

УДК 621.78: 621.791

**Лабораторные исследования технологической
прочности теплоустойчивых сталей типа
15X1Н1Ф на основе испытания
малогабаритных проб с искусственным стоком
тепла**

Дрижов В. С.^{1,*}

[*vdrizhov@gmail.com](mailto:vdrizhov@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На современном этапе развития машиностроительного производства проблема повышения качества и надежности эксплуатации сварных конструкций неразрывно связана с повышением технологической прочности металлов при сварке. В этом плане одной из важных задач при изготовлении изделий из теплоустойчивых сталей является повышение сопротивляемости металла сварного соединения разрушению при повторном нагреве. В результате проведенного анализа установлено, что на малогабаритных пробах с искусственным стоком тепла можно воспроизводить характер разрушения, возникающий в толстостенных сварных конструкциях при повторном нагреве. Данное обстоятельство позволяет проводить исследования условий образования дефектов данного вида при незначительных затратах как на материал, так и на оборудование.

Ключевые слова: сварная конструкция, повторный нагрев, разрушение, технологическая проба, напряжение, сток тепла

Введение

Качество и надежность работы сварных конструкций обеспечивается отсутствием возможных разрушений, возникающих как при сварке, так и в процессе эксплуатации. Особенностью изготовления изделий из теплоустойчивых сталей является склонность этих материалов к образованию разрушения при повторном нагреве (РПН). Следует обратить внимание на то, что в температурной области образования трещин этого вида интенсивно развиваются такие процессы, как деформационное старение, снижение остаточных сварочных напряжений, сток термических вакансий, междолинное смещение, сток к границам примесей и комплексов примесь-вакансия и др. [1,2]. Это обстоятельство указывает на то, что разрушение при повторном нагреве сложное явление, вероятность образования которого зависит от характера и степени завершенности данных многочисленных процессов. Из вышесказанного следует, что успешное решение проблемы повышения запаса прочности данного вида возможно только на основе анализа

большого объема экспериментально полученной информации. Разработка простых и эффективных методов исследования разрушения сварных соединений при повторном нагреве позволит не только накопить необходимый объем информации, но и существенно снизить затраты на проведение экспериментов.

В настоящее время наиболее общая классификация методов исследования РПН дана в работах Земзина В.Н., Шрона Р.З. [3].

Согласно этой классификации, все существующие методы исследования можно разделить на две основные группы:

1. Оценка склонности материала сварного соединения:
 - машинные испытания на специальных установках;
 - испытания жестких технологических проб.
2. Оценка склонности материала к разрушению на образцах, подвергнутых имитированному воздействию термического или термомодеформационного цикла сварки по режиму околосварной зоны.

Наибольший интерес представляют методы исследования склонности к РПН, основанные на испытании непосредственно сварных образцов. В этом случае при испытании учитываются взаимодействие всех участков сварного соединения.

Машинные испытания для исследования склонности сварных соединений к образованию разрушения при повторном нагреве усложняются тем, что для испытания требуются специальное оборудование, что существенно усложняет и удорожает процесс проведения исследований.

К наиболее простой группе методов исследования образования РПН относятся испытания с помощью жестких технологических проб [4]. С одной стороны исследования РПН с помощью технологических проб не требует специального оборудования, что упрощает проведение экспериментов. С другой же стороны, большинство применяемых технологических проб для исследования склонности к РПН имеют относительно большие размеры, что приводит к значительному расходу испытываемого материала, а также требует специального оборудования для повторного нагрева (специальный печей для повторного нагрева - термообработки).

Разработка метода оценки склонности материала к разрушению при повторном нагреве с применением простых по форме сварных образцов позволит существенно повысить эффективность проведения исследований в этой области. Данную задачу можно решить, если применить для испытаний малогабаритные технологические пробы с искусственным стоком тепла. Применение таких проб наиболее целесообразно на первых этапах, для предварительного, оперативного исследования РПН. Крупногабаритные пробы, имитирующие конкретный сварной узел, следует применять на заключительном этапе внедрения в производство как новых материалов, так и новых технологических процессов.

Исследования характера разрушения металла сварных образцов из теплоустойчивых сталей типа 15Х1Н1Ф при повторном нагреве

Для воспроизведения характера разрушения, имеющего место в реальных сварных конструкциях - толстостенных сосудов давления при их повторном нагреве [5], необходимо, с одной стороны, создать в металле сварных образцов соответствующее

напряженно-деформированное состояние, а, с другой стороны, сформировать в зоне разрушения неблагоприятную структуру.

В крупногабаритных технологических пробах значительные растягивающие остаточные напряжения в сварном соединении формируются за счет жесткости сварного узла. Наличие в металле таких высоких растягивающих напряжений в совокупности с другими факторами создают условия для образования разрушения.

Следует отметить, что определенный уровень напряжения можно сформировать в металле сварного соединения не только за счет увеличения жесткости (габаритов) пробы, но и за счет приложения внешнего воздействия [6]. Сварные образцы во время испытания на РПН в этом случае подвержены действию как внутренних (сварочных остаточных) напряжений, так и напряжений от внешних сил. Для оценки уровня и характера распределения напряжений, возникающих при сварке малогабаритных образцов, был проведен расчетный анализ развития внутренних сварочных напряжений. Данный расчет проводился применительно к случаю наплавки валика на кромку полосы из теплоустойчивой стали 15X1H1Ф. Программа расчета составлена на основе алгоритма, разработанного Н.Н. Прохоровым совместно с Н.Ник. Прохоровым [7]. Результаты проведенного расчетного анализа представлены на рис.1.

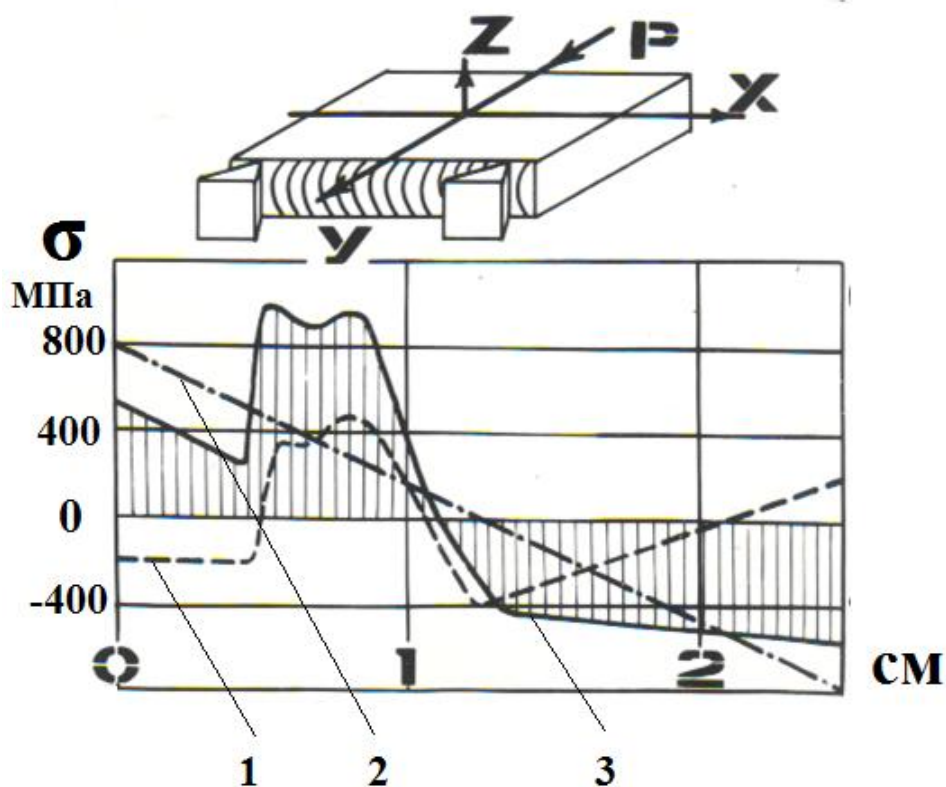


Рис. 1 Распределение продольных напряжений в сварном образце из стали 15X1H1Ф в условиях приложения внешнего усилия (1 - внутренние сварочные напряжения, 2 - напряжения от внешней силы, 3 - суммарные напряжения)

Как видно из рисунка в образцах небольшой жесткости (ширина пластины 3 см) в наиболее опасной зоне в отношении образования РПН развиваются сжимающие остаточные сварочные напряжения. Создание в этой области растягивающих напряжений, способных вызвать разрушение, может быть осуществлено путем приложения внешних нагрузок. Действующие напряжения определяются путем наложения эпюры внутренних сварочных напряжений на эпюру напряжений, возникающих в результате внешнего воздействия. Следует обратить внимание на то, что в условиях приложения внешних сил максимальные растягивающие напряжения формируются не в зоне сплавления (зоне разрушения), а в зоне, в которой при сварке образуются максимальные растягивающие напряжения. Данное обстоятельство указывает на то, что воздействие только внутренних напряжений первого рода недостаточно для воспроизведения в металле сварных малогабаритных образцов-проб необходимого характера разрушения. Этот вид разрушения в значительной мере будет определяться и другими процессами, протекающими в металле при повторном нагреве.

В связи с вышеизложенным в сварных образцах необходимо было не только создать требуемый для разрушения уровень действующих напряжений, но и сформировать соответствующую неблагоприятную структуру. Необходимо отметить, что фазовый состав и структура металла сварного соединения определяются в основном степенью завершенности процессов, протекающих при сварке. Как показывает опыт, разрушение при повторном нагреве возникает в жестких толстостенных сварных узлах, отличительной особенностью сварки которых является значительная скорость охлаждения.

Для воспроизведения при сварке лабораторных проб термических циклов, имеющих место в жестких сварных узлах, применялись искусственные стоки тепла. Увеличение скорости охлаждения металла испытываемого сечения во время сварки осуществлялось путем охлаждения металла сварного соединения проточной водой, пропускаемой через специальное отверстие (рис.2).

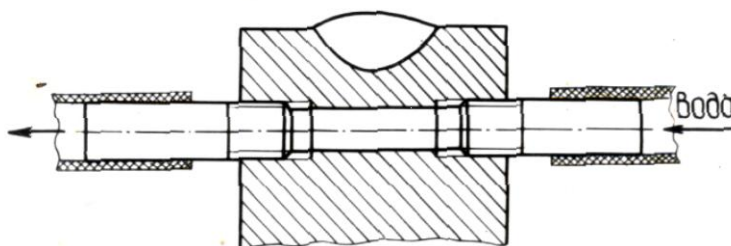


Рис.2 Схема охлаждения металла сварного соединения в процессе сварки.

По предложенной методике были опробованы несколько вариантов малогабаритных технологических проб, испытания которых проводились в условиях релаксации напряжений. Габариты проб позволяли использовать для их нагрева обычные лабораторные печи. Общий вид малогабаритных проб представлен на рис.3

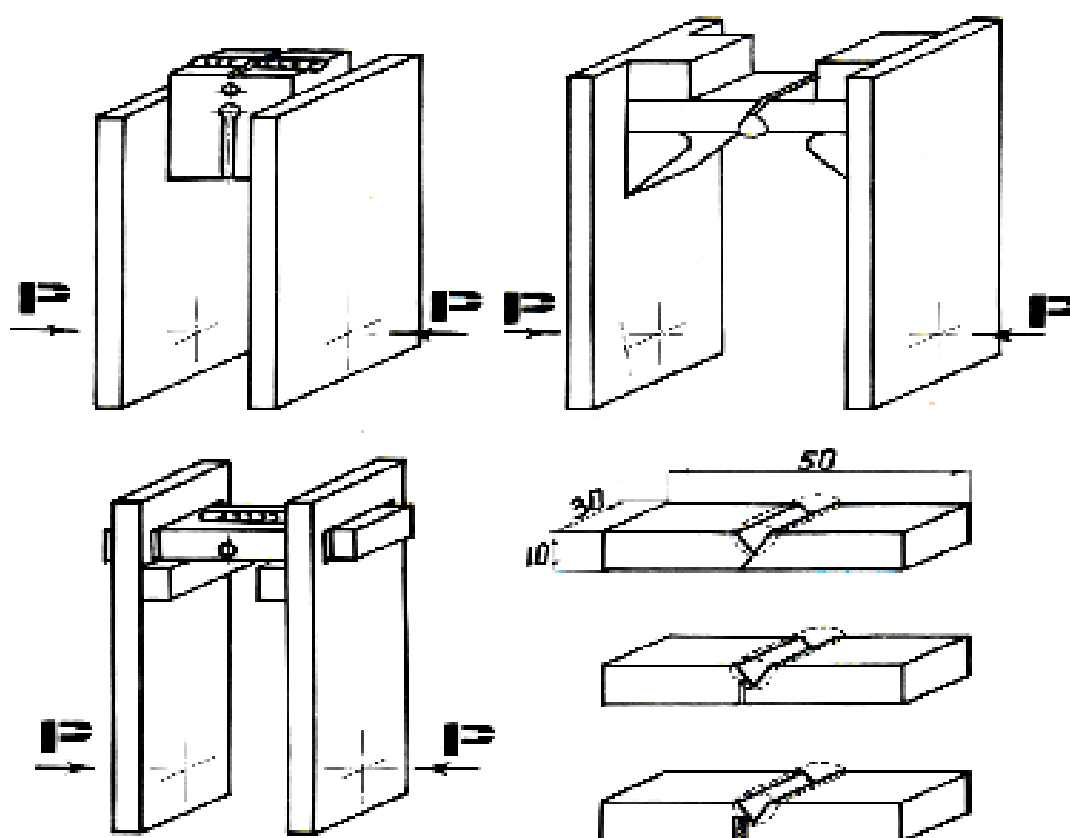


Рис.3 Общий вид лабораторных технологических проб.

Как видно из рисунка напряжение в испытываемом сечении сварного образца задавалось с помощью усилия (P), приложенного к упругим рычагам. Рычаги в нагруженном состоянии фиксировались. В связи с тем, что рычаги представляют собой упругую систему, то достигалась возможность продолжительной выдержки испытываемого сечения под нагрузкой. Уровень приложенного напряжения изменялся путем изменения первоначальной величины прогиба рычагов. Нагруженная проба помещалась в печь и выдерживалась при различных температурах в диапазоне температур отпуска сварных конструкций. Время испытания выбрано на основе экспериментального анализа влияния времени испытания на уровень разрушающих напряжений. Результаты проведенного анализа для стали 12Х1МФ представлены на рис.4. Как видно из рисунка напряжение, которое вызывает разрушение металла сварного образца стабилизируется в течение нескольких часов. Дальнейшие испытания не приводят к его заметным изменениям. Данное обстоятельство позволило ограничить время испытания сварных образцов до 3 часов.

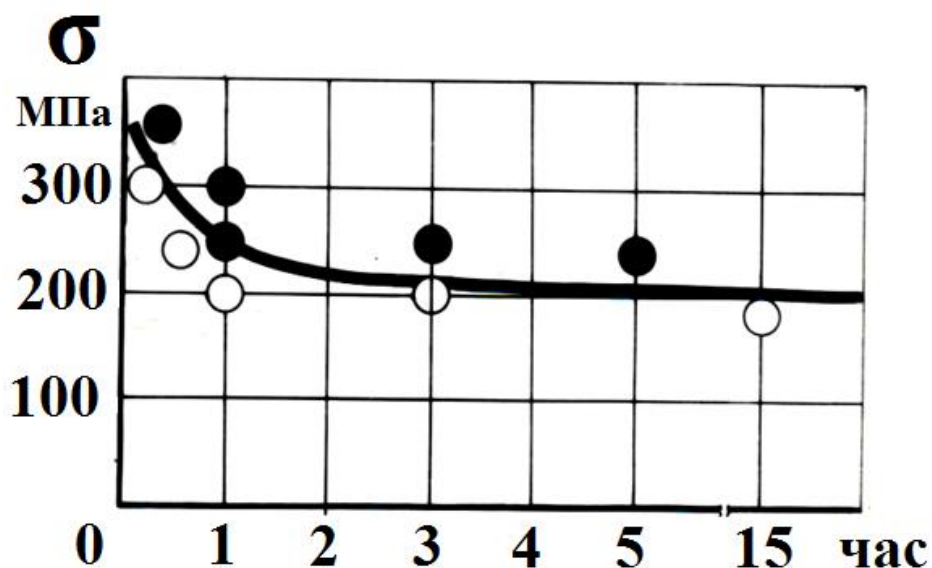


Рис.4 Влияние уровня действующих напряжения на время до разрушения сварных образцов из стали 12Х1МФ. Температура испытания $T=650^{\circ}\text{C}$.

(● - разрушение есть, ○ - разрушения нет)

Исследования склонности к РПН, а также характера разрушения проводились на пробах из стали 15Х1Н1Ф. На образцах швы располагались как вдоль приложенных напряжений, так и поперек.

Для анализа влияния различных факторов на образование РПН исследования проводились в различных условиях. Изучалось влияние:

1. Наличия концентратора напряжений, выполненного в виде прорези, наносимой после и до сварки.
2. Скорости охлаждения (образцы сваривались в условиях различной интенсивности искусственного охлаждения в зоне испытания).
3. Начального уровня приложенных напряжений - величины первоначального прогиба рычагов.

Результаты проведенных испытаний показали:

- трещины возникали только в зоне концентратора напряжений в виде надреза, сделанного после сварки;
- повышение скорости охлаждения металла в процессе сварки технологических проб увеличивает вероятность образования трещин;
- трещины возникали как в металле шва, так и в металле околошовной зоны;
- трещины, возникающие при испытаниях в металле сварного образца, располагаются строго по границам зерен.

Результаты проведенного анализа влияния температуры на образования разрушения при повторном нагреве сварных образцов из стали 15Х1Н1Ф представлены на рис.5

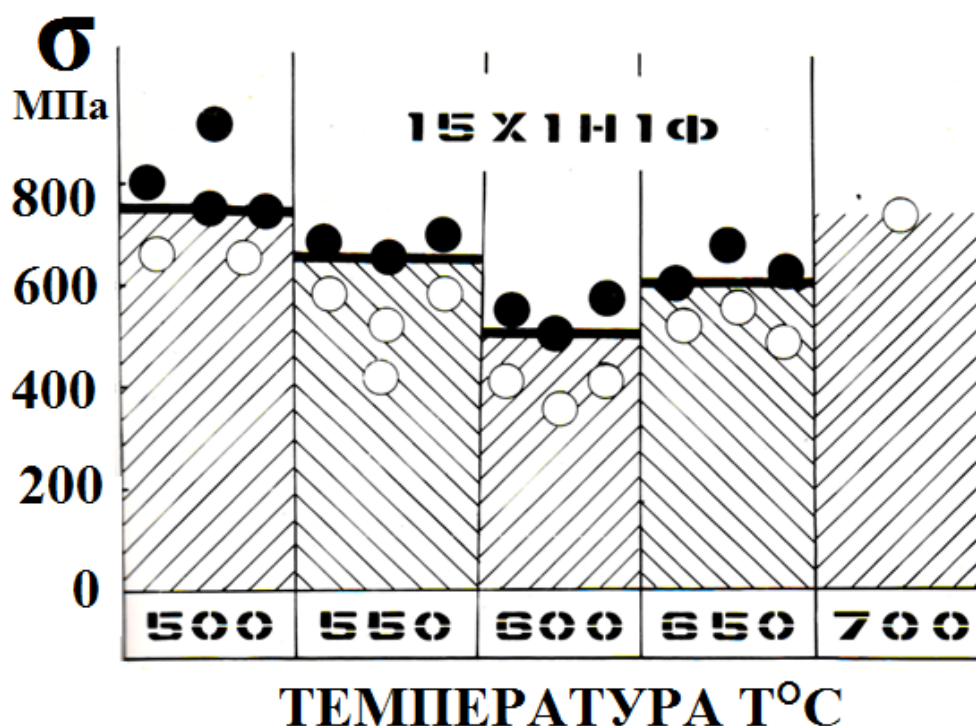


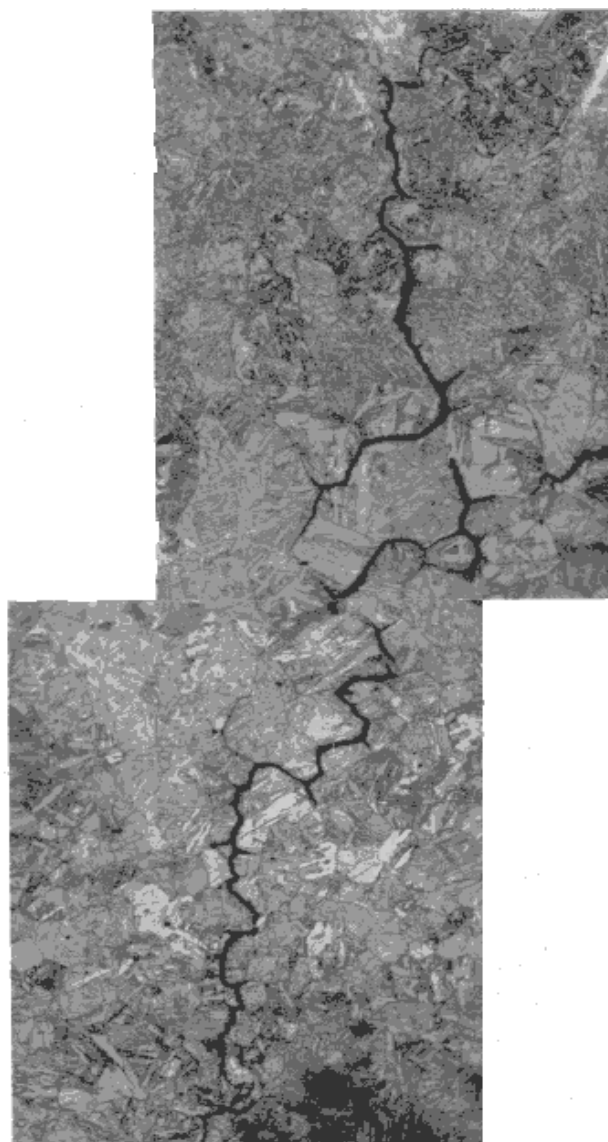
Рис.5 Влияние температуры на уровень разрушающего начального напряжения для случая испытания в режиме изотермической релаксации напряжений

(● - разрушение есть, ○ - разрушения нет)

Металлографический анализ металла зоны разрушения сварного соединения при повторном нагреве показал, что трещины развиваются по границам зерен. Данное обстоятельство указывает на идентичность характера разрушения, полученного на пробах и в сварных конструкциях при отпуске на практике. На рис. 6 представлен характерный вид разрушения металла сварного соединения лабораторной пробы из стали 15X1H1Ф при повторном нагреве.

Для воспроизведения трещин только в ОШЗ был опробован вариант, когда концентратор (надрез) наносился не поперек шва, а вдоль по линии сплавления. В этом случае трещин получить не удалось. Воспроизвести трещины только в околошовной зоне удалось путем наложения сварных швов на боковую поверхность с двух сторон и нанесении надреза после сварки.

Для воспроизведения трещин, возникающих при повторном нагреве в случае многослойной сварки (наплавки) на пробе, с искусственным стоком тепла, проплавлялся один валик, после чего на пробу наносился надрез и прикладывался изгибающий момент. На пробу в нагруженном состоянии накладывался второй валик на расстоянии 5мм. Разрушение возникало в металле первого шва. Данное обстоятельство указывает на возможность воспроизведения на предложенных пробах разрушения металла сварного соединения, возникающее в условиях многослойной наплавки.



X120

Рис.6 Характер разрушения в металле малогабаритной пробы из стали 15X1H1Ф

Следует отметить, что предложенная методика может быть использована не только для исследования склонности стали к разрушению при повторном нагреве, но и для испытания металла на склонность к холодным трещинам. Этот вывод подтверждает полученный нами результат при исследовании склонности сталей 15X1H1Ф и ВНС-2 к холодным трещинам.

При испытаниях малогабаритные сварные пробы с искусственным стоком тепла нагружались после сварки и выдерживались при комнатной температуре в течении 20 часов. Исследования проводились как с концентратором напряжений (надрез до сварки и после сварки), так и без концентратора.

Было установлено, что холодные трещины возникали в металле шва только при наличии концентратора напряжений и только в том случае, когда металл был насыщен водородом. Для насыщения металла шва водородом на оплавляемую поверхность

наклеивалась бумага, а также использовался метод насыщения водородом путем увлажнения защитного газа.

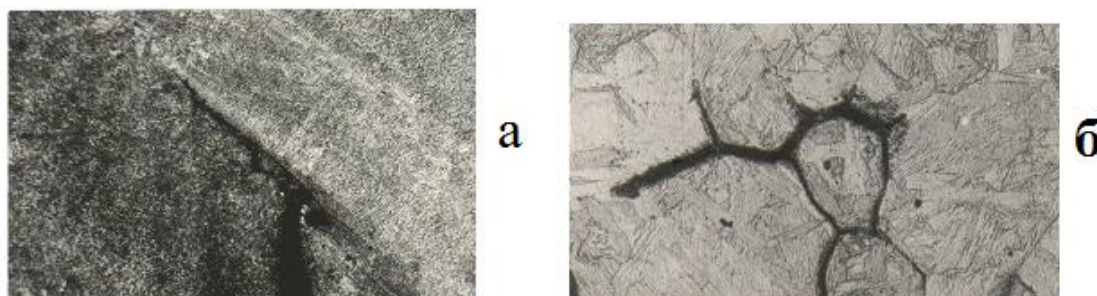


Рис.7 Характер разрушения металла технологической пробы с поперечным расположением шва (а - разрушение в районе концентратора напряжений (ОШЗ) $\times 30$; б – микроструктура зоны разрушения $\times 340$)

При исследовании проб с поперечным расположением шва сварка производилась в V — образную разделку. В случае применения присадочного металла такого же химического состава, как и основной металл (15X1Н1Ф), разрушение при повторном нагреве возникало только в металле шва.

Для воспроизведения РПН в околошовной зоне в пробе этого вида наносился надрез до линии сплавления. В результате испытания было установлено, что трещины возникают в металле околошовной зоны. Металлографический анализ характера разрушения в технологических пробах с поперечным расположением шва по отношению к действующим напряжениям показал, что трещины имеют межкристаллический характер — рис.7.

Заключение

В результате проведенных исследований предложена методика оценки склонности теплоустойчивых сталей к разрушению при повторном нагреве с применением лабораторных малогабаритных технологических проб. Металлографический анализ характера разрушения металла сварного соединения проб подтвердил идентичность разрушения на пробах и на практике при термообработке сварных конструкций из теплоустойчивых сталей.

Проведенный экспериментальный анализ образования РПН в металле сварного образца из стали 15X1Н1Ф в различных условиях испытаний показал возможность и целесообразность применения малогабаритных проб с искусственным стоком тепла для исследования как разрушений при повторном нагреве, так и холодных трещин.

Список литературы

1. Прохоров Н.Н. Состояние и перспективы развития теории прочности сварных конструкций как основы повышения их качества // Сварочное производство. 1977. № 2. С. 5-9.
2. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
3. Земзин В.Н., Шрон Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. Л.: Машиностроение, 1978. 367 с.
4. Vinckier A.G. Testing techniques to study the susceptibility to reheat cracking of carbon-manganese and low alloy steels // Welding in the World. 1974. No. 11/12. P. 282-303.
5. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. В 2 т. Т. 2. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
6. Прохоров Н.Н., Прохоров Н.Н., Худиев Ш.Н. Методика расчета деформаций и напряжений с учетом фазовых превращений при наплавке сварочного валика на кромку полосы // Физика и химия обработки материалов. 1972. № 3. С. 5-7.

Laboratory Studies of Technological Strength of Heat-Resistant Steels 15H1N1F Using the Small Sample Tests with Artificial Cooling

V.S. Drizhov^{1,*}

[*vdrizhov@gmail.com](mailto:vdrizhov@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: welded structure, reiterated heating, cracks, damage, technological samples, stress, heat-sink

The aim of the work is to develop a technique to research a damage of the welded structures from thermostable steels under reiterated heating.

Damage of welded structures under reiterated heating depends on numerous processes, proceeding both in welding and under reiterated heating. This circumstance makes it necessary to analyze the reasons and conditions of emerging damage on the basis of numerous statistical materials. This problem can be solved only if simple and effective research methods are used to conduct tests.

The paper uses theoretical and experimental methods of research. Theoretical researches are based on the calculation analysis of proceeding internal welding stresses in the welded structures from thermostable steels. For analysis the calculation method of solving a problem was applied taking into account heterogeneity of phase dilatation in different zones of the welded structure. Experimental researches were conducted on the small welded samples in conditions of isothermal relaxation of stresses. Using the artificial heat sink, when welding is a feature of these researches. These welding conditions allowed us to reproduce thermal cycles of welding on small samples, taking place in welding of the thick-walled welded units.

Experimental researches of metal damage nature of the welded structures under reiterated heating were conducted on the welded samples, which were welded both by non-consumable electrode and by consumable one. In analysis the influence of stress concentrator on emerging damage was also taken into account.

As a result of research a technique has been offered to study damage of welded structures under reiterated heating on the small samples used for tests.

The metallography analysis of the metal damage nature of welded structures at small sample tests confirmed damage identity at tests and in practice during heat treatment of weldments from thermostable steels.

The conducted experimental analysis of emerging damage under numerous test conditions has shown that it is reasonable to use the artificial heat sink small samples to study both damages under reiterated heating and cooling cracks.

References

1. Prokhorov N.N. State and prospects of development of theory of durability of weldments as bases of increase of their quality. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1977, no. 2, pp. 5-9. (in Russian).
2. Makarov E.L., Yakushin B.F. *Teoriya svarivaemosti stalei i splavov* [Theory of weldability metals]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 487 p. (in Russian).
3. Zemzin V.N., Shron R.Z. *Termicheskaya obrabotka i svoistva svarnykh soedinenii* [Heat treatment and properties of weldments]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 367 p. (in Russian).
4. Vinckier A.G. Testing techniques to study the susceptibility to reheat cracking of carbon-manganese and low alloy steels. *Welding in the World*, 1974, no. 11/12, pp. 282-303.
5. Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessy v metallakh pri svarke. V 2 t. T. 2* [Physical processes in metals during welding. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 600 p. (in Russian).
6. Prokhorov N.N., Prokhorov N.N., Khudiev Sh.N. Methodology of calculation of deformations and tensions taking into account phase transformations at наплавке of welding roller on the edge of stripe. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1972, no. 3, pp. 5-7. (in Russian).