

*Антошина Т.В.,
к.т.н. Иванов А.П.
(ДонГТУ, г.Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ОТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА

Отриман кореляційний зв'язок між напруженним станом і магнітною характеристикою в пластинах, заздалегідь розігрітих до різних температур в центрі.

Ключові слова: пластина, стійкість, локальні температурні впливи.

Получена корреляционная связь между напряженным состоянием и магнитной характеристикой в пластинах, предварительно разогретых до разных температур в центре.

Ключевые слова: пластина, устойчивость, локальные температурные воздействия.

Одним из факторов, существенно влияющих на поведение стальных конструкций под нагрузкой, является наличие остаточного напряженного состояния (ОНС), появление которого вызвано высокотемпературными воздействиями при изготовлении.

Учитывая влияние остаточных напряжений (ОН) на работу стальных конструкций, возникает вопрос о контроле (измерении) таких напряжений. Для стальных конструкций наиболее приемлемыми были и остаются неразрушающие методы, в частности, электромагнитный [1, 2 и др.]. Физические основы данного метода заключаются в использовании магнитных свойств материалов (размагничивающего фактора), изменяющихся при различных видах напряженно-деформированного состояния (НДС). Информативным параметром в данном случае является коэрцитивная сила (H_c), которая характеризуется напряженностью магнитного поля на предельной петле гистерезиса, при которой намагниченность равна нулю [3, 4]. Применение данного метода связано с некоторыми трудностями в использовании измерительных приборов, так как магнитные свойства материала зависят от многих факторов (толщины, структуры, неоднородности и др.).

Проведение исследований по распределению и величине коэрцитивной силы (H_c) по контурам пластины (расположение контуров показано на рисунке 1) в зоне воздействия точечного температурного нагрева показало, что от величины температурного воздействия изменяется и величина коэрцитивной силы [5]. Были проведены исследования пластин толщиной 5 мм размерами 500x500мм из углеродистой стали марки ВстЗГсп по ГОСТ 380-94, с температурой нагрева в центре 800, 900, 1000 °С. Пластины в центре разогревались с помощью высокотемпературного нагревателя большой мощности (газового резака) с одной стороны. Диаметр пятна при разогреве пластины составлял 25–30 мм. При измерениях коэрцитивной силы датчик устанавливался по четырем направлениям относительно осей симметрии пластины. По полученным результатам строились изолинии изменения коэрцитивной силы в пластинах, характер распределения которых имел форму «восьмерки». Для выявления истинного характера расположения изолиний H_c по пластине результаты измерений коэрцитивных сил в точке по четырем направлениям усреднялись [8]. Расположение изолиний H_c по пластинам в состоянии поставки и предварительно напряженных локальными термическими воздействиями (ЛТВ) с температурой разогрева в центре пятна 800, 900, 1000 °С показано на рисунке 2.

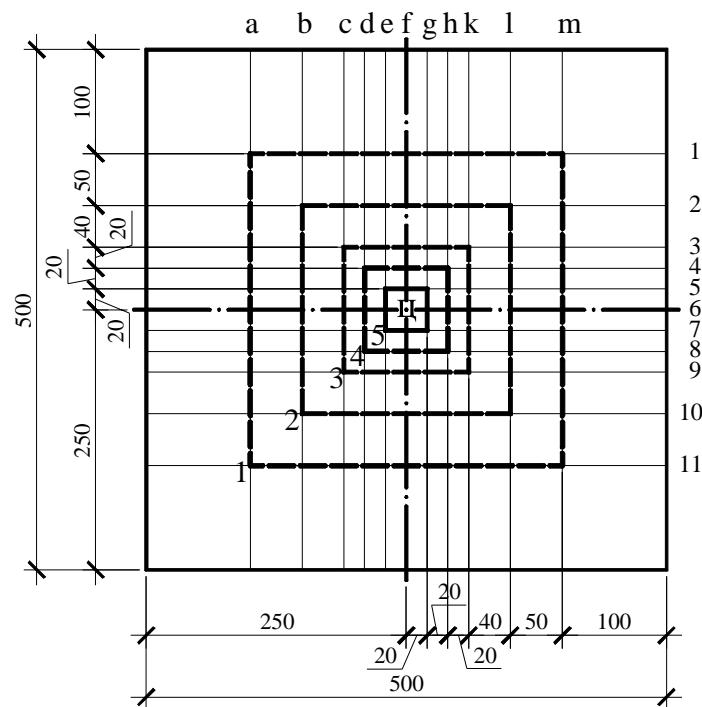
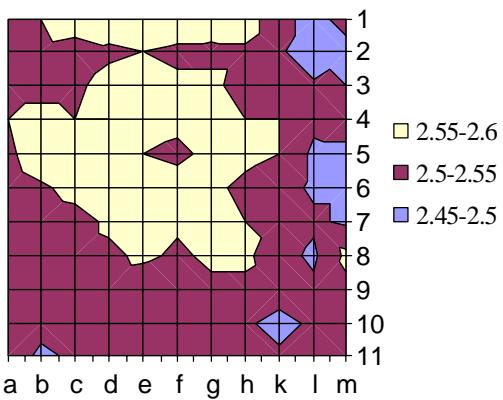


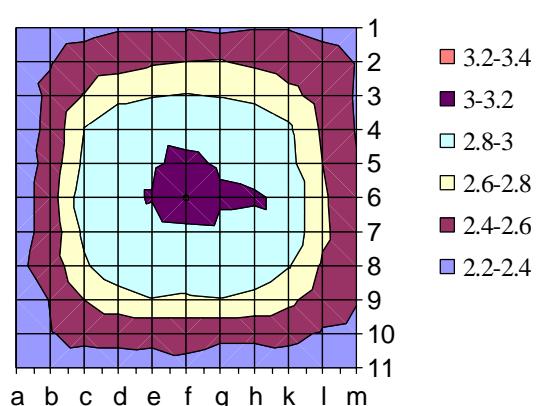
Рисунок 1 - Расположение контуров на пластине

Распределение Нс по
пластины П20, 1000*А/см



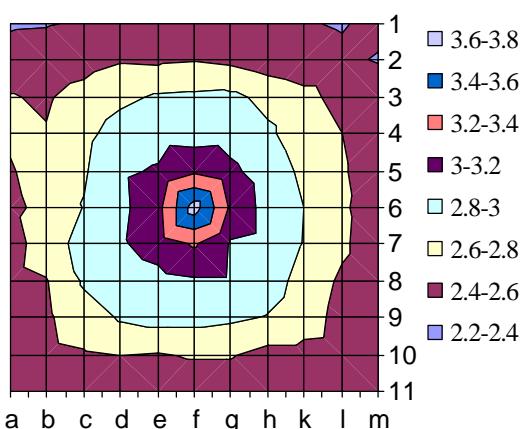
а)

Распределение Нс по пластине
П800И2, 1000*А/см



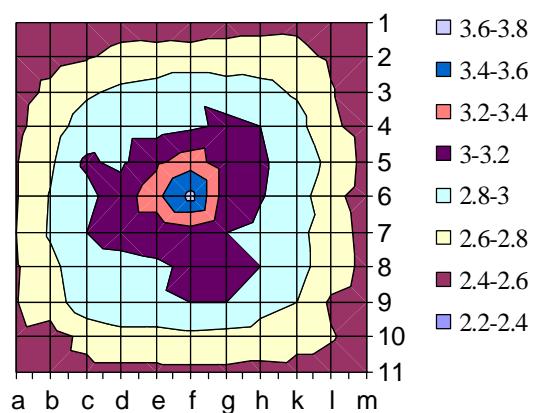
б)

Распределение Нс по
пластине П900И2, 1000*А/см



в)

Распределение Нс по пластине
П1000И2, 1000*А/см



г)

- а) пластина в состоянии поставки;
- б) пластина с температурой нагрева до 800 $^{\circ}\text{C}$;
- в) пластина с температурой нагрева до 900 $^{\circ}\text{C}$;
- г) пластина с температурой нагрева до 1000 $^{\circ}\text{C}$.

Рисунок 2 - Расположение изолиний усредненных Нс по пластинам

Параллельно проводились исследования напряженного состояния пластин разрушающим методом [6]: пластины разрезались и с помощью тензорезисторов фиксировалось деформированное состояние, характер изменения и качественная оценка главных напряжений $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$). Де-

формации определялись с помощью измерительной тензометрической системы СИИТ-3. Для определения главных напряжений использовались прямоугольные трехэлементные «розетки» тензорезисторов сопротивления КФ 5П1-5-200-Б12. Расположение тензорезисторов в «розетке» и схема расположения «розеток» в пластине приведены на рисунке 3.

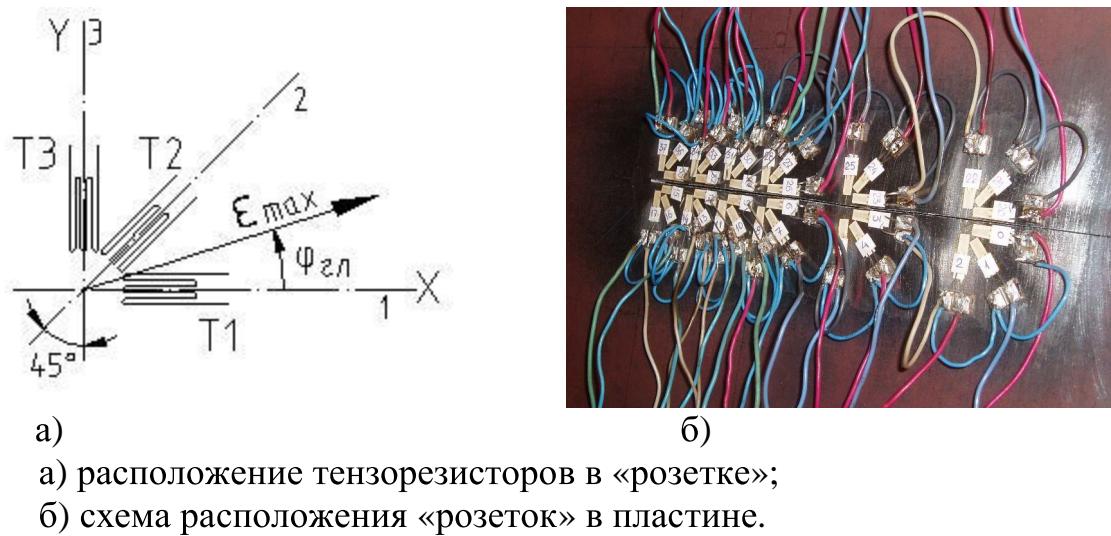


Рисунок 3 - К определению главных напряжений по контурам пластины

Целью данной работы являлось проведение корреляционного анализа и получение уравнений регрессии зависимости $\sigma_{1,2}$ от Нс для последующего контроля НДС, возникающего в результате высокотемпературных воздействий.

Для определения зависимости $\sigma_{1,2}$ от Hc задавались различные уравнения приближенной регрессии: линейная, гиперболическая, параболическая, логарифмическая, экспоненциальная, степенная, полиномы 3, 4, 5 степеней. В качестве метода оценки тесноты корреляционной связи использовался коэффициент корреляции (для линейной регрессии) и коэффициент корреляционного отношения (для нелинейной регрессии), проверялась его надежность, а в качестве способа установления формы связи – метод наименьших квадратов [7]. Исходные данные для пластин сведены в таблицу 1. Анализ перечисленных выше зависимостей показал, что наилучшим уравнением регрессии является зависимость, описанная полиномом 4 степени:

$$\sigma(Hc) = a + b \cdot Hc + c \cdot Hc^2 + d \cdot Hc^3 + e \cdot Hc^4,$$

где a, b, c, d, e – параметры регрессии, определяемые из решения системы:

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i + c \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^3 + e \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^4 = \sum_{i=1}^n \sigma_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i + b \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^4 + e \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^5 = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot Hc_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^5 + e \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^6 = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot Hc_i^2, \\ a \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^4 + c \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^5 + d \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^6 + e \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^7 = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot Hc_i^3 \\ a \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^5 + c \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^6 + d \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^7 + e \cdot \sum_{i=1}^n Hc_i^8 = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot Hc_i^4 \end{cases}$$

где n – число пар исследуемых величин $\sigma_{1,2}$ -Нс.

Коэффициент корреляционного отношения:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma(Hc)_i - \bar{\sigma})^2}{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}},$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее значение признака σ .

Таким образом, уравнения зависимости $\sigma_{1,2}$ от Нс для разных температур нагрева имеют следующий вид:

– для температуры нагрева 800°C

$$\sigma_1^{800} = 10^3 \cdot \left(-4321,4 + 6081,164 \cdot Hc - 3198,256 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 744,95 \cdot Hc^3 - 64,83 \cdot Hc^4 \right),$$

$$\sigma_2^{800} = 10^3 \cdot \left(-2990,699 + 4192,814 \cdot Hc - 2196,587 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 509,606 \cdot Hc^3 - 44,171 \cdot Hc^4 \right),$$

$$Hc \in \{2,56 \div 3,3\} \cdot 10^3 \text{ A/cm};$$

Таблица 1 – Исходные данные пластин с различной температурой нагрева

Контур	П800И1			П900И2			П1000И3		
	Hс, A/см	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	Hс, A/см	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	Hс, A/см	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
1	$2,56 \times 10^3$	26.4	-1.3	$2,53 \times 10^3$	-2.84	-51.2	$2,46 \times 10^3$	44.9	-24.3
2	$2,66 \times 10^3$	8.8	-19.1	$2,71 \times 10^3$	0.18	-71.2	$2,59 \times 10^3$	41.5	-35.4
3	$2,96 \times 10^3$	32.7	-84.0	$2,97 \times 10^3$	105.4	-17.6	$2,94 \times 10^3$	91.2	20.3
4	$3,04 \times 10^3$	318	32.5	$3,02 \times 10^3$	333.5	94.2	$3,13 \times 10^3$	216	106
5	$3,08 \times 10^3$	467	199	$3,15 \times 10^3$	374.7	172	$3,27 \times 10^3$	275	198
центр	$3,3 \times 10^3$	315	144	$3,49 \times 10^3$	293.0	147	$3,67 \times 10^3$	303	291
R		0,999	0,98		0,95	0,98		0,99	0,99
Надежность R		+	-		+	+		+	+

– для температуры нагрева 900°C

$$\sigma_1^{900} = 10^3 \cdot \left(-198,954 + 298,665 \cdot Hc - 166,46 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 40,795 \cdot Hc^3 - 3,706 \cdot Hc^4 \right),$$

$$\sigma_2^{900} = 10^3 \cdot \left(-300,011 + 428,548 \cdot Hc - 228,189 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 53,635 \cdot Hc^3 - 4,692 \cdot Hc^4 \right),$$

$$Hc \in \{2,53 \div 3,49\} \cdot 10^3 \text{ A/см};$$

– для температуры нагрева 1000°C

$$\sigma_1^{1000} = 10^3 \cdot \left(-53,003 + 78,763 \cdot Hc - 43,307 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 10,433 \cdot Hc^3 - 0,927 \cdot Hc^4 \right),$$

$$\sigma_2^{1000} = 10^3 \cdot \left(-54,249 + 79,151 \cdot Hc - 42,809 \cdot Hc^2 + \right. \\ \left. + 10,148 \cdot Hc^3 - 0,887 \cdot Hc^4 \right),$$

$$Hc \in \{2,46 \div 3,67\} \cdot 10^3 \text{ A/см},$$

где 10^3 – степенной показатель значений коэрцитивной силы.

Линии регрессии для разных температур нагрева показаны на рисунке 4. Как видно из рисунка 4 с увеличением температуры нагрева линии регрессии приобретают более спокойный характер, точки экстремумов для линии 1000 $^{\circ}\text{C}$ как бы сглаживаются, что подтверждает выводы [6].

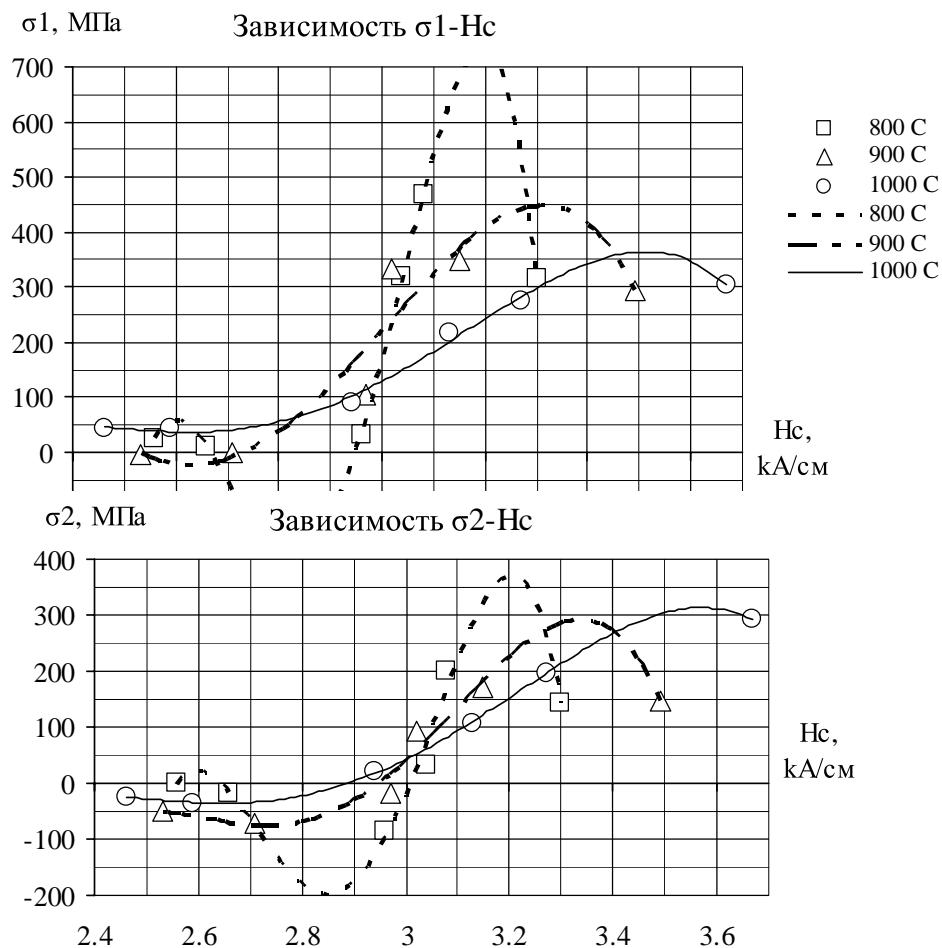
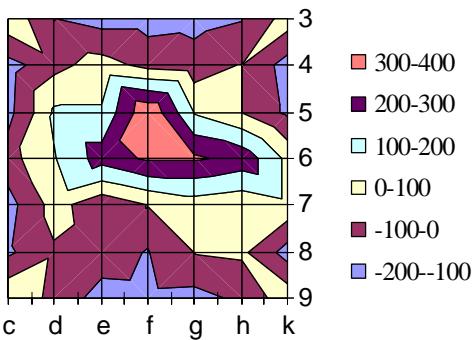


Рисунок 4 - Регрессионная зависимость главных напряжений ($\sigma_1 > \sigma_2$) от коэрцитивных сил (Hс)

По приведенным выше уравнениям зависимости $\sigma_{1,2}$ ($\sigma_1 > \sigma_2$) от Hс были определены главные напряжения по контурам «3-5, ц» в пластинах с температурой нагрева в центре 800, 900, 1000 $^{\circ}\text{C}$. Расположение изолиний σ_1 и σ_2 по пластинам, предварительно напряженным локальными термическими воздействиями, приведены на рисунках 5-7.

Распределение σ_1 по пластине П800И2, МПа



Распределение σ_2 по пластине П800И2, МПа

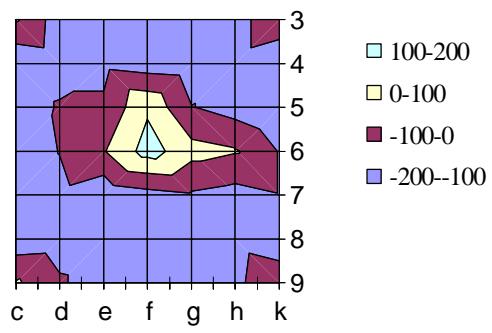
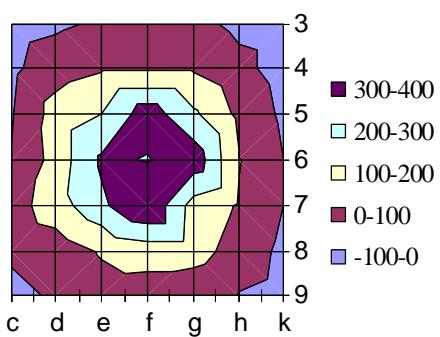


Рисунок 5 – Расположение изолиний σ_1 и σ_2 по пластине с температурой нагрева в центре 800°C

Распределение σ_1 по пластине П900И2, МПа



Распределение σ_2 по пластине П900И2, МПа

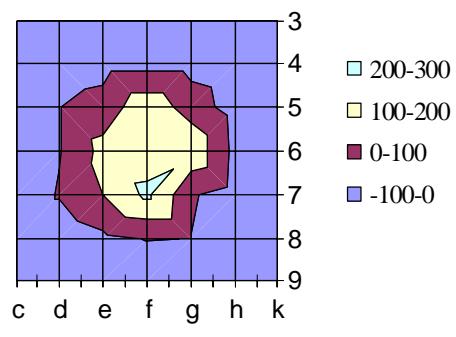
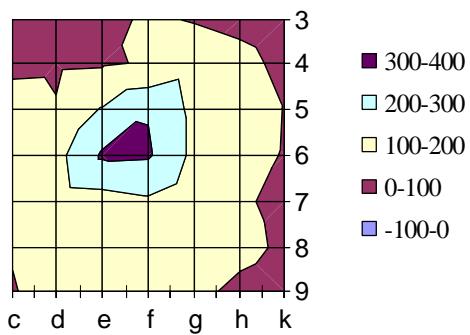


Рисунок 6 – Расположение изолиний σ_1 и σ_2 по пластине с температурой нагрева в центре 900°C

Распределение σ_1 по пластине П1000И2, МПа



Распределение σ_2 по пластине П1000И2, МПа

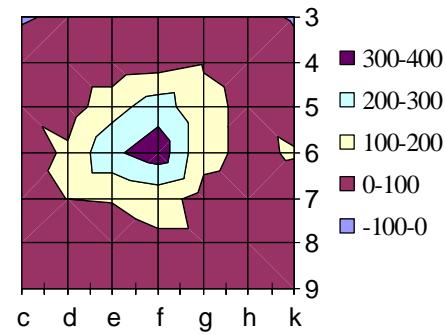


Рисунок 7 – Расположение изолиний σ_1 и σ_2 по пластине с температурой нагрева в центре 1000°C

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

- 1) Между напряженным состоянием в пластине и магнитной характеристикой (коэрцитивной силой) существует корреляционная связь достаточно надежная. Так для пластин с температурой нагрева 800°C наблюдаемое значение критерия надежности 3.11 и 1.92, для 900°C – 3.53 и 4.4, для 1000°C – 8.35 и 10.33, при обеспечении необходимой надежности 2,78;
- 2) Качественный контроль напряженного состояния пластин после локального термического воздействия вполне приемлем через магнитные характеристики материала.

Библиографический список

1. Недосека А.Я. *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. – К.: Издательство «ИНДПРОМ», 2001. – 815с.
2. Голоднов А.И. *Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / Монографія*. – К.: вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.
3. Белокур И.П., Коваленко В.А. *Дефектоскопия материалов и изделий*. – К.: Техника, 1989. - 192с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2 – х книгах Кн. 2/ Под ред. В.В. Клюева – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 352с.
5. 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 2003р.) – Донецьк: УАМК, 2003. – С153-157.*
6. Иванов А.П., Антошина Т.В. *Влияние локальных температурных воздействий на распределение напряжений в стальных пластинах/ Сб. научн. тр. «Современные строительные конструкции из металла и древесины» ОГАСА, - Одесса: ООО «Внешрекламсервис», 2008. – С.122-126.*
7. Пустыльник Е.И. *Статистические методы анализа и обработка наблюдений / Москва: Изд. «Наука», 1968. – 288с.*
8. Голоднов А.И., Иванов А.П., Антошина Т.В. *Разработка методики исследования напряженного состояния в элементах конструкций магнитным методом / Строительство. Материаловедение. Машиностроение // Сб. научн. тр. №18, – Дн-ск: ПГАСиА, 2002. – С37-43.*

Рекомендовано к печати д.т.н., с.н.с. Голодновым А.И.