

УДК 624.072.002.2

Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния стальных пластин, предварительно напряженных локальным термическим воздействием

Антошина Т.В., аспирант

Донбасский государственный технический университет, Украина

Анотація. Наведені методика і результати експериментального визначення впливу залишкових напружень на стійкість пластин. Встановлений кількісний вплив залишкових напружень після регулювання на стійкість і прогин.

Аннотация. Приведены методика и результаты экспериментального определения влияния остаточных напряжений на устойчивость пластин. Установлено количественное влияние остаточных напряжений после регулирования на устойчивость и прогиб.

Abstract. A method and results of experimental determination of influence of residual stresses is resulted on stability of plates. Quantitative influence of residual stresses is set after adjusting on stability and bending.

Ключевые слова: пластина, температурные воздействия, остаточные напряжения, устойчивость, прогиб.

Введение. Постановка проблемы. Наличие сварных швов, зон термических воздействий вызывает появление в элементах металлоконструкций остаточных растягивающих напряжений (ОРН), которые влияют как на устойчивость отдельных элементов металлоконструкций, так и на несущую способность и деформативность конструкции в целом.

Наличие остаточного напряженного состояния (ОНС), возникающего при изготовлении металлоконструкций, неоднозначно влияет на несущую способность металлических конструкций. Влиянию ОНС на работу сжатых элементов посвящены многочисленные исследования [1 – 4, 6 – 9].

В работе Николаева Г.А., Куркина С.А., Винокурова В.А. [4] показано, что под действием усадочных сил возникают напряжения сжатия, вызывающие потерю устойчивости листов. Рассмотрены два типа задач: определение возможности потери устойчивости и определение перемещений после потери устойчивости.

Исследованиям влияния напряжений, вызываемых сваркой, на местную устойчивость стенки в зависимости от типа сварного шва посвящена работа Окерблома Н.О. [1]. Приведена методика оценки устойчивости лис-

тов под воздействием остаточных напряжений (ОН), а также методика определения ОН. Рассмотрено влияние ОН на устойчивость пластин при изготовлении элементов конструкций и определены ограничения, обеспечивающие устойчивость пластин с разными условиями закрепления.

В работе Игнатъевой В.С., Вершинина В.П., Барышева В.М [3] показано, что в ряде случаев ОН способствуют повышению местной устойчивости стенок двутавровых балок. Степень их влияния зависит от материала балки, сварочных материалов, величины тепловложения, геометрических параметров свариваемого элемента и порядка выполнения швов. Излагается методика проверки местной устойчивости стенки балки с учетом ОНС.

В работе А.И. Голоднова [6] показано, что устойчивость пластин может быть существенно повышена при применении регулирования ОНС путем прогрева участков пластин. Возникающее при этом ОНС, когда в центральной части пластины возникают остаточные растягивающие напряжения (ОРН), а в приконтурной зоне – остаточные сжимающие напряжения (ОСН), способствует повышению устойчивости. В то же время ОНС, возникающее после наплавки сварных швов по контуру, наоборот, способствует снижению устойчивости пластин вследствие появления ОНС, при котором в центральной части пластины возникают ОСН, а в приконтурной – ОРН.

Наличие ОНС требует серьезного подхода и к обеспечению устойчивости пластинчатых элементов – для предотвращения деформаций выпучивания обычно увеличивают толщину стенки или устанавливают дополнительные ребра жесткости, что приводит в большинстве случаев к неоправданному перерасходу материала. Избежать выпучивания стенки можно путем ее предварительного растяжения перед сваркой поясных швов [7].

Несмотря на наличие большого экспериментально-теоретического материала, в нормативных документах отсутствуют предложения по учету влияния ОНС на устойчивость пластин.

Известно (см., например, [1, 2, 5, 6]), что для того, чтобы плоский сжатый лист длиной a , шириной b и толщиной t не потерял устойчивость необходимо, чтобы напряжения в нем σ при упругой работе материала не превышали критическую величину

$$\sigma \leq \sigma_u = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad (1)$$

где k – коэффициент устойчивости пластин, учитывающий соотношение ширины b и длины a сжатого листа, а также схему приложения нагруз-

ки; E – модуль упругости стали; ν – коэффициент Пуассона.

Напряжения, возникающие в листе при изготовлении, также не должны превышать критические, иначе лист потеряет устойчивость.

При нагружении силовые напряжения σ_a суммируются с ОН σ_i , которые возникают от сварки. Тогда [1]

$$\sigma_B + \sigma_H \leq \sigma_U. \quad (2)$$

Если условие не удовлетворяется, появляется выхлоп в листе.

Цель работы. Экспериментальное подтверждение результатов теоретических исследований возможности повышения устойчивости сжатых пластин путем локальных термических воздействий (ЛТВ).

Основная часть. В качестве экспериментальных образцов использованы пластины размерами 500x500 мм и толщиной 5 мм. Материал пластин – сталь марки ВстЗГсп по ГОСТ 380-94 ($R_{yn} = 390$ МПа, $R_{tm} = 540$ МПа).

Температура разогрева пластин в центре составляла примерно 800 °С, 900 °С, 1000 °С. Пластины разогревались газовым резаком с одной стороны. Контроль температуры производился термопарой, установленной с обратной стороны пластины. Диаметр пятна при разогреве составлял 25...30 мм. Пластины нагревались в вертикальном положении, верхний и нижний края были свободно оперты, боковые края находились в свободном состоянии. Остывание пластин производилось как естественным путем на воздухе, так и принудительным – путем обрызгивания водой. После остывания пластины имели различную деформированную форму поверхности. Максимальная величина выгиба для разных пластин составляла 3 мм. Предварительные исследования пластин магнитным методом [10] показали, что наименьший разброс значений коэрцитивной силы наблюдается в пластинах с принудительным остыванием. Для сравнения были испытаны пластины в состоянии поставки, не подвергавшиеся ЛТВ.

Пластины испытывались на сжатие в специальной установке, смонтированной на машине ГРМ-100, до наступления момента развития пластических деформаций. Развитие пластических деформаций характеризовалось образованием линий Чернова–Людерса. Схема и общий вид установки показаны на рис. 1, линии сдвиговых деформаций в пластинах с температурой нагрева в центре 800 °С, 900 °С показаны на рис. 2.

С помощью тензорезисторов фиксировались характер изменения и качественная оценка главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$). Деформации определялись с помощью измерительной тензометрической системы СИИТ-3. Для определения главных напряжений использовались прямоугольные трех-

элементные «розетки» тензорезисторов сопротивления КФ 5П1-5-200-Б12 (см. рис. 1).

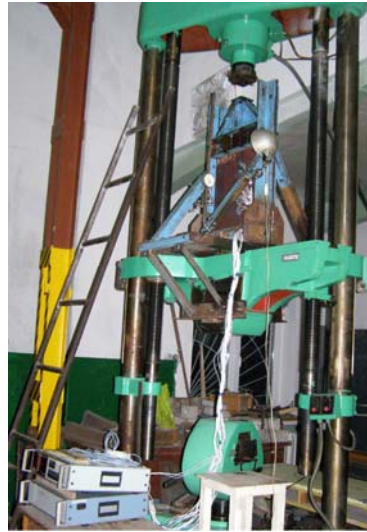


Рис. 1. Общий вид установки и пластины под прессом



Рис. 2. Линии сдвиговых деформаций (линии Чернова–Людерса) в некоторых пластинах после испытаний

Главные деформации вычислялись по формулам

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}. \quad (4)$$

Угол между направлением максимальной главной деформации и осью тензорезистора Г1

$$\phi_{2l} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – деформации по направлениям 1, 2, 3 соответственно.

Главные напряжения $\sigma_1 > \sigma_2$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\max} + \nu \cdot \varepsilon_{\min}); \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\min} + \nu \cdot \varepsilon_{\max}). \quad (7)$$

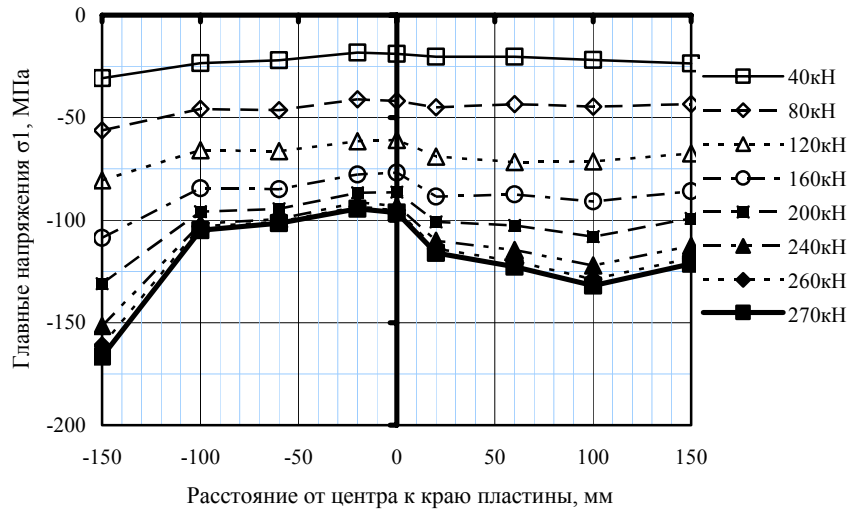
Графики изменения главных напряжений в зависимости от нагрузки для разных пластин приведены на рис. 3 – 6, на которых более жирной линией показана граница, при которой напряжения превышают предел текучести стали R_{yn} . Угол между направлением максимальной главной деформацией и осью тензорезистора Т1 составил: для П20 $\phi_{2l} = 0 \div 18,5^\circ$; для П800И2 $\phi_{2l} = 2,2 \div 39^\circ$; для П900И2 $\phi_{2l} = 1,6 \div 44,5^\circ$; для П1000И2 $\phi_{2l} = 0 \div 44,7^\circ$.

В процессе испытаний производились замеры прогиба центра пластины (выгиба из плоскости). Графики зависимости «нагрузка – прогиб» для некоторых пластин представлены на рис. 7.

Для пластин-образцов критическая нагрузка P_u при упругой работе материала, учитывая формулу (1), составляет $P_u = 190$ кН при шарнирном опирании ($a = b = 0,5$ м; $k = 4$). Рассмотрим результаты испытаний пластины в состоянии поставки. Максимальная нагрузка, при которой пластина потеряла устойчивость, составила $P = 270$ кН. Как видно из рис. 3, критические напряжения близки к пределу текучести ($\sigma_2 = -383,1$ МПа; $\sigma_1 = -166,6$ МПа). Различие между критической экспериментальной нагрузки с теоретической можно объяснить частичным защемлением краев пластины.

Характер распределения напряжений σ_2 практически прямолинейный до нагрузки $P = 120$ кН, с приближением напряжений к пределу текучести наблюдается рост главных напряжений ближе к краям пластины. Такое поведение может быть вызвано эффектом местного сжатия, а также неравномерным распределением напряжений по ширине пластины. Так, в работе [12] указано, что напряжения в срединной поверхности изменяются неравномерно по ширине пластины. Характерное распределение показано на рис. 8. При определении критической нагрузки учитывается только та

Распределение σ_1 в пластине П20



Распределение σ_2 в пластине П20

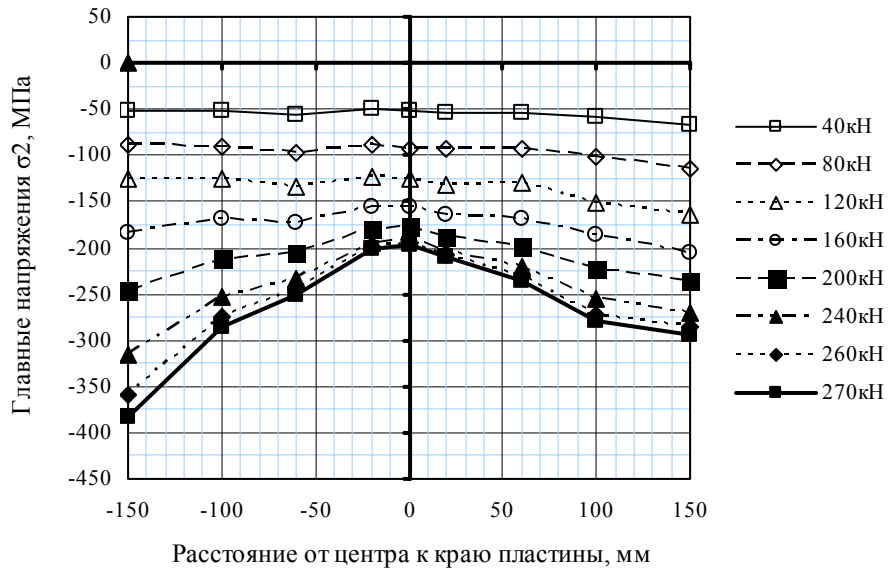
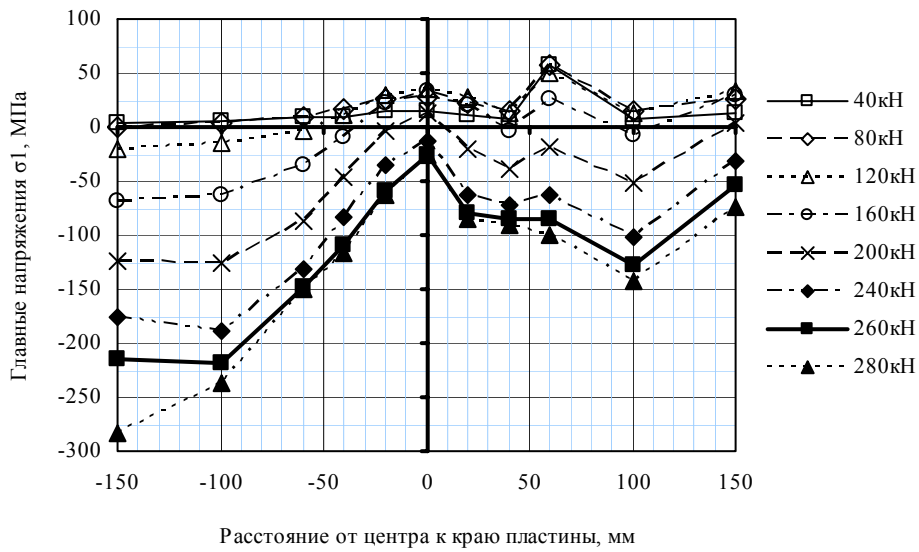


Рис. 3. Распределение главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$) в пластине в состоянии поставки

Распределение σ_1 в пластине П800И



Распределение σ_2 в пластине П800И

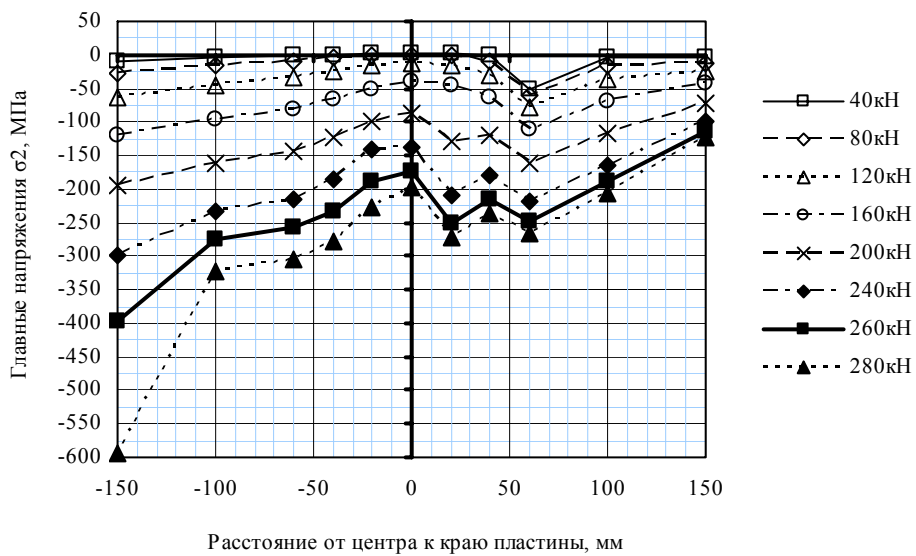


Рис. 4. Распределение главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$) в пластине с температурой нагрева в центре 800°C

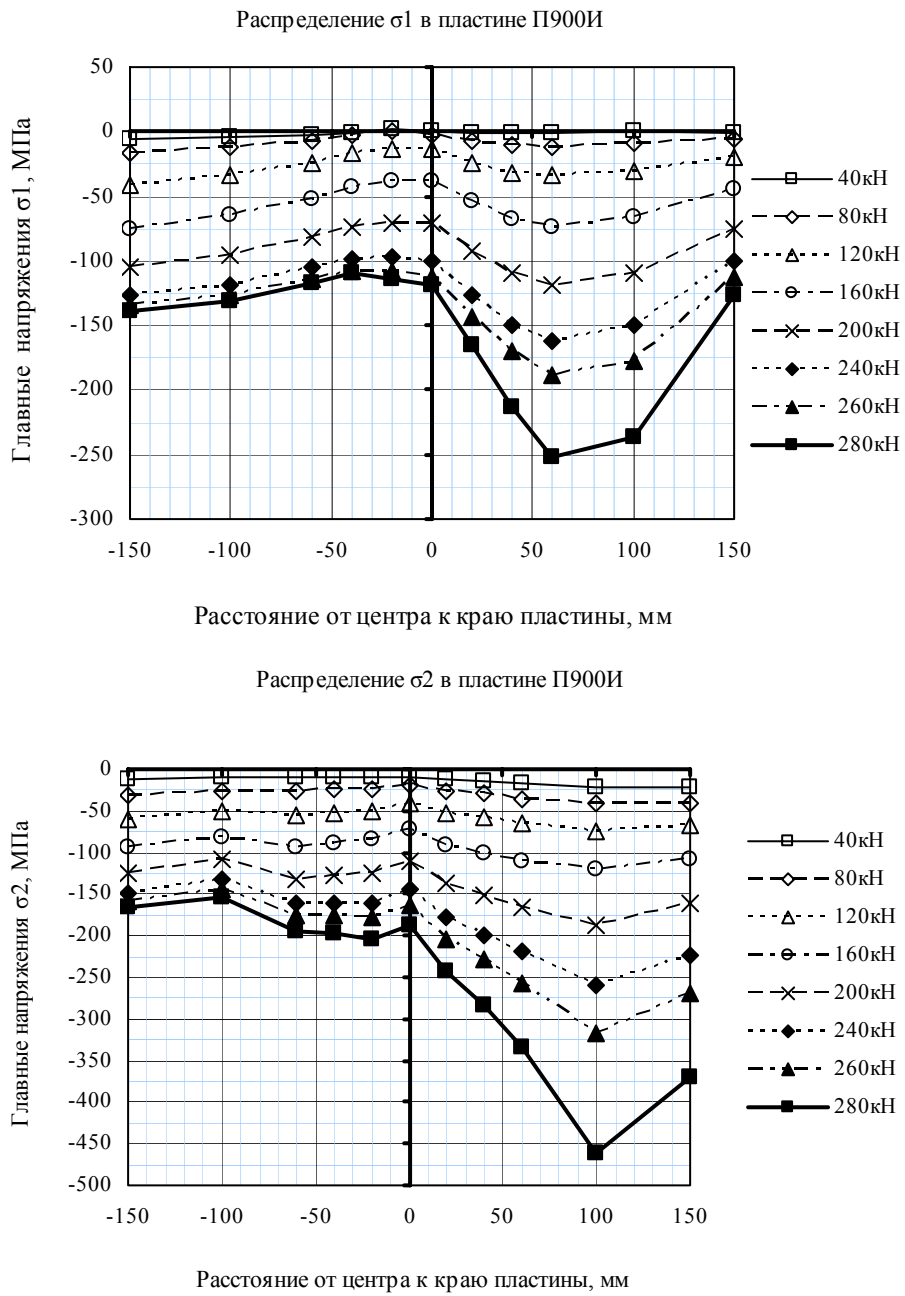
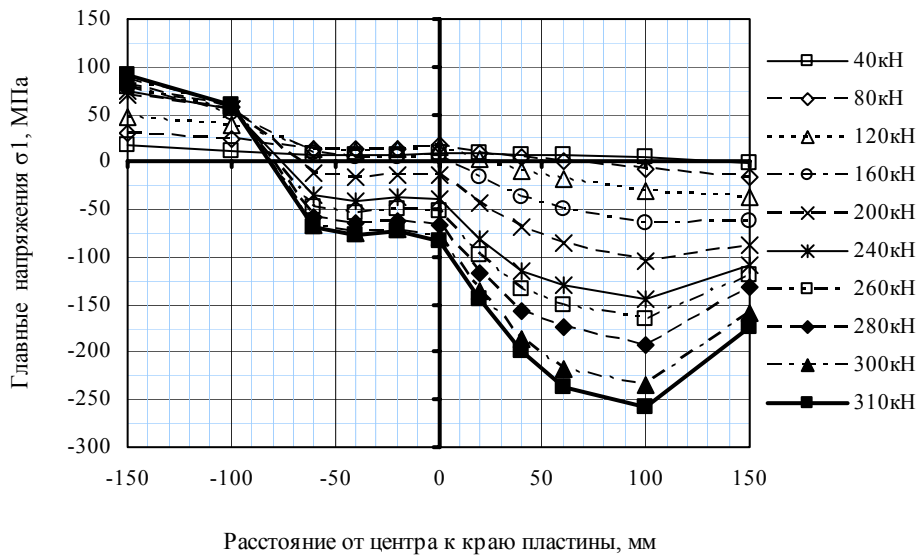


Рис. 5. Распределение главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$) в пластине с температурой нагрева в центре 900°C

Распределение σ_1 в пластине П1000И



Распределение σ_2 в пластине П1000И



Рис. 6. Распределение главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$) в пластине с температурой нагрева в центре $1000\text{ }^\circ\text{C}$

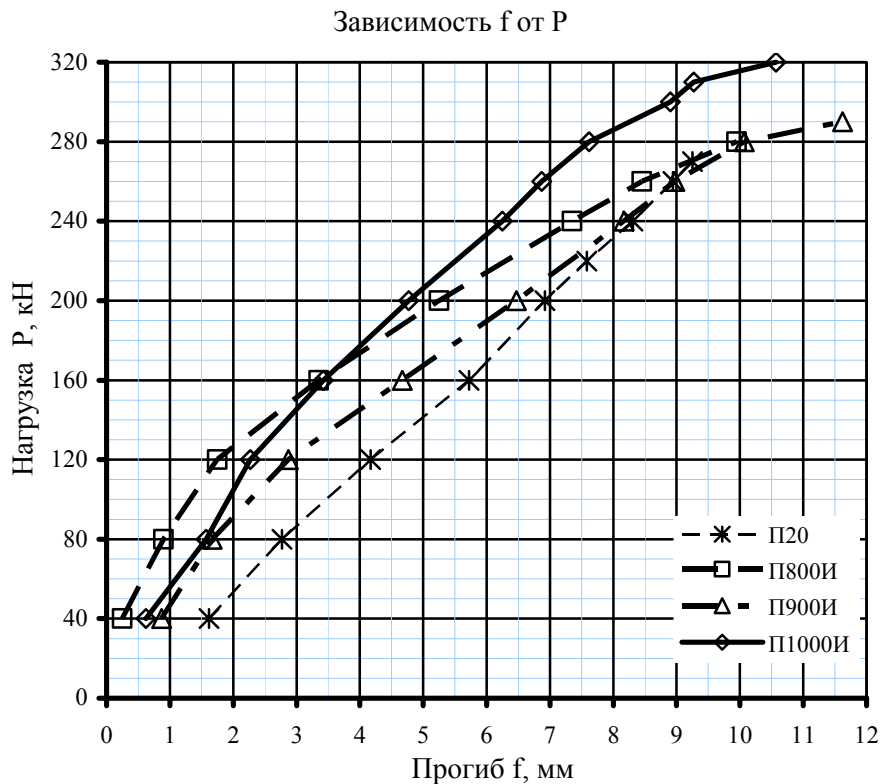


Рис. 7. Зависимость «нагрузка – прогиб» для пластин при разных температурах нагрева:

П20 – пластина в состоянии поставки; П800И2 – пластина с температурой нагрева до 800 °С; П900И2 – пластина с температурой нагрева до 900 °С; П1000И2 – пластина с температурой нагрева до 1000 °С

часть ширины пластины, которая воспринимает большую часть действующих напряжений. Отмечено, что с увеличением прогиба должна изменяться форма выпучивания пластины в сторону увеличения числа полуволн выпучивания в направлении сжатия.

Рассмотрим результаты испытания пластин с ЛТВ (см. рис. 4 – 6). Во всех пластинах при небольших внешних нагрузках (до 80 кН) присутствуют растягивающие напряжения в зоне ЛТВ, а в пластинах с температурой нагрева 800 °С и 1000 °С растягивающие напряжения возникают около краев. Также нет симметрии относительно центральной линии «0» вследствие неравномерного искривления поверхности пластин. Характер распределения напряжений одинаков для пластин с температурой нагрева 900 °С и 1000 °С (нет резких скачков, наблюдаемых в пластине с темпера-

турой нагрева 800 °С). Во всех пластинах с ЛТВ произошла потеря устойчивости при пластической работе материала. Критическая нагрузка для преднапряженных пластин больше, чем для пластины в состоянии поставки ($P_u=270$ кН для пластины в состоянии поставки; $P_u=280$ кН для пластины с температурой нагрева 800 °С; $P_u=290$ кН для пластины с температурой нагрева 900 °С; $P_u=320$ кН для пластины с температурой нагрева 1000 °С). Развитие существенных пластических деформаций для пластины, нагретой до 800 °С, происходило постепенно, а в пластинах с температурой нагрева 900 °С и 1000 °С выхлоп произошел почти мгновенно (была зафиксирована критическая нагрузка и только прогиб центра пластины).

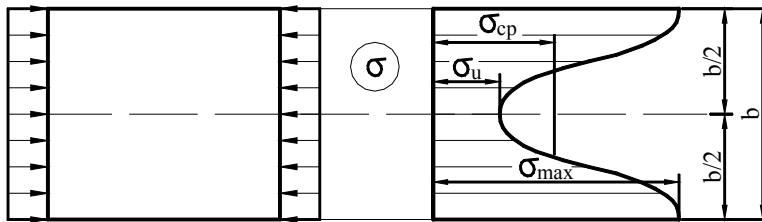


Рис. 8. Распределение закритических напряжений в срединной поверхности прямоугольной пластины

Рассмотрим графики зависимости «нагрузка–прогиб». Из рис.7 видно, что графики в пластинах с ЛТВ имеют характерный перелом при внешней нагрузке около 120 кН, в то время, как для пластины в состоянии поставки этого перелома нет. Такое изменение угла наклона линий может быть вызвано следующими факторами: несовершенством геометрической формы предварительно напряженных пластин; компенсацией ОРН вследствие приложения обратной по знаку нагрузки; преобразованием структурных превращений материала в зоне ЛТВ с принудительным остыванием (упрочнение стали). Как видно из рис. 4 – 6, характер изменения главных напряжений при нагрузках 80 кН, 120 кН и 160 кН приблизительно одинаков, напряжения увеличиваются почти пропорционально с ростом нагрузки. Характер кривизны поверхности пластин с ЛТВ различен. Для сравнения зависимостей «нагрузка–прогиб» испытывались пластины с температурой нагрева в центре 800 °С, 900 °С, 1000 °С с естественным остыванием [11], графики зависимости «нагрузка–прогиб» не имеют характерных переломов. Таким образом, изменению угла наклона в графиках для пластин с принудительным остыванием наиболее вероятно способствовали структурные преобразования стали вследствие ее упрочнения в зоне ЛТВ.

Выводы

1. Подтверждены теоретические предположения о возможности регулирования ОНС путем предварительного напряжения ЛТВ для повышения устойчивости прямоугольных пластин, сжатых по двум противоположным кромкам. Предварительное напряжение ЛТВ возможно путем разогрева точечным источником тепла большой мощности в той зоне конструкции, которая при эксплуатационной нагрузке будет сжата.
2. После предварительного напряжения ЛТВ отмечено повышение величин критических сил (несущей способности) сжатых по двум кромкам пластин. Повышение критических сил можно объяснить наличием ОНС, при котором в центре была сформирована зона ОРН. Так величины критических сил в преднапряженных пластинах по отношению к критической силе в пластине в состоянии поставки больше: на 3,7 % для температуры нагрева 800 °С; на 7,4 % для температуры нагрева 900 °С; на 18,5 % для температуры нагрева 1000 °С.
3. Прогибы пластин с ЛТВ в пределах упругих деформаций меньше, чем прогибы пластины в состоянии поставки. На графиках зависимости «нагрузка – прогиб» наблюдается характерный перелом в преднапряженных пластинах с принудительным остыванием за счет упрочнения стали в зоне ЛТВ.
4. Для получения более спокойного характера изменения напряженного состояния рекомендуется ЛТВ с температурой нагрева в пределах 1000 °С.

Литература

- [1] Окерблом Н.О. Влияние остаточных напряжений, создаваемых сваркой, на местную и общую устойчивость элементов сварных конструкций // XIII Конгресс Междунар. ин-та сварки (13 – 19 июня 1960 года в г. Льеже). - М.: Гос. изд-во машиностр. лит., 1962. – С. 233 – 239.
- [2] Кихара Х., Фуджита Ю. Влияние остаточных напряжений на проблемы неустойчивости // XIII Конгресс Междунар. ин-та сварки (13-19 июня 1960 года в г. Льеже). - М.: Гос. изд-во машиностр. лит, 1962. – С. 240 – 249.
- [3] Игнатьева В.С., Вершинин В.П., Барышев В.М. Влияние остаточных сварочных напряжений на местную устойчивость стенки балки // Метал. конструкции. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 91 – 103.
- [4] Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1982. – С. 223 – 227.
- [5] Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Пластины, диски, балки-стенки. – К.: Госстройиздат УССР, 1959. – С. 799 – 837.
- [6] Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.

- [7] Терещенко В.И. Продольные деформации в двутаврах с предварительным натяжением стенки // Автомат. сварка. – 1963. – № 7. – С. 50 – 59.
- [8] Мазо Б.И. Исследования стальных балок, предварительно напряженных термическим способом, без специальных напрягающих элементов: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук: 05.480 / ЛИСИ. – Ленинград, 1972. – 25 с.
- [9] Чонов А.А. Устойчивость подкрепленных панелей с учетом пластичности при нестационарном нагреве и нагружении // Учен. Зап. ЦАГИ. – 1990. – 21. – №2. – С. 101 – 110, 131.
- [10] Иванов А.П., Антошина Т.В. Изменение магнитных свойств материала при различных температурах локального нагрева /Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж // Матеріали наук.-практ. конф. (м. Донецьк, 9-12 червня 2003 р.) – Донецьк: УАМК, 2003. – С. 153 – 157.
- [11] Иванов А.П., Антошина Т.В. Изучение работы пластин, предварительно напряженных локальным термическим воздействием, на сжатие // Сб. научн. трудов ДонГТУ. Вып.27 – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – С. 361 – 366.
- [12] Тугаев А.С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней [Электронный ресурс].: Дис. ... канд. технические науки: 01.02.03. – М.: РГБ, 2007. – (из фондов Российской государственной библиотеки). – С. 23 – 24.

Надійшла до редколегії 11.06.2009 р.