

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ ТИПА 15X2НМФА

В.С. Дрижов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: vdrizhov@gmail.com

Широкое применение теплоустойчивых сталей с высокими эксплуатационными характеристиками в существенной мере сдерживается отсутствием достаточной информации об их склонности к хрупким разрушениям как при сварке, так и при повторном нагреве. Обеспечение требуемого запаса как технологической, так и эксплуатационной прочности возможно только на основе анализа многочисленных процессов, развивающихся при сварке. Термомеханическое возбуждение металла при сварке существенно различно в разных зонах сварного соединения. Данное обстоятельство обуславливает образование и развитие в металле внутренних сварочных напряжений. В результате проведенных исследований показано существенное влияние жесткости сварного узла на характер развития внутренних напряжений. Установлено, что существует критический уровень жесткости свариваемых пластин, при котором в околошовной зоне знак остаточных напряжений меняется, при переходе от сжимающих к растягивающим напряжениям.

Ключевые слова: теплоустойчивая сталь, сварное соединение, разрушение при повторном нагреве, напряжения, жесткость сварного узла.

CALCULATION ANALYSIS OF INTERNAL TENSION DEVELOPMENT IN THE JOINTS OF THE WELDED THERMALLY STABLE STEELS OF 15KH2NMFA TYPE

V.S. Drizhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: vdrizhov@gmail.com

The widespread use of high-performance heat-resistant steels is substantially hindered by the lack of sufficient information about their liability to brittle fracture during both welding and reheating. The required technological and operational strengths can be achieved by analyzing multiple processes occurring during welding. Thermomechanical excitation of the welded metal is considerably different in different regions of the welded joint. This fact causes formation and development of the internal welding stress within the metal. The paper presents the research results of the internal stress in the welded joint. It shows a considerable influence of the welded assembly rigidity on the internal stress development. It is found out that there is a critical level of the welded plates rigidity at which the residual stress reverses its pattern in the weld-affected region. It transforms from the compressive pattern into the tensile one.

Keywords: heat-resistant steel, welded joint, reheat cracking, stress, welded assembly rigidity.

Повышение эффективности эксплуатации сварных конструкций в энергетическом машиностроении с одной стороны связано с возможностью применения для изготовления изделий высокопрочных теплоустойчивых сталей, а с другой — с необходимостью формирования в

условиях производства качественного изделия. На современном этапе развития общества качество выпускаемой продукции в подавляющем большинстве случаев определяется качеством и надежностью работы сварных соединений. В этом плане следует отметить, что обеспечение требуемых показателей качества сварного соединения возможно только на основе анализа процессов, формирующих при сварке фазовый состав и структуру материала, т.е. его свойства, и процессов, обуславливающих образование в сварном соединении полей внутренних напряжений.

Отметим, что формирование заданного уровня как технологической, так и эксплуатационной прочности возможно только на основе комплексного анализа характера и степени завершенности многочисленных физико-химических процессов, развивающихся при сварке. Одним из основных процессов в вышеназванной проблеме является процесс формирования напряженно-деформированного состояния.

Как показывает опыт [1, 2] изучения разрушения сварных соединений при повторном нагреве (РПН), отличительной его особенностью является ярко выраженный межкристаллический характер (рис. 1). Данное обстоятельство указывает на то, что трещины возникают в результате исчерпания деформационной способности при межзеренном проскальзывании. Деформация при повышенных температурах развивается под действием внутренних остаточных напряжений и чем больше эти сварочные напряжения, тем больше вероятность образования РПН.

Исходя из вышесказанного следует, что необходимым условием разрушения сварных соединений является наличие высокого уровня остаточных сварочных напряжений. Данное обстоятельство указывает на актуальность исследований в области анализа условий образования и развития внутренних напряжений при сварке.

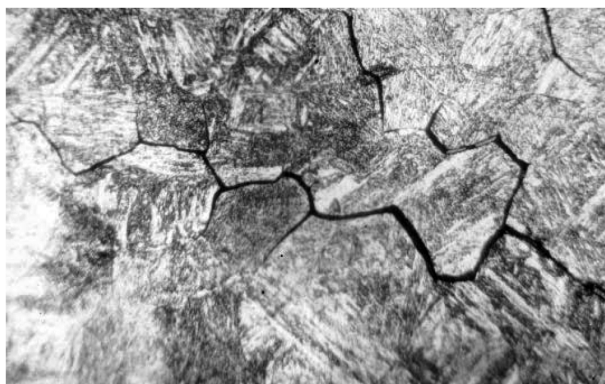


Рис. 1. Характер разрушения металла сварного соединения, возникающего при повторном нагреве ($\times 200$)

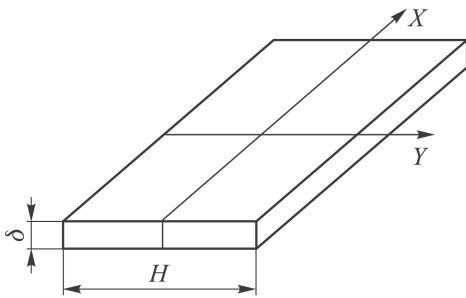


Рис. 2. Схема рабочего тела при расчете сварочных напряжений

Следует также отметить, что трещины при повторном нагреве располагаются в большинстве случаев поперек сварного шва, а подваликовые трещины при многослойной сварке располагаются исключительно поперек направления сварки [3]. Такая ориентация трещин указывает на существенное влияние продольной компоненты остаточных сварочных напряжений на образование разрушения при повторном нагреве.

Процесс развития внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях, претерпевающих фазовые превращения, представляет собой сложное, необратимое явление, определяемое распределением как термической, так и фазовой дилатациями при неравновесных условиях сварки.

Для оценки развития внутренних напряжений был применен расчетный метод, разработанный профессором Н.Н. Прохоровым и опробованный в лаборатории “Технологическая прочность металлов при сварке” МГТУ им. Н.Э. Баумана [4, 5]. Решение данной задачи выполнялось для случая сварки пластин встык с учетом неоднородности фазовых дилатаций в различных зонах сварного соединения. Расчет проводился для продольных сварочных напряжений. Материал свариваемых заготовок — теплоустойчивая сталь 15Х2НМФА.

Схема рабочего тела приведена на рис. 2. Видно, что пластины при сварке находятся в свободном состоянии (внешние силы не прикладываются).

На этапе нагрева под действием временных напряжений длина пластины увеличивается, а на этапе охлаждения — уменьшается. В расчете используется гипотеза плоских сечений: при сварке поперечное сечение пластины остается плоским и перемещается плоскопараллельно. Укорочение пластины после сварки определяется уровнем продольных сжимающих остаточных напряжений на краях пластины.

В рассматриваемом рабочем теле возникает одномерное поле напряжений и задача сводится к решению уравнения равновесия внутренних напряжений, развивающихся в поперечном сечении. Поскольку толщина пластин постоянна, то уравнение равновесия можно представить в следующем виде:

$$\int_0^h \sigma_x dy = \int_0^h \varepsilon_x E_T dy = 0, \quad (1)$$

где σ_x — внутренние продольные напряжения в данном волокне пластины; ε_x — внутренняя продольная упругая деформация в данном волокне; E_T — модуль нормальной упругости при данной температуре.

Основные особенности подхода к решению задачи следующие.

1. В свариваемой пластине принималось предельное состояние процесса распространения теплоты. Предполагалось, что пластина нагревается равномерно по толщине от линейного источника, движущегося с постоянной ограниченной скоростью.

Температурное поле рассчитывалось по уравнению Н.Н. Рыкалина:

$$T = \frac{g}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{Vx}{2a}\right) K_0 \left[\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{B}{a}} \right], \quad (2)$$

где $B = \frac{2\alpha}{C_\gamma\delta}$ — коэффициент температуропотдачи; λ — коэффициент теплопроводности; C_γ — объемная теплоемкость; $\alpha = \lambda/cV$ — коэффициент температуропроводности; α — коэффициент теплоотдачи; V — скорость сварки; δ — толщина свариваемых пластин; K_0 — функция Бесселя нулевого порядка второго рода от мнимого аргумента; $r_2 = x^2 + y^2$ — радиус-вектор.

2. Теплофизические константы γ , C_γ , a приняты постоянными, не зависящими от температуры.

3. Коэффициент линейного расширения α принимается зависящим от температуры.

В программу расчета значения α вводились в соответствии с зависимостями свободной деформации от температуры. Дилатометрические кривые определялись экспериментально на быстродействующем дилатометре [4].

Для получения дилатограмм применялись образцы $100 \times 10 \times 1,5$ мм. Они закреплялись в медных токоподводящих зажимах, один из которых мог свободно перемещаться. Это обеспечивало свободное расширение и сокращение образца в результате теплового воздействия. Имитация термического цикла в образцах достигалась путем их нагрева проходящим электрическим током. В целях анализа влияния скорости охлаждения на характер изменения свободной деформации, исследования проводились при различных скоростях охлаждения. Скорость охлаждения образца в процессе имитации термического цикла изменялась за счет увеличения скорости обдува образца защитным газом. Для получения незначительной скорости охлаждения (порядка $20^\circ\text{C}/\text{с}$ при $T = 500 \dots 600^\circ\text{C}$) в качестве защитного газа применялся аргон. Для увеличения скорости охлаждения образцы обдували диоксидом углерода. Для получения очень маленькой скорости охлаждения (порядка $1^\circ\text{C}/\text{с}$ при $T = 500 \dots 600^\circ\text{C}$) образец охлаждался в специальной печи, температура в которой автоматически регулировалась.

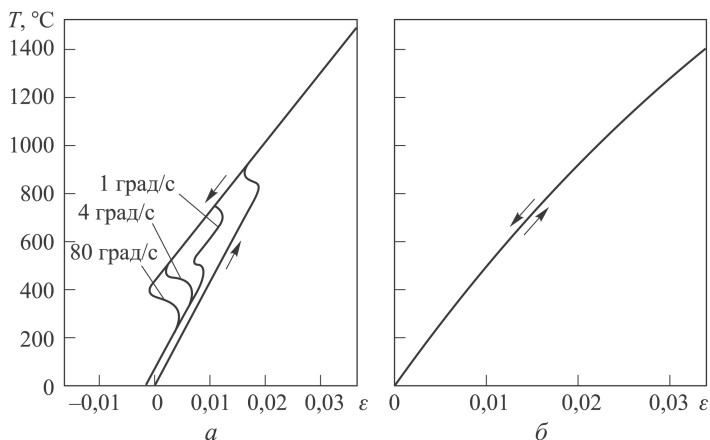


Рис. 3. Дилатограммы сталей 15X2NMФА (а) и 10X16H25M6 (б)

Дилатационный линейный эффект как от теплового расширения, так и от фазовых превращений измерялся в поперечном сечении образца. Температура образца регистрировалась с помощью термопары, приваренной к образцу в центре базы измерения деформации. На рис. 3 приведены дилатограммы сталей 15X2NMФА и 10X16H25M5. Проведенные исследования влияния скорости охлаждения на характер изменения свободной деформации позволили установить, что скорость охлаждения металла оказывает существенное влияние только на дилатограмму сталей, претерпевающих превращение аустенита, — теплоустойчивой стали 15X2NMФА. На дилатограмму аустенитной стали 10X16H25M6 данный фактор практически не оказывает никакого влияния.

4. В решении данной задачи учитывалось фазовое разупрочнение при превращении аустенита.

Фазовое разупрочнение при превращении аустенита учитывалось путем введения в решение задачи сопротивления металла деформированию. Для получения этой характеристики материала использовался релаксометр, конструкция и описание работы которого приведены в работе [4]. Релаксограммы (сопротивление металла деформированию) снимались в условиях, когда на образцах воспроизводился термомодеформационный цикл сварки. Образцы представляли собой пластины размером $100 \times 20 \times 3$ мм с надрезами в испытываемом сечении.

Имитация термического цикла в образце достигается путем нагрева образца проходящим электрическим током. Для исключения влияния напряжений, возникающих за счет теплового расширения, один из токоподводящих зажимов установки имел возможность свободно перемещаться.

Деформационный цикл осуществлялся путем чистого изгиба образца. Образец устанавливается в релаксометр так, чтобы ось вращения проходила через центр испытываемого сечения.

Температура на образцах фиксировалась с помощью термопары, приваренной конденсаторной сваркой к центру испытываемого сечения. Релаксограммы для теплоустойчивой 15X2НМФА и аустенитной 10X16Н25М6 сталей снимались на образцах, подвергнутых термическому циклу, имитирующему цикл сварки, при одновременном деформировании по закону, соответствующему термической дилатации этих сплавов.

Закон деформирования задавался по определенной программе. В данном случае деформационный цикл приблизительно воспроизводит закон деформирования металла при сварке, ошибка от принятого приближения незначительна. Данный подход оправдан, если учесть, что точное воспроизведение деформационного цикла возможно лишь на основе последовательных приближений, чередующихся счетом и экспериментами, что значительно увеличивает трудоемкость исследований. Релаксограммы для теплоустойчивой 15X2НМФА и аустенитной 10X16Н25М6 сталей приведены на рис. 4.

5. В алгоритме выполнен учет влияния на температуру начала (T_n) превращения разной степени аустенизации волокон, нагреваемых до различных максимальных температур в интервале от A_{C3} до $T_{пл}$.

Результаты исследования влияния степени аустенизации на температуру начала превращения для стали 15X2НМФА приведены на рис. 5.

Как следует из полученных результатов в волокнах, нагреваемых до максимальной температуры, равной A_{C3} , превращение аустенита начинается при более высоких температурах (штриховая линия на рис. 5), чем у волокон, нагреваемых до $T = 1350^\circ\text{C}$. Причем эта разница существенно не зависит от скорости охлаждения. Так, при изменении скорости охлаждения от $\omega = 4$ до $\omega = 80$ град/с она остается примерно одинаковой и равной $\Delta T = 40^\circ\text{C}$.

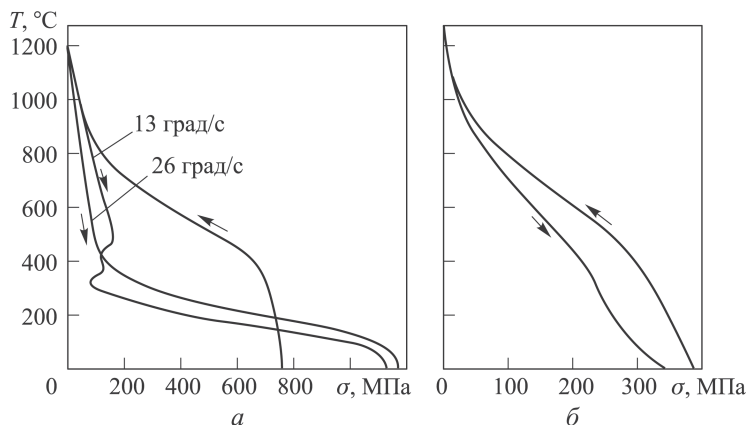


Рис. 4. Сопротивление металла деформированию для сталей 15X2НМФА (а) и 10X16Н25М6 (б)

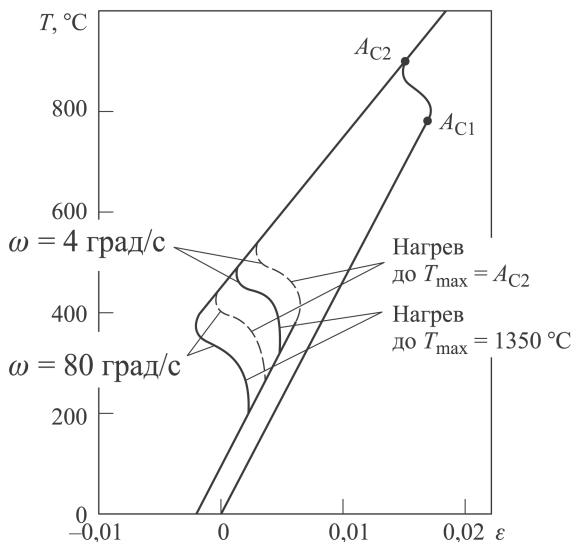


Рис. 5. Влияние степени аустенизации (ϵ) на температуру начала превращения аустенита (T_n)

6. В программе температура начала превращения аустенита (T_n), температурный интервал превращения аустенита (ΔT_n) и фазовая дилатация при превращении аустенита ($\Delta \epsilon_f$) задавались в зависимости от скорости охлаждения.

Числовые значения этих зависимостей определялись путем снятия дилатограмм при различных скоростях охлаждения и их обработки. Полученные результаты приведены на рис. 6.

Алгоритм решения задачи и экспериментальную оценку исходных данных выполняли в следующей последовательности.

1. Ввод информации о теплофизических и механических свойствах.
2. Ввод данных о режиме сварки.
3. Выбор координаты поперечного сечения свариваемой пластины.
4. Расчет температурного поля и термического цикла сварки в различных волокнах сварного соединения.
5. Определение дилатограмм и релаксограмм свариваемой стали в соответствии с полученным термическим циклом.
6. Расчет температур в заданном сечении пластины.
7. Определение для выбранного волокна свободной деформации в зависимости от температуры нагрева, этапа нагрева или остывания, а также месторасположения данной точки в зоне фазовых превращений или вне ее. На этом же этапе задавались значения T_n , ΔT_n , $\Delta \epsilon_f$ в зависимости от скорости охлаждения.
8. Определение сопротивления металла деформированию: ввод данных о сопротивлении деформированию при сварочном нагреве, а также ввод информации о сопротивлении деформированию при превращении аустенита.

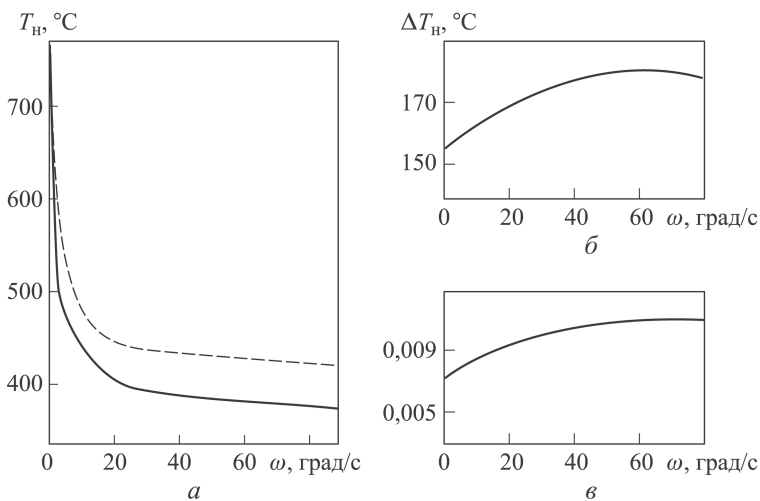


Рис. 6. Влияние скорости охлаждения:

a — на температуру начала $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения (T_n), штриховой линией показана зависимость начала превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ при максимальном нагреве до $T_{\max} = A_{C3}$; *б* — на температурный интервал $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения — ΔT_n ; *в* — на фазовую дилатацию при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении — $\Delta \varepsilon_f$

9. Расчет временных деформаций. Определение значений (эпюры) упругих деформаций и внутренних продольных напряжений.

10. Уточнение эпюры упругих деформаций в связи с зависимостью модуля упругости от температуры.

Расчет проводился применительно к случаю сварки пластин из стали 15X2НМФА встык аустенитным электродом ЭА395/9 (10X16Н25М6). Сварка пластин толщиной $\delta = 3$ мм велась на следующем режиме: сварочный ток — 200 А; напряжение — 25 В; скорость сварки — 9 м/ч.

Результаты проведенного расчетного анализа развития продольных сварочных напряжений представлены на рис. 7. Как следует из представленных результатов, существенное влияние на кинетику развития сварочных напряжений в отдельных зонах сварного соединения оказывает жесткость сварного соединения (ширина пластины).

Так, в зоне, непосредственно прилегающей к линии сплавления (кривая 2, см. рис. 7, *a*), при ширине пластины $H = 10$ см развиваются сжимающие напряжения. Увеличение ширины пластины до $H = 20$ см приводит на этапе остывания в начальный момент к развитию в металле околошовной зоны (ОШЗ) также сжимающих напряжений, но при дальнейшем остывании сжимающие напряжения уменьшаются и к моменту полного охлаждения сварного соединения образуются значительные растягивающие напряжения (см. рис. 7, *б*, кривая 2).

Полученные результаты указывают на то, что увеличение жесткости сварного соединения теплоустойчивых сталей приводит к накоплению пластической деформации в металле зоны сплавления. В работе [6] также показано, что увеличение жесткости сварного соединения

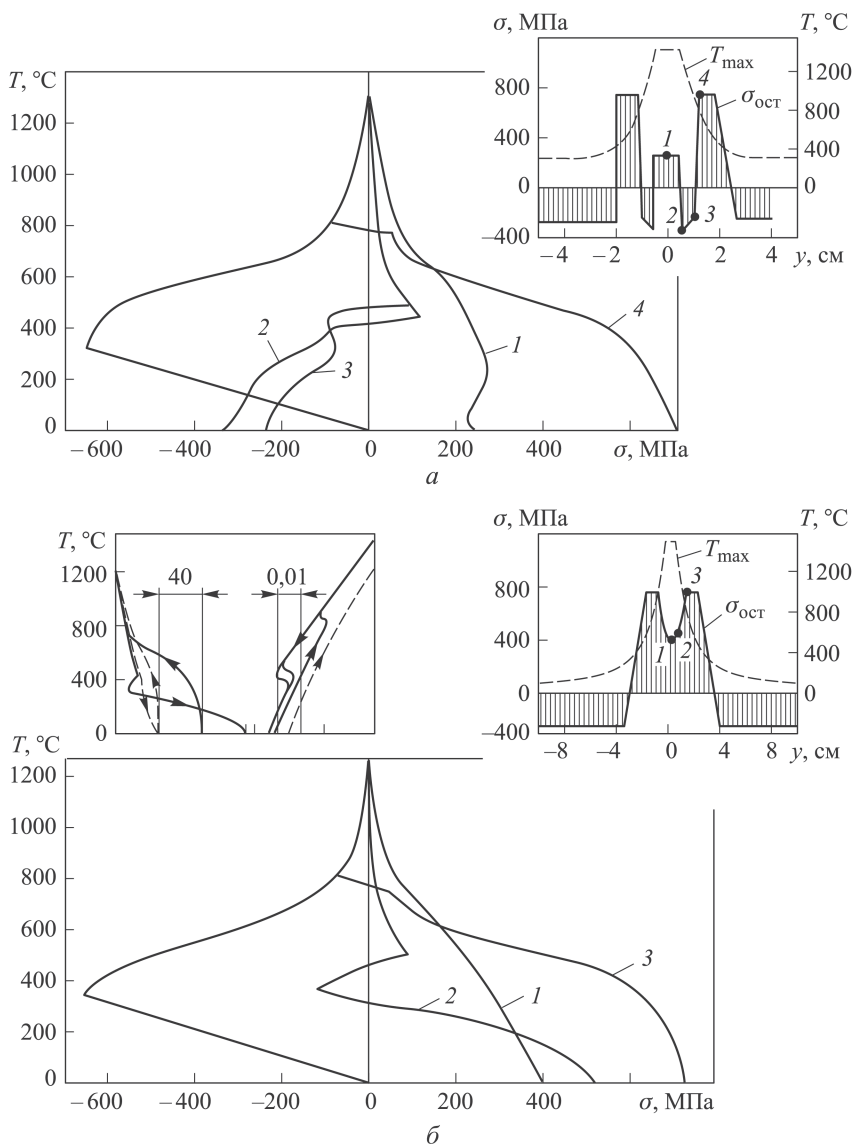
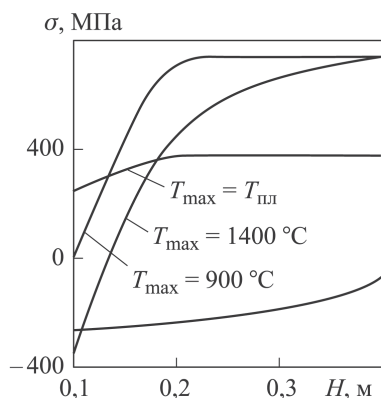


Рис. 7. Развитие продольных напряжений в пластине шириной $H = 10$ см (а), $H = 20$ см (б) из стали 15X2NMФА при сварке аустенитными электродами ЭА395/9 (10X16H25M6)

приводит к локализации деформаций в металле шва и к возрастанию интенсивности деформаций в области границы сплавления. Данное обстоятельство обуславливает повышенную вероятность образования в этой зоне микротрещин. В процессе повторного нагрева данные дефекты могут служить очагами разрушений при повторном нагреве (РПН).

Накопленная в процессе сварки пластическая деформация, если даже не возникают трещины, имеет немаловажное значение. Чем больше накоплено в металле пластической деформации в процессе сварки, тем

Рис. 8. Влияние ширины пластины на формирование остаточных сварочных напряжений в разных зонах сварного соединения для случая сварки пластин из стали 15X2НМФА аустенитными электродами (числа на кривых — максимальная температура нагрева металла, кривая без значений — остаточные напряжения на концах пластины)



меньше металл данной зоны может воспринять деформации при повторном нагреве и тем больше вероятность образования РПН. Необходимо также отметить, что в зоне границ зерен в процессе повторного нагрева происходит значительная локализация деформаций, обусловленная разной релаксационной стойкостью отдельных зон сварного соединения [7].

Следует обратить внимание на то, что на характер перераспределения остаточных сварочных напряжений оказывает влияние не только на ранее рассмотренные факторы, но и химический состав металла шва, а также режим сварки. Изменяя химический состав присадочного материала и режим сварки, можно в широких пределах изменять распределение внутренних напряжений, а следовательно, и вероятность образования разрушения при повторном нагреве.

Обобщенный график влияния жесткости сварного соединения на развитие сварочных напряжений в отдельных зонах сварного соединения приведен на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что существует критический уровень жесткости сварного соединения, ниже которого в наиболее опасной зоне в отношении образования РПН развиваются сжимающие внутренние напряжения — зоне, прилегающей к линии сплавления (на рис. 8 кривая с максимальной температурой нагрева $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данное обстоятельство указывает на то, что в сварных соединениях такой жесткости образование разрушения при повторном нагреве исключено. Однако, как отмечалось ранее, в этой зоне в процессе сварки могут возникать микротрещины, которые при повторном нагреве в условиях релаксации сжимающих внутренних напряжений могут раскрываться.

В целях подтверждения достоверности полученных расчетных данных были проведены экспериментальные исследования распределения остаточных сварочных напряжений в поперечном сечении пластины шириной $H = 20\text{ см}$ из стали 15X2НМФА, сваренной встык аустенитными электродами ЭА395/9.

Проведенные исследования показали удовлетворительное совпадение экспериментального и расчетного распределений остаточных напряжений. Экспериментальное исследование распределения продольной составляющей остаточных сварочных напряжений проводили методом Н.В. Калакуцкого. Применялась механическая резка стыкового сварного соединения на отдельные полосы, длина мерительной базы составляла 5 см.

В заключение необходимо отметить, что изучение процесса образования и развития сварочных деформаций и напряжений в сварных соединениях теплоустойчивых сталей позволяет решить актуальную задачу повышения сопротивляемости этих сталей хрупким разрушениям, в том числе и РПН. Проведенный расчетный анализ показал, что исследования условий образования разрушения данного вида необходимо проводить либо на жестких технологических пробах, либо использовать внешнее воздействие, если используются для испытаний малогабаритные сварные образцы. Внешнее воздействие можно осуществлять как за счет наложения подгружающих валиков, так и за счет приложения внешней силы. Развитие деформации ползучести в результате действия дополнительных сил в совокупности с другими процессами [7], развивающимися при повторном нагреве, позволит воспроизвести данный вид разрушения и изучить его особенности.

Выводы. 1. Расчетный анализ позволил установить характер развития внутренних сварочных деформаций и напряжений при сварке пластин из теплоустойчивых сталей типа 15Х2НМФА.

2. Показано, что на кинетику развития сварочных напряжений в отдельных зонах сварного соединения существенное влияние оказывает жесткость сварного соединения (ширина пластины).

3. Значение и знак остаточных напряжений в закаленной зоне при сварке теплоустойчивых сталей определяется жесткостью сварного узла. Расчетным путем показано, что существует критический уровень жесткости сварного соединения из теплоустойчивых сталей, ниже которого в наиболее опасной зоне в отношении образования РПН развиваются сжимающие внутренние напряжения.

4. Показано удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных по распределению продольных остаточных напряжений в пластинах из теплоустойчивой стали типа 15Х2НМФА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Земзин В.Н., Шрон Р.З.* Термическая обработка и свойства сварных соединений. Л.: Машиностроение, 1978. 367 с.
2. *Зубченко А.С., Федоров А.В., Сулова Е.А.* Исследование влияния повторного нагрева на упрочнение и растрескивание сварных соединений перлитных сталей // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 2–5.
3. *Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф.* Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.

4. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке. Т. 2. М.: Metallurgiya, 1976. 600 с.
5. 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.
6. Касаткин Б.С. Полосы текучести в сварном соединении // Автоматическая сварка. 1973. № 6. С. 1–4.
7. Зубченко А.С., Федоров А.В., Нечаев Ю.В. Исследование причин растрескивания сварных соединений толстостенных сосудов давления при последующей термической обработке // Сварка и диагностика. 2009. № 2. С. 21–25.

REFERENCES

- [1] Zemzin V.N., Shron R.Z. Termicheskaya obrabotka i svoystva svarnykh soedinenii [Heat treatment and properties of weldments]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 367 p.
- [2] Zubchenko A.C., Fedorov A.B., Suslova E.A. Research of the Effect of Reheating on Hardening and Cracking Pearlite Steel Welded Joints. *Svarka i diagnostika* [Welding and diagnostics], 2009, no. 4, pp. 2–5 (in Russ.).
- [3] Makarov E.L., Iakyshin B.F. Teoriya svarivaemosti staley i splavov [Theory of Weldability metals]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2014, 487 p.
- [4] 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.
- [5] Prokhorov N.N., Khydiev Sh.N. Methodology of calculation of deformations and tensions taking into account phase transformations at surfacing of welding roller on the edge of stripe. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Material Processing], 1972, no. 3, pp. 5–7 (in Russ.).
- [6] Kasatkin B.S. Stripes of fluidity are in the weld-fabricated connection. *Avtomaticeskaya svarka* [Automatic Welding], 1973, no. 6, pp. 1–4 (in Russ.).
- [7] Subchenko A.C., Fedorov A.B., Nechaev Iu.B. Research the Causes of Cracking Welded Joints of Thick-Walled Pressure Vessels in the Subsequent Heat Treatment. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2009, no. 2, pp. 21–25 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.02.2015

Дрижов Виктор Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 28 научных работ в области сварочного производства.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Drizhov V.S. — Ph.D. (Eng.), Associated Professor of Engineering, Materials Processing Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University, author of 28 research publications in the field of welding engineering.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дрижов В.С. Расчетный анализ развития внутренних напряжений в сварных соединениях из теплоустойчивых сталей типа 15X2HMФА // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 130–141.

Please cite this article in English as:

Drizhov V.S. Calculation analysis of internal tension development in the joints of the welded thermally stable steels of 15KH2NMFA type. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 4, pp. 130–141.