

overheating, respectively, of the consumed energy for melting and to ensure resource-saving surfacing technology.

The process of surfacing with two tape electrodes, even when using fluxes recommended for electric arc welding, partially proceeds as electroslog, since a certain fraction of the current is shunted by molten slag. This helps to reduce the depth of penetration and reduce the share of the base metal in the weld metal. The main advantage of surfacing with two tape electrodes is obtaining the deposited metal of the required chemical composition already in the 1st or 2nd layer, in contrast to single-electrode surfacing, where it is necessary to apply from 3 to 5 layers.

The results of studies of the influence of the oscillation frequency of ribbon electrodes showed that the maximum increase in the melting coefficient occurs when using the oscillation frequency in the range of 45-55 Hz, regardless of the other parameters of the mode.

Keywords: submerged arc welding, mechanical transfer of electrode metal, mode parameters, base metal participation share.

Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук, проф. Щетинін С. В.

Стаття надійшла 7.10.2019 р.

УДК 669-413

doi.org/10.31498/2522-9990212019187068

Лоза А. В., Рассохин Д. А., Носовский Б. И., Шишкин В. В.

ТЕРМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе выполнен анализ процесса термической правки металлических изделий, который применяется для исправления дефектов формы стальных заготовок. Рассмотрены условия, необходимые для обеспечения деформирования заготовок. Проанализированы соотношения между толщинами нагреваемого и холодного слоев в деформируемом изделии. Выполнена проверка применимости известных рекомендаций по термоправке к элементам конструкций толщиной более 50 мм.

Ключевые слова: термическая правка, нагрев заготовок, исправление формы, деформации, местный нагрев

Постановка проблемы. В ряде случаев в технологических процессах происходит нагрев и тепловая деформация стальных изделий, например, при эксплуатации металлургического оборудования, или при сварке стальных заготовок. Как для металлургических узлов, так и для сварных конструкций искажение формы изделия даже на небольшом участке рабочей поверхности может значительно повлиять на корректность выполнения технологии, а также служебные характеристики изделия и срок его службы. Для ликвидации остаточных деформаций в стальных заготовках разработан ряд рекомендаций [1] с использованием принципов термической правки [1–5], которые применяются в различных областях промышленных технологий. В указанных рекомендациях были учтены результаты отечественных и зарубежных исследований по методам исправления остаточных деформаций. Однако в рекомендациях не конкретизированы максимальные размеры по толщине заготовок, которые могут использоваться для исправления геометрических размеров. В то же время на производстве, например, в металлургической отрасли, встречаются случаи, когда возникает необходимость исправить дефекты формы в изделиях значительной толщины. Такому вопросу не было посвящено специального исследования, поэтому он является актуальным.

Цель статьи – анализ технологии устранения дефектов формы в стальных заготовках с помощью нагрева и проверка применимости известных рекомендаций по термоправке к элементам конструкций значительной толщины.

Изложение основного материала. В целом ряде случаев, например, в мостостроении, исправление дефектов формы является необходимым этапом подготовительных работ перед выполнением основных технологических операций. Технология исправления дефектов формы листового и фасонного проката используется в мостостроении [1]. Необходимость такой операции обусловлена требованием соблюдения точности конечной макроконструкции. Используются различные варианты технологии правки заготовок. Исследованиями установлено, что среди других возможных вариантов выборочного деформирования заготовок наиболее технологичными являются способ газопламенной правки (термическая правка), и способ термомеханической правки элементов конструкций, схема которых представлена на рис. 1.

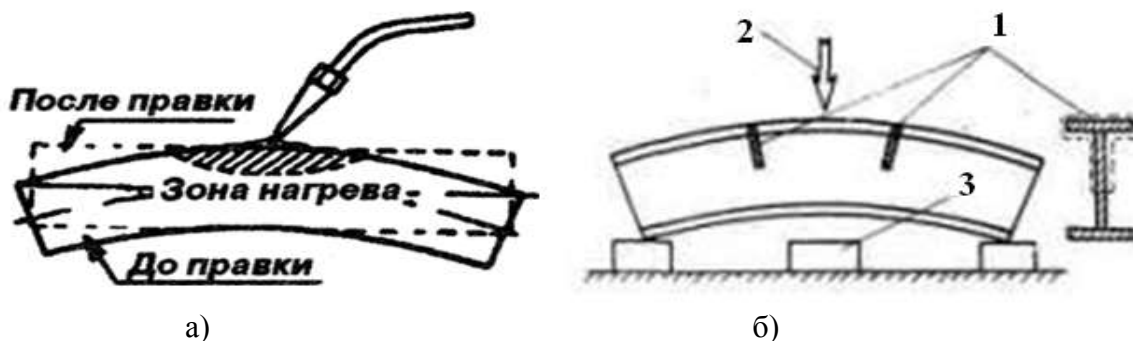


Рисунок 1– Схема процесса изменения геометрической формы изделия с применением газопламенного нагрева: (термическая правка (а) и термомеханическая правка (б): 1- участки нагрева, 2- груз, 3 – упор

В результате операции правки за счет местного пластического деформирования возможно обеспечить формоизменение листовых заготовок, профильного проката и других изделий.

При наиболее экономичном способе (термоправка) процесс изменения формы обеспечивается за счет местного нагрева металла. При этом свободные деформации нагретого участка изделия ограничены окружающими областями холодного металла, который обладает более высокими механическими свойствами, т.е. имеет большую прочность и жесткость. Местный нагрев пламенем деформируемых изделий выполняют таким образом, чтобы в нагретой зоне возникли напряжения сжатия, которые должны превысить предел текучести. В этом случае после охлаждения изделия происходит сокращение размеров нагретого участка. Обычно в таких процессах нагрев выполняют со стороны участка, длину которого нужно сократить. Физический смысл процесса заключается в получении односторонней несимметричной пластической деформации в изделии. При этом металлическая заготовка на участке неравномерного нагрева работает в режиме «термического биметалла», то есть имеет два слоя с различными свойствами и соответственно - различным удлинением слоев. За счет сжатия нагретого участка окружающими холодными участками и осуществляется процесс пластического деформирования. Главными преимуществами способа термической правки являются возможность применения в любых условиях для конструкций практически любой формы и сложности. Мобильность обеспечения газопламенного нагрева обеспечивает технологичность применения способа и малые затраты на его осуществление. В частности,

локальним термическим деформированием выполняют правку листового и фасонного проката, рис.2.

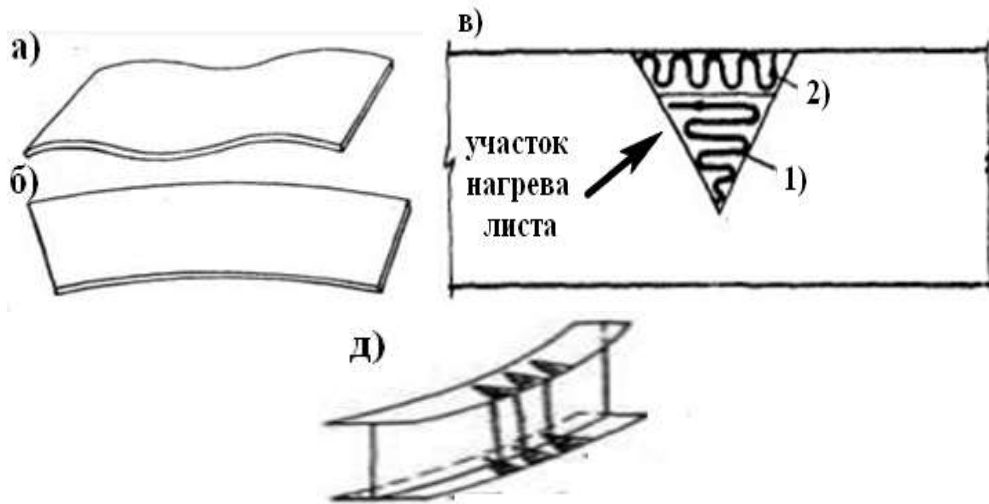


Рисунок 2 – Виды дефектов листовых заготовок (а, б) и схема исправления дефектов термоправкой листов (в) и двутавровых балок (д): 1, 2 – участки нагрева

В то же время в известных рекомендациях [1] не указываются пределы изменения толщин заготовок для термоправки, и применимость рекомендаций для изделий значительной толщины. Данный вопрос в большей степени интересен не для сварочных операций, а для металлургического оборудования, металлоемкие детали которого могут деформироваться при высокотемпературной эксплуатации. Экспериментальное опробование термической правки различных деталей толщиной более 50 мм показало, что распределение температуры в них и формирование температурных полей может существенно отличаться, что существенно влияет на характер возникновения температурных деформаций.

Процесс термического деформирования заготовок базируется на том, что должно соблюдаться определенное соотношение между объемом нагретого металла (ориентировочно до температуры 650-700 °C) и объемом окружающего более холодного металла. Для листовых заготовок это соотношение проще выражать через толщины нагретой части заготовки R_1 и не нагретой части R_2 . Целенаправленное деформирование металлических заготовок возможно лишь при соотношении $R_1/R_2 = 0,1 \dots 0,25$. Соблюдение указанного соотношения не является обязательным для процесса термомеханической правки, однако он требует дополнительного оборудования. Фактически для реализации процесса термоправки нужно обеспечить только подвод тепла к определенному участку изделия. При этом в области нагрева заготовка работает в режиме «термического биметалла», в котором из-за разности свойств слоев, могут возникать несимметричные деформации. Выход за пределы указанного соотношения приводит либо к недостаточной пластической деформации нагреваемого участка (при $R_1/R_2 < 0,1$), либо к нагреву и расширению более холодного слоя ($R_1/R_2 > 0,25$), когда происходит одновременное упругое расширение обоих слоев. Для заготовок промышленного масштаба соблюдение указанного соотношения R_1/R_2 фактически зависит от времени нагрева заданной площади изделия на глубину R_1 . Если время нагрева t превышает некоторую критическую величину $t_{кр}$, то в нагреваемом изделии необходимо учитывать отвод тепла в более холодный слой и потери в окружающую среду. Выравнивание температуры слоев с толщинами R_1 и R_2 не может обеспечить процесс целенаправленного

деформирования металлического изделия и исправления его геометрических дефектов, т.к. заготовка в своем тепловом расширении переходит из режима «термического биметалла» в режим нагреваемого монометалла. То есть, в процессе нагрева при термическом деформировании должны соблюдаться следующие соотношения между размерами (толщинами) слоев R обрабатываемого изделия:

$$0 < R < R_1, T = T_{\text{задан}}; \quad (1)$$

$$R_1 < R < R_2, T = T_0; \partial T / \partial R = 0; \quad (2)$$

где T – текущее значение температуры металла, °K;

T_0 – начальное значение температуры не нагретой заготовки, °K;

$T_{\text{задан}}$ – заданное значение температуры нагрева для протекания пластических деформаций, °K.

В качестве заданной температуры при исправлении дефектов стальных заготовок обычно принимают температуру 923–973 °K (650–700 °C). При значительных габаритах изделия такие условия с увеличением времени нагрева реализовать затруднительно, т.к. температура по сечению изделия выравнивается в соответствии с классическим уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right) = 0, \quad (3)$$

где T – температура, °C;

R – размер по толщине заготовки, м;

t – время, с;

a – температуропроводность, м²/с.

При вычислении температуропроводности учитываются теплофизические свойства материала:

$$a = \lambda / c\gamma,$$

где λ – теплопроводность, Вт/м·K;

c – удельная теплоемкость, Дж/кг·K;

γ – плотность, кг/м³.

В связи с протеканием непрерывного процесса выравнивания температуры в массивных заготовках одновременное выполнение условий (1) и (2) является затруднительным при условии перемещении источника нагрева. Температура поверхности заготовки при этом не остается неизменной. Зачастую при создании тепловых моделей принимают граничные условия 1-го рода, когда задается определенная температура на поверхности изделия, хотя на практике при нагреве массивных изделий движущимися источниками нагрева условие (2), как правило, не выполняется. При увеличении либо площади нагрева, либо времени нагрева температура непрерывно изменяется и на поверхности заготовки, и в более холодном слое. В связи с этим, в производственных условиях процесс термической правки трудно поддается автоматизации и дистанционному управлению. Причина этого – сложность моделирования происходящих тепловых и деформационных процессов. На это влияет, в том числе, и особенность базовых принципов

создания твердотельных моделей, согласно которым модели присваиваются свойства однородного идеализированного материала. Из-за того, что свойства и поведение материала фактически усредняются, с учетом дополнительно принятых допущений, модели в результате отражают усредненные свойства твердого тела с послойным распределением характеристик, рис.3.

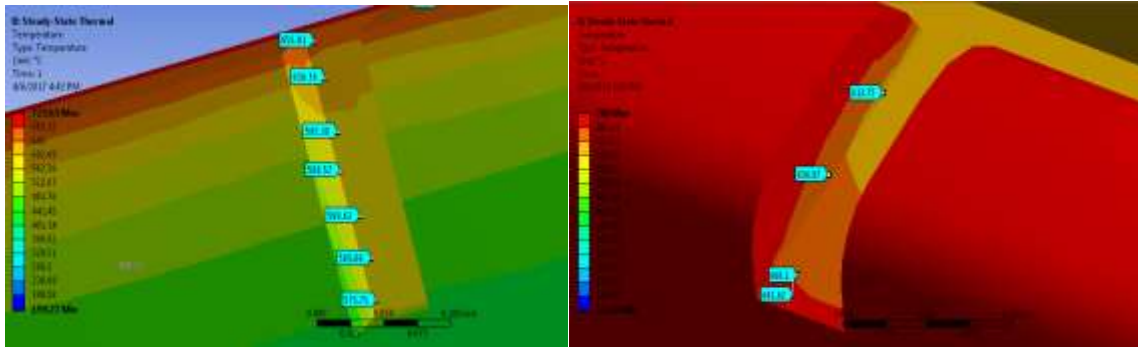


Рисунок 3 – Распределение температур в моделях деталей металлургического оборудования, полученные с применением 3D моделирования

Такая картина не всегда соответствует действительности, т.к. не учитываются локальные перегревы поверхности и внутренних участков, которые могут иметь, например, несколько другие теплофизические свойства.

В связи с этим были экспериментально опробованы различные режимы термической правки стальных пластин различной толщины в диапазоне 40 ... 110 мм. При этом за основу технологии нагрева были приняты вышеуказанные рекомендации. При опробовании были использованы заготовки из стали марок 25, 30, 09Г2С. В результате опробования оказалось, что термическая правка с соблюдением общеизвестных рекомендаций, для заготовок толщиной более 50 мм не приводит к получению заданных пластических деформаций. В заготовках больших толщин значительно труднее получить необходимое распределение температур между нагреваемым и холодным слоями из-за увеличения времени нагрева. Для больших толщин заготовок условие (2) при нагреве не выполняется. Это связано с передачей тепла теплопроводностью от нагреваемого участка к окружающим холодным. Кроме того, на процесс распространения тепла непрогнозируемо оказывают влияние внутренние дефекты металлургического происхождения (неспложности), которые обычно закатываются при больших степенях обжатия проката. Это влияет на формирование температурных градиентов и протекание процесса деформирования. Рекомендации по термической правке стальных заготовок толщиной более 50 мм должны быть уточнены дополнительными исследованиями.

ВЫВОДЫ

Термическая правка изделий является доступным и технологическим процессом исправления формы стальных заготовок и элементов конструкций, и может применяться практически в любых монтажных условиях. При использовании общеизвестных рекомендаций по исправлению дефектов формы в них нужно вносить уточнения в технологию обработки при толщине заготовок более 50 мм.

Список использованных источников:

1. Указания по методам правки элементов сварных мостовых конструкций / ВНИИТС. – М.: Минтрансстрой, 1973. – 49 с.
2. Антонов, И. А. Газопламенная обработка металлов / И. А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
3. Шолохов, М. А. Газопламенная правка металлов / М. А. Шолохов, М. Zeller // Сварка и диагностика: сб. докл. междунар. форума (Екатеринбург, 25–27 ноября 2014 г.). – Екатеринбург, 2014. – С. 176–181.
4. Методика расчета и технологии правки деформаций в стальных конструкциях мостов. СТО 01393674-735-2006. – М.: НИИТС, 2008. – 52 с.
5. Корольков, П. М. Термическая обработка сварных соединений / П. М. Корольков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Киев: Екотехнология, 2006. – 176 с.

Лоза А. В., Рассохін Д. О., Носовський Б. І., Шишкін В. В.

ТЕРМІЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ТОВСТОЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

В металургійних і зварювальних технологіях існує проблема теплової деформації сталевих виробів. Зміна форми виробу навіть на невеликій ділянці робочої поверхні може значно вплинути на коректність виконання технології його використання, а також на службові характеристики та термін його служби. Для ліквідації залишкових деформацій в сталевих заготовках розроблені рекомендації з використанням принципів термічної правки. Проте в них не конкретизовані максимальні розміри по товщині заготовок, які можуть використовуватися для виправлення геометричних розмірів. Проте на виробництві, наприклад, в металургійній галузі, виникає необхідність виправити дефекти форми у виробах значної товщини. Найбільш економічним способом є термічна правка, коли процес зміни форми забезпечується за рахунок місцевого нагріву металу. В результаті операції правки за рахунок місцевої пластичної деформації можливо забезпечити зміну форми листових заготовок, профільного прокату та інших виробів. При цьому вільні деформації нагрітої ділянки виробу обмежені навколишніми областями холодного металу, який має більш високі механічні властивості, тобто має найбільшу міцність і жорсткість. Місцевий нагрів полум'ям виробів, що деформуються, виконують так, щоб в нагрітій зоні виникла напруга стискування, яка повинна перевищити межу плинності. В цьому випадку після охолодження виробу відбувається скорочення розмірів нагрітої ділянки. При цьому металева заготовка на ділянці нерівномірного нагріву працює в режимі «термічного біметалу», тобто має два шари з різними властивостями і відповідно - різним подовженням шарів. За рахунок стискування нагрітої ділянки навколишніми холодними ділянками саме й здійснюється процес пластичної деформації. В той же час у відомих рекомендаціях не вказуються межі зміни товщини заготовок для термічної правки, та пристосування рекомендацій для виробів значної товщини.

Аналіз процесу термічного деформування показує, що необхідно дотримуватися певного співвідношення між об'ємом нагрітого металу (орієнтовно до температури 650-700°C) та об'ємом навколишнього більш холодного металу. Для листових заготовок це співвідношення простіше виражати через товщину нагрітої частини заготовки R_1 та не нагрітій частині R_2 . Цілеспрямована деформація металевих заготовель можлива лише при співвідношенні $R_1/R_2 = 0,1...0,25$. У масивних тілах відбувається безперервний процес вирівнювання температури, відповідно до класичного рівняння теплопровідності.

Тому при використанні загальновідомих рекомендацій по виправленню дефектів форми заготовок в них треба вносити уточнення в технологію обробки для товщини більше 50 мм.

Ключові слова: термічна правка, нагрів заготовок, виправлення форми, деформації, місцевий нагрів.

Loza A. V., Rassokhin D. A., Nosovskyy B. I., Shishkin V. V.

THERMAL STRAIN OF HEAVY PLATE STRUCTURES

Thermal strain is often a big problem for iron and steel and welding processes. Any alternations in a part's shape even on a small section of the operating surface can have a sufficient negative influence upon the precision of its technological application, as well as its operating characteristics and its service life. In order to avoid residual strain in steel ingots there were developed recommendations presuming the principles of thermal straightening. However, they lack detailed elaboration of maximum dimensions of ingot lengths, that can be used for improvement of geometric dimensions. Still, sometimes, in manufacturing practice, for example in iron and steel industry, there may arise the need to clarify defects of shape of pieces with considerable thickness. Thermal straightening is understood to be the most economical method, because there the process of alternation of shape is ensured by means of local metal heating. As a result of the strengthening operation it is possible to ensure deformation of plate ingots, rolled sections and other parts by means of plastic strain, thermal expansion of the heated section of the part being limited by the adjoining areas of cold metal, possessing superior mechanical properties, i.e. higher strength and toughness. Local heating with flame of strained parts is performed in such a way so that compression strain should appear inside the heated area, what is likely to exceed the yield point in this case the heated section will diminish its dimensions after the part cooling. At that the metal ingot acts in the section of uneven heating in the mode of «thermal bimetal», i.e. it possesses two layers with different properties and hence it has different elongation of the layers. Due to compression of the heated section by the adjoining cooler sections the process of thermal strain is performed. At the same time the existing recommendations do not specify the limits of alternations of ingots thicknesses for thermal straightening as well as the applicability of such recommendations for parts with considerable length.

The analysis s shows that a certain relationship between the volume of heated metal (approximately up to 650-700 °C) and the volume of the adjoining cooler metal is to be observed. For plates this relation can be more easily expressed through thicknesses of the heated section of R_1 rather than through the heated section of R_2 . Purposeful straining of metal ingots is possible only at $R_1/R_2 = 0,1...0,25$. In massive bodies continuous process of temperature equalization goes on, in accordance of the classical equation of heat conductivity.

So, for application of well-known recommendations, regarding of defects of ingots shape some adjustments should be applied for treatment of thicknesses exceeding 50mm.

Keywords: *thermals rationing in gots heating, correction of shape, deformations, local heating.*

Рекомендована к публикации: к.т.н., доц. Лаврик В. П.

Статья принята: 3.11.2019 г.