

УДК 621.791.763.2

С. К. Павлюк, д-р техн. наук, проф., В. В. Десятник, канд. техн. наук, доц.,
В. В. Воробьёв

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕСТНОГО НАГРЕВА ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В данной статье рассмотрены термические способы правки деформаций потери устойчивости листовых конструкций методами местного нагрева. Определены основные характеристики параметров местного нагрева. Показаны способы определения основных параметров при использовании нагрева и условия аппроксимации геометрии отдельных видов деформаций потери устойчивости. Приведены номограммы, необходимые для определения параметров местного нагрева в зависимости от технологических параметров листовой конструкции и параметров выпучины как вида деформации локальной потери устойчивости.

При сварке крупногабаритных листовых конструкций, таких, как днища резервуаров, возникает целый ряд деформационных искажений.

Одним из наиболее распространённых видов деформаций является потеря устойчивости, проявляющаяся чаще всего в виде выпучин круглой формы, которую производственники называют «хлопунами». Появление «хлопунов» связано с наложением сварных швов замкнутой конфигурации. При этом место их возникновения прогнозируется с трудом. Появление данного вида деформаций может при определённых условиях привести к наступлению тех предельных состояний,

которые препятствуют нормальной эксплуатации конструкции.

Одним из методов устранения данного вида деформаций является термическая правка методом местного нагрева.

Механизм возникновения пластических деформаций укорочения (усадки) при тепловых способах правки аналогичен возникновению пластических деформаций при сварке. Количество полос, треугольников, пятен нагрева подбирается таким образом, чтобы остаточные пластические деформации укорочения от нагрева уменьшали существующие деформации до допустимых величин.

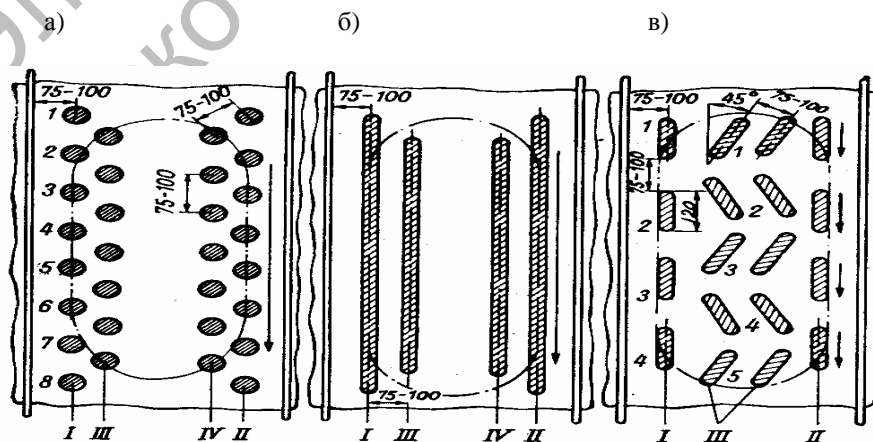


Рис. 1. Виды местного нагрева: а – правка пятнами; б – правка полосами; в – правка штрихами; I, II, III, IV – очередность нагрева

Суммарная величина остаточных пластических деформаций при тепловой правке зависит от температуры концентрированного нагрева и мощности источника, расположения, размеров, формы и количества нагреваемых участков, распределения внутренних напряжений и податливости нагреваемых участков конструкции, а также жёсткости внешнего закрепления. От учёта вышеперечисленных параметров зависит эффективность термической правки.

В любом случае необходимо учитывать следующие обстоятельства:

– вид деформационного повреждения, т. е. изгиб, деформацию, потерю устойчивости и т. д.;

– способ заземления листов в конструкции.

От данных обстоятельств зависит принятие технологического решения, а именно, если листовая конструкция не

защемлена по краям, её необходимо нагревать от краёв к центру до требуемой температуры, предусмотренной технологическим процессом правки. Температуру следует назначать с учётом требуемой термической усадки, которая впоследствии приведёт к устранению деформаций потери устойчивости. Если же листовая конструкция заземлена по кромкам (краям), то необходимо применять нагрев по схеме «от центральной части к краям» в обратноступенчатой последовательности. При этом на каждом этапе нагрева необходимо принимать во внимание, что усадочная сила от нагрева должна соответствовать усилию, приведшему к потере устойчивости листа.

Круглая выпучина листов в большинстве случаев рассматривается как изогнутая пластина с жёстко закреплённым контуром (рис. 2).

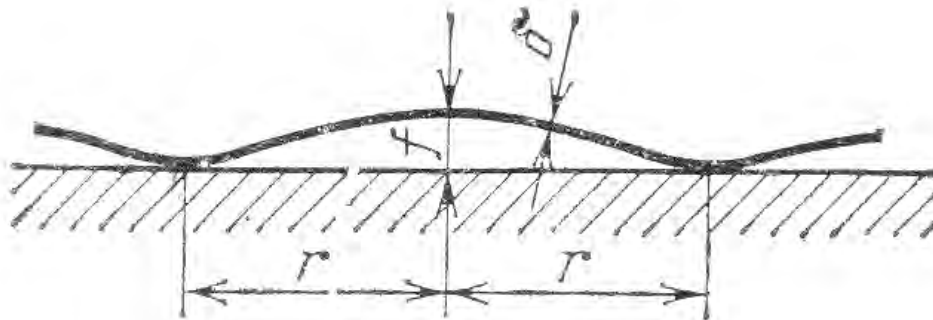


Рис. 2. Схематизация выпучины

При таком допущении изгиба пластины под действием равномерно распределённой нагрузки q величина прогиба f в центре будет определяться по формуле

$$f = \frac{qr^4}{64C}, \quad (1)$$

где C – жёсткость пластины:

$$C = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)};$$

E – модуль упругости 1-го рода (модуль Юнга); μ – коэффициент Пуассона (для стали $\mu = 0,3$); P – искомое давление на пластину; $q = \frac{P}{\pi r^2}$.

Подставляя в (1) и произведя требуемые математические преобразования, получаем

$$f = \frac{qr^4}{64C} = \frac{P \cdot r^4 \cdot 12(1-\mu^2)}{64 \cdot E \cdot \delta^3 \cdot \pi r^2} = \frac{3 \cdot P \cdot r^2(1-\mu^2)}{16 \cdot E \cdot \delta^3}. \quad (2)$$

Поскольку реальные геометрические размеры выпучины в большинстве случаев значительно отличаются от полученных согласно (1), то она может быть использована в ограниченном числе случаев.

При нагреве необходимо создать усадку, равную разности между дугой окружности длиной L и хордой длиной $2r$.

Аппроксимируя профиль выпучины дугой окружности радиуса R (рис. 3), получаем следующие зависимости:

$$\sin(\alpha) = \frac{r}{R}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R^2 &= (R-f)^2 + r^2 \rightarrow \\ \rightarrow R^2 &= R^2 - 2fR + f^2 + r^2 \rightarrow \\ \rightarrow 2fR &= (f^2 + r^2) \rightarrow R = \frac{f^2 + r^2}{2f}; \end{aligned}$$

$$L = 2\alpha \cdot R \rightarrow L = \left(\frac{f^2 + r^2}{2f} \right) \cdot \arcsin \left(\frac{2fr}{f^2 + r^2} \right). \quad (4)$$

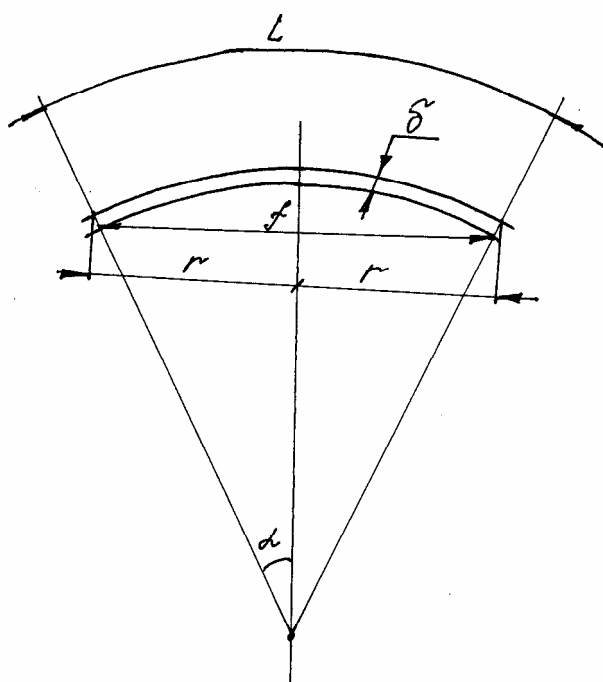


Рис. 3. Схема аппроксимации выпучины

Требуемая величина усадки:

$$\Delta = L - 2r = \left(\frac{f^2 + r^2}{2f} \right) \cdot \arcsin \left(\frac{2fr}{f^2 + r^2} \right) - 2r. \quad (5)$$

Расчёт усадки производится по формуле [1]

$$\frac{q}{V_{св}} = \frac{\Delta \cdot c\gamma \cdot \delta}{\alpha}, \quad (6)$$

где Δ – величина усадки, мм; $c\gamma$ – удельная теплоёмкость, Дж/(м³·К); α – коэффициент температурного расширения, К⁻¹.

С другой стороны [1],

$$\frac{q}{V_{св}} = Q_V \cdot F_{нагр}, \quad (7)$$

где Q_V – эффективная тепловая мощность источника тепла (для пламени газовой горелки $Q_V = 7,1 \cdot 10^4$ Дж/см³ = $7,1 \cdot 10^{10}$ Дж/м³); $F_{нагр}$ – нагреваемая до температуры свыше 600 °С площадь металла.

Приравнявая, получаем

$$F_{нагр} = \Delta \cdot \frac{c\gamma \cdot \delta}{\alpha \cdot Q_V}. \quad (8)$$

Подставляя значения, получаем в развернутом виде

$$F_{нагр} = \frac{c\gamma \cdot \delta}{\alpha \cdot Q_V} \left(\left(\frac{f^2 + r^2}{2f} \right) \cdot \arcsin \left(\frac{2fr}{f^2 + r^2} \right) - 2r \right). \quad (9)$$

Как видно из формулы, основными факторами, влияющими на площадь нагрева, являются размеры выпучины (диаметр $2r$ и прогиб f), свойства материала (теплоёмкость $c\gamma$ и коэффициент термиче-

ского расширения α), толщина материала δ , тепловая мощность пламени горелки Q_V . Поскольку для материала в пределах выпучины постоянными являются величины теплоёмкости, коэффициента термического расширения, а также толщины, то определяющими параметрами будут являться размеры выпучины. Следовательно, площадь нагрева будет изменяться только в зависимости от величины выпучины. Зависимость площади нагрева от соотношения размеров выпучины приведена на рис. 4.

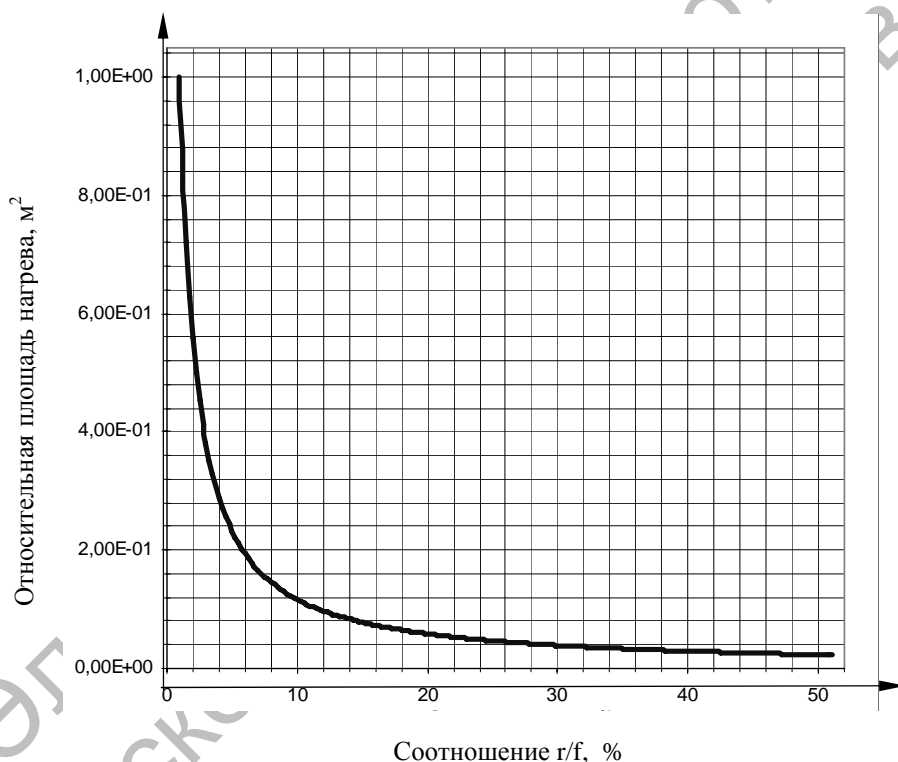


Рис. 4. График зависимости удельной площади нагрева от соотношения стрелы прогиба выпучины к её радиусу

На практике применяются два вида термической правки: правка пятнами и правка полосами. В случае выпучин, полосы должны быть расположены крестообразно на поверхности выпучины. Основными параметрами при правке полосами являются длина полос и ширина полос. Поскольку полосы греют по всей по-

верхности выпучины, то длина каждой из полос принимается равной диаметру выпучины. Таким образом, определяемым параметром в случае термической правки пятнами является диаметр пятна нагрева, а в случае правки полосами – ширина полос нагрева.

В случае применения термической

правки пятнами, площадь нагрева может быть приравнена к площади окружности:

$$F_{нагр} = 2 \cdot 2r \cdot b_{нагр} \quad (12)$$

$$F_{нагр} = \pi \cdot R_{нагр}^2 \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) и преобразуя, получим

$$R_{нагр} = \sqrt{\frac{c\gamma \cdot \delta}{\pi\alpha \cdot Q_v} \left(\left(\frac{f^2+r^2}{2f} \right) \cdot \arcsin\left(\frac{2fr}{f^2+r^2} \right) - 2r \right)} \quad (11)$$

В случае нагрева полосами, расположенными крестообразно, длина нагрева полос принимается равной диаметру выпучины. В этом случае для площади нагрева справедливо выражение

Ширина полос нагрева может быть определена при подстановке (12) в (9):

$$b_{нагр} = \frac{1}{4r} \cdot \frac{c\gamma \cdot \delta}{\alpha \cdot Q_v} \left(\left(\frac{f^2+r^2}{2f} \right) \cdot \arcsin\left(\frac{2fr}{f^2+r^2} \right) - 2r \right) \quad (13)$$

Таким образом, определены параметры нагрева для устранения деформаций потери устойчивости при правке местным нагревом.

Номограммы для определения площади нагрева в соответствии с размерами выпучины и толщиной металла приведены на рис. 5 и 6.

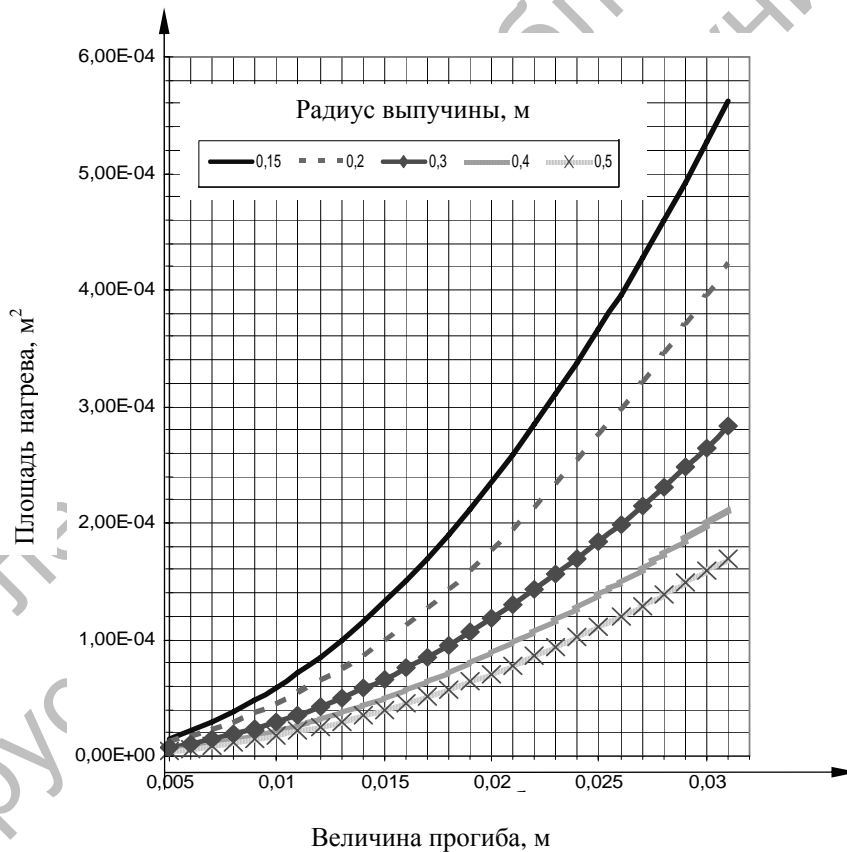


Рис. 5. Номограмма определения площади нагрева в зависимости от размеров выпучины

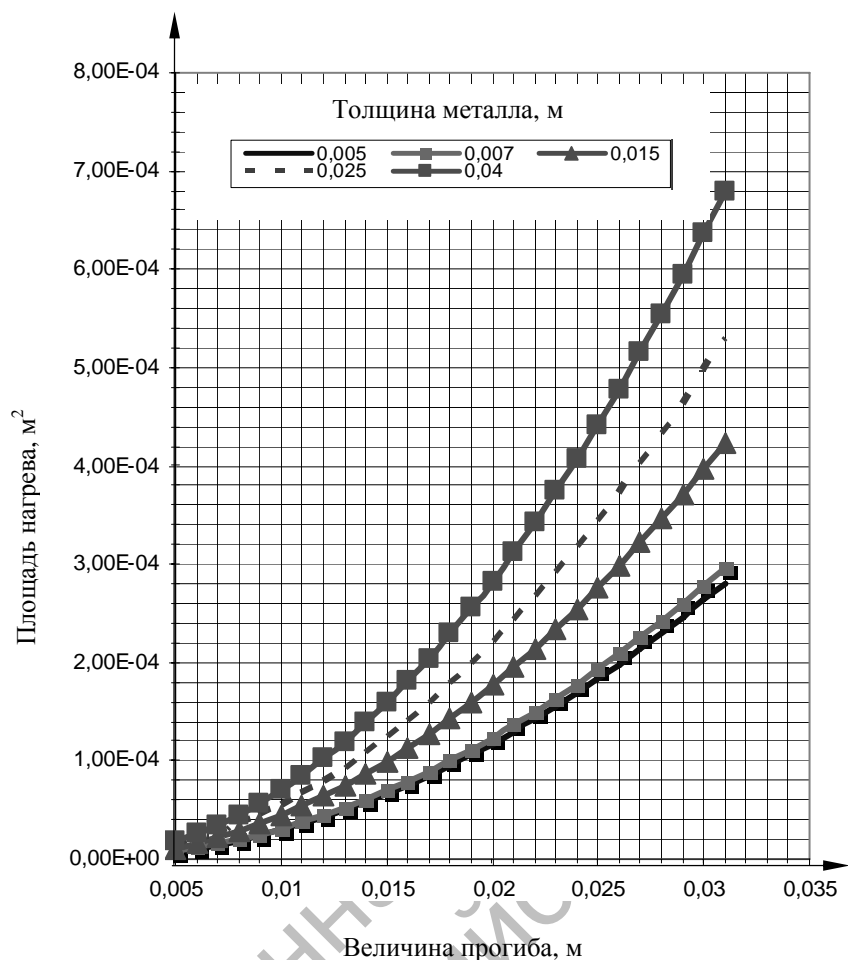


Рис. 6. Номограмма определения площади нагрева в зависимости от толщины листа

Существенное влияние на площадь нагрева оказывает эффективная тепловая мощность пламени горелки. Приведенное в статье значение ($7,1 \cdot 10^{10}$ Дж/м³) взято из [2]. Реальные значения тепловой мощности пламени находятся в пределах от 39 до 87 кДж/см³ и зависят от удельного расхода газовой смеси и мощности горелки. Зависимость площади нагрева от мощности теплового источника приведена на рис. 7. При построении номограммы на рис. 7 радиус выпучины принимался равным 0,25 м.

Используя номограммы, приведенные на рис. 5...7, и аналитические зависимости (11)...(13), становится возмож-

ным определение параметров при термической правке локальных деформаций потери устойчивости местным нагревом.

Номограммы (см. рис. 5...7) для определения площади нагрева следует использовать следующим образом.

На номограмме (см. рис. 5) откладывается величина прогиба по оси абсцисс и выбирается по радиусу выпучины ближайшая кривая. Точка пересечения проецируется на ось ординат, по которой определяется требуемая площадь нагрева.

Аналогичным образом следует использовать номограммы на рис. 6 и 7.

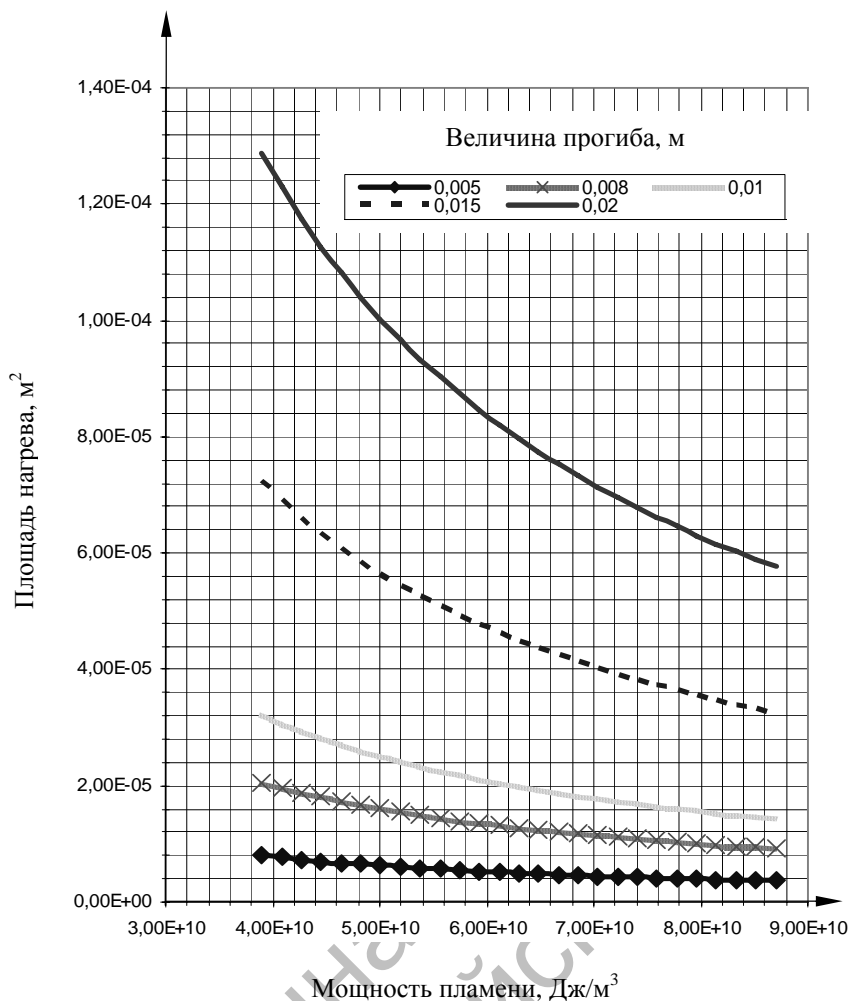


Рис. 7. Зависимость площади нагрева от мощности теплового источника

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Винокуров, В. А.** Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / В. А. Винокуров, А. Д. Гитлевич, К. А. Грачева ; под ред. В. А. Винокурова. – М. : Машиностроение, 1979. – Т. 3. –

567 с. : ил.

2. **Кузьминов, С. А.** Сварочные деформации судовых корпусных конструкций / С. А. Кузьминов. – Л. : Судостроение, 1975 – 285 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
 Материал поступил 10.12.2007

S. K. Pavlyuk, V. V. Desyatnik, V. V. Vorobiov
Engineering method of local heat treatment
parameters determination for elimination stability
loss strains of sheet constructions

In this article the thermal methods of eliminating stability loss strains for sheet constructions by methods of local heat treatment are considered. The main parameters of local heat are determined. The methods of determination of main parameters for use of heat treatment and condition of approximation of geometry of separate kinds of strains of stability loss are shown. The nomograms necessary for definition of parameters of local heat treatment depending on technological parameters leaf for a construction and parameters hump as of a kind of a local loss stability strain are indicated.