела текучести, образуются в шве и вблизи него (рис. 2).

При сварке с предварительным подогревом пластину из никелевого сплава указанных размеров нагревали в печи до температуры 900 °C (при такой температуре повышаются характеристики пластичности исследуемого сплава), выдерживали там в течение получаса, после чего вынимали и по ней выполняли наплавку. Затем пластину полировали, на нее наносили сетку, разрезали и по формуле подсчитывали остаточные напряжения. Из рис. 3 видно, что с применением предварительного подогрева происходит снижение уровня максимальных растягивающих напряжений на 30 % и увеличивается зона их действия.

### Выводы

1. Отработана методика определения остаточных напряжений в никелевом сплаве с использованием метода сеток.

2. Установлено, что при аргодуговой наплавке никелевого сплава максимальные растягивающие напряжения достигают предела текучести материала. В случае применения предварительного подогрева происходит снижение растягивающих продольных остаточных напряжений на 30%.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: Изд-во ИНДПРОМ, 1998. — 640 с.
2. Masubuchi K. Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences. — Pergamon press, 1980. — 642 p.
3. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др.: Справ. пособие. — Киев: Наук. думка, 1981. — 585 с.