

**Б. Ш. Мамедов** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 4 (978). – С. 3-15. – Бібліогр.: 5 назв.

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітря-реактивних двигунів, пов'язані з помилковими фундаментальними формулами тяги, польотного (тягового) ККД, розрахованими академіком Б.С.Стечкиним у 1929 році.

**Ключові слова:** тяга повітря-реактивних двигунів, польотний (тяговий) ККД, реакція.

Are considered the drawbacks of modern theory of air-jet engines, which are connected with a mistaken fundamental formulas of thrust and flying (thrust) efficiency, calculated by Academician B.S.Stechkin in 1929 year/

**Keywords:** the thrust of air-jet engines, flying (thrust) efficiency, reaction

**УДК 669.14.018.44**

**С. Н. ПОПОВ**, д-р фил. наук, проф., ЗНТУ, Запорозьє

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

В работе приведен графоаналитический анализ математических моделей совместного влияния легирующих элементов углерода, хрома, никеля и температуры для прогнозирования прочности сварных соединений жаропрочных сталей системы Fe-Cr-Ni-Si.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, сварочный узел, оптимизация, деформация, тугоплавкие элементы, поверхность отклика.

#### **Введение**

Жаропрочные сплавы, главным образом, это материалы, имеющие высокое сопротивление ползучести и разрушению при высоких температурах. Жаропрочные стали применяются как конструкционный материал для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, атомно-энергетических установок, конструкций камер сгорания, элементов арматуры термических печей и др. В частности, широкое применение на Запорожском ОАО «Мотор Сич» нашли применение детали печной арматуры (поддоны, катки, рельсы, направляющие), надежность и долговечность работы, которой существенно влияет на стоимость эксплуатации термических печей. Вследствие воздействия высоких температур и большой нагрузки это оборудование имеет малый срок службы из-за появления дефектов, связанных с растрескиванием и отслоением на рабочей поверхности деталей катков термических печей (рис. 1). Рациональным в данном случае является проведение ремонтных работ методами сварки и наплавки.

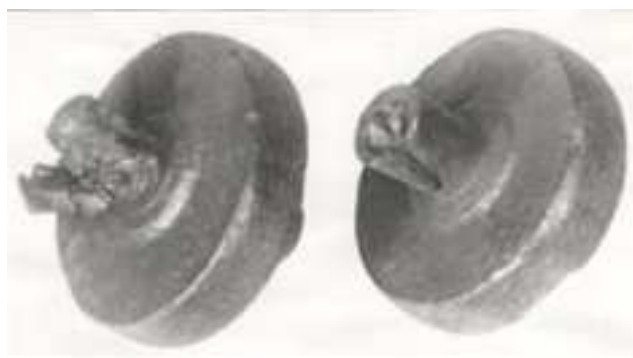


Рис. 1 - Дефекты, выводящие из строя катки термических печей

#### **Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Жаропрочные стали и сплавы, применяемые для изготовления деталей катков термических печей, работающих при высоких температурах в условиях сложнапряженного состояния в течение длительного времени, должны выдерживать напряжение, вызывающее заданную деформацию, не приводящую к

© С. Н. ПОПОВ, 2013

преждевременному разрушению.

По данным априори [1-3] в зависимости от условий эксплуатации применяют различные жаропрочные материалы. Так до температур 300°C ограничиваются в применении специальных сталей. Наиболее целесообразно в этом случае использовать конструкционные углеродистые стали, после термической обработки с высокой прочностью. Для работы при температурах до 565°C необходимо применять низко- и среднелегированные стали перлитного класса, обычно называемые теплоустойчивыми, а для изделий энергомашиностроения, работающих при температурах 580-610°C – высокохромистые жаропрочные стали, содержащие около 12% хрома. Дальнейшее повышение температуры до 700-750°C вызывает необходимость в использовании сталей аустенитного класса. При более высоких температурах до 1400°C целесообразно применять высоколегированные сплавы (кобальтовые и никелевые), сплавов на основе тугоплавких элементов, а также стали, легированные алюминием (Fe-Cr-Al).

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является анализ совместного влияния химического состава жаропрочных сталей системы легирования *Fe-Cr-Ni-Si* и температуры на прочность металла ( $\sigma_B$ ), применяемого для катков термических печей. Проведение графоаналитического анализа математических моделей и оптимизация материаловедческих параметров для нахождения материала с максимальной прочностью.

### **Методика эксперимента**

Для определения оптимальных значений C, Cr, Ni, обеспечивающих регистрацию максимальных значений физико-механических свойств, были решены системы частных производных от уравнений [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_B}{dC} = 0 \\ \frac{d\sigma_B}{dCr} = 0 \\ \frac{d\sigma_B}{dNi} = 0 \end{array} \right.$$

При этом, для визуализации совместного комплексного влияния исследуемых параметров окончательное решение уравнения [4] вследствие полного набора парных взаимодействий входящих в регрессионные модели полученную зависимость оптимизировали методом пошагового координатного спуска с дифференцированным заданием погрешности вычисления ( $R=0,1$ ) и шага поиска ( $\Delta X=0,01$ ) по каждой переменной при выполнении граничных условий, не позволяющих выйти за пределы реализованного факторного пространства. Исходя из этого, проведено исследование поверхности отклика на основе ее графического отображения в виде пространственных диаграмм и их сечений.

### **Экспериментальные данные и их обработка**

Ранее авторами проведено планирование эксперимента с целью оптимизации химического состава жаропрочного сплава, работающего при высоких температурах. Полученные уравнения регрессии [4], отражающие влияние содержания углерода (C), хрома (Cr) и никеля (Ni), а также температуры (T) на физико-механические свойства позволяют прогнозировать механические свойства сталей системы Fe-Cr-Ni-Si при различных температурных градиентах:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e = & 91,1 + 1749,4 \cdot C + 26 \cdot Cr + 13,1 \cdot Ni - \\ & - 0,34 \cdot T - 1702 \cdot C^2 - 0,48 \cdot Cr^2 - 0,2 \cdot Ni^2 - \\ & - 53,811 \cdot C \cdot Cr - 58,17 \cdot C \cdot Ni - 0,17 \cdot C \cdot T - \\ & - 0,26 \cdot Cr \cdot Ni + 0,01 \cdot Ni \cdot T + 2,67 \cdot C \cdot Cr \cdot Ni + \\ & + 0,02 \cdot C \cdot Cr \cdot T - 0,01 \cdot C \cdot Ni \cdot T, \end{aligned} \right\} (1)$$

Для нахождения материала с оптимальными эксплуатационными характеристиками проведено графо-аналитическое исследование полученных уравнений регрессии. Расчет и построение поверхностей и сечений к ним проводили с помощью разработанной в Microsoft Excel программы.

Анализ полученных регрессий (1) показывает, что углерод (C), хром (Cr) и никель (Ni) входят в уравнение со знаком плюс, повышая физико-механические свойства сплава. Это объясняется тем, что никель расширяет  $\gamma$ -область в системе Fe-Cr, способствуя образованию сталей с аустенитной структурой в широком интервале температур [3]. Вхождение в уравнения регрессии температуры (T) со знаком «-» негативно сказывается на физико-механических свойствах сплавов.

При рассмотрении влияния хрома, то можно отметить, что этот легирующий элемент увеличивает энергию связи атомов кристаллической решетки  $\gamma$ -твердого раствора, несколько повышая жаропрочные характеристики [3]. Однако по парное их влияние (C·Cr, C·Ni, Cr·Ni) негативно сказывается на его эксплуатационных свойствах, что может быть связано с неоднозначным механизмом влияния углерода, хрома и никеля в повышении физико-механических характеристик, поскольку при кристаллизации сварочной ванны происходят различные процессы как карбидообразования, так и образования интерметаллидов, которые перераспределяют количество легирующих элементов, участвующих в образовании того или другого соединения. Совместное же их влияние углерода, хрома и никеля (C·Cr·Ni) в заданных пределах варьирования ведет к повышению как твердости HV и временного сопротивления разрыва  $\sigma_e$  (предела прочности). Однако, это повышение ограничено наличием в уравнении квадратичных членов за ( $C^2$ ,  $Cr^2$ ,  $Ni^2$ ) с отрицательным вкладом, что свидетельствует возможном наличии локальных экстремумов на поверхности отклика. Анализируя парные взаимодействия, можно сделать предположение, что они оказывают двойное влияние на эксплуатационные характеристики металла, поскольку в одном случае присутствуют в регрессионной зависимости со знаком «+», а в другом со знаком «-».

На основе полученных уравнений регрессии были построены пространственные математические модели (рис. 2), характеризующие влияние углерода, хрома и никеля, а также температуры на физико-механические свойства (предел прочности) жаропрочного сплава.

В зависимости от величины температурного градиента структура металла сварного соединения различна [5]. Так в интервале температур между линиями солидуса и ликвидуса в соответствии с диаграммой Fe-C металл находится в твердожидком состоянии, что вызывает перераспределение легирующих элементов между сварочной ванной и основным металлом. Хотя протяженность этого участка небольшая, но характер кристаллизации металла может оказывать влияние на свойства всего сварного соединения. В интервале температур от 1100-1150°C до температур линии солидуса металл полностью переходит в состояние аустенита.

На участке рекристаллизации металл нагревается в интервале температур от 500 до 550°C до температуры точки  $A_1$ , и поэтому по структуре он незначительно

отличается от основного. При значительной выдержке при этих температурах может произойти значительный рост зерен. Механические свойства металла этого участка могут несколько снизиться вследствие разупрочнения из-за снятия наклепа. При нагреве металла в интервале от 100 до 500°C (участок синеломкости) его структура в процессе не претерпевает видимых изменений.

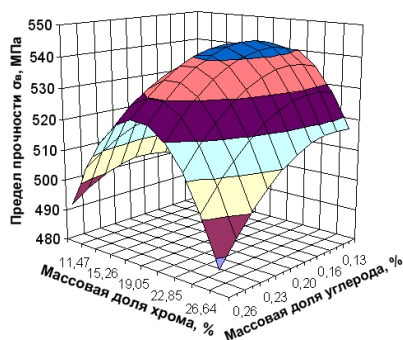


Рис. 2 - Поверхность отклика функции  $\sigma_B$  при Ni = 15,95%; T = 20°C

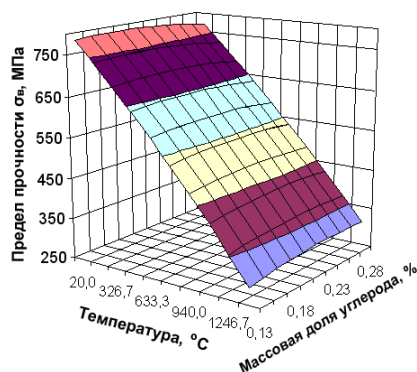


Рис. 3 - Поверхность отклика функции  $\sigma_B$  при Cr = 20,95%; Ni = 15,95%

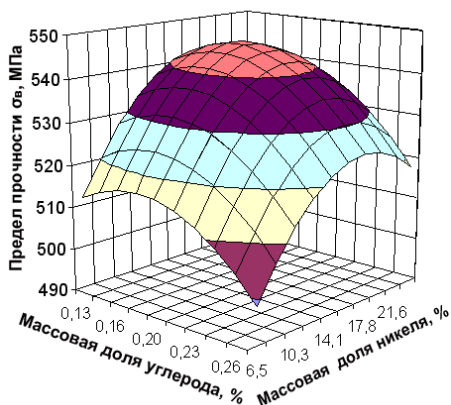


Рис. 4 - Поверхность отклика функции  $\sigma_B$  при Cr = 20,95%; T = 20°C

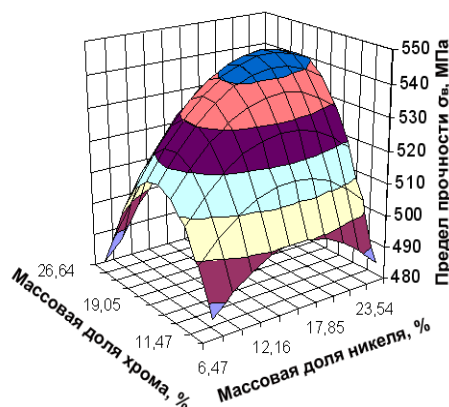


Рис. 5 - Поверхность отклика функции  $\sigma_B$  при C = 0,16%; T = 20°C

Наличие в уравнениях (1) квадратичных членов  $C^2$ ,  $Cr^2$ ,  $Ni^2$  свидетельствует о нелинейном характере зависимости и возможности существования локальных экстремумов.

Обработка результатов исследования целевой функции показала наличие экстремумов в данной области варьирования факторов. Анализ зависимости предела прочности  $\sigma_B$  их в сечениях позволил установить оптимальные значения содержания исследуемых химических элементов, которые находятся в пределах: C = 0,14-0,19%, Cr = 21-23%, Ni = 17-19%.

Достижение максимальной предела прочности при таком химическом составе можно объяснить следующим образом. При массовой доле углерода 0,15-0,18 % в более мягкой металлической матрице выделяется значительно больше дисперсной упрочняющей фазы, что приводит к увеличению одновременно с твердостью и кратковременного предела прочности. Однако при повышении содержания углерода наблюдается выделение частиц карбидов по границам зерен, которые, с одной стороны, служат препятствием для зернограничного скольжения при ползучести а, с другой стороны, инициируют зарождение трещин, особенно в условиях

термоциклирования. Содержание массовой доли хрома в пределах 21-23% объясняется упрочнением матрицы, образованием карбидов (табл. 1) и участием в образовании ряда других упрочняющих фаз. Кроме того, хром является основным элементом, обеспечивающим защиту сталей от окисления. Превышение массовой доли хрома свыше 23% приводит к снижению прочности и нестабильности свойств за счет образования ферритной фазы. Содержание никеля более 15% обеспечивает получение аустенитной структуры в широком диапазоне температур. Это связано с тем, что высокая жаропрочность сплавов определяется двумя основными физическими факторами - прочностью межатомных связей в сплаве и его структурой. Таким образом, подтверждается, что упрочнение обусловлено главным образом появлением в сплавах равномерно, распределённых достаточно мелких частиц химических соединений (карбидов) и микроискажениями кристаллической решётки основы сплава, вызванными наличием этих частиц. Соответствующая структура жаропрочного сплава затрудняет образование и движение дислокаций, а также повышает количество связей между атомами, одновременно участвующими в сопротивлении деформации. С другой стороны, высокое значение величины межатомных связей позволяет сохранить необходимую структуру при высоких температурах длительное время.

### **Выводы**

Таким образом, проведенные исследования показали возможность исправления дефектов арматуры термических печей методами сварки и наплавки. При этом было подтверждено, что рост зерна, размеры которого связаны с наличием температурного градиента тем больше, чем значительнее нагрет металл выше температуры точки  $A_3$ . Кроме того, сложность влияния температурного воздействия связана с тем, что после охлаждения это может привести к образованию неблагоприятной видманштеттовой структуры. На участке нормализации  $750-800^\circ\text{C}$  до температуры  $1100-1150^\circ\text{C}$  металл имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. При этом важно учитывать возможность образования участка с неполной перекристаллизацией, где металл нагревается до температур между точками  $A_1$  и  $A_3$ , который, как подтвердили исследования, характеризуется почти неизменившимися первоначальными ферритными, перлитными и аустенитными зёрнами и более мелкими зёрнами феррита и перлита после перекристаллизации, а также сфероидизацией перлитных участков.

Проведен графоаналитический анализ математических моделей в виде уравнений регрессии, описывающих совместное влияния легирующих элементов (C, Cr, Ni) и температурного градиента (T) на физико-механические свойства (предел прочности  $\sigma_b$ , ) жаропрочных сталей и сплавов. Установлены оптимальные значения содержания легирующих элементов, при которых достигаются оптимальные значения физико-механических свойств наплавленного металла: C = 0,14-0,19%, Cr = 21-23%, Ni = 17-19%.

Таким образом, подтверждается, что упрочнение обусловлено главным образом появлением в сплавах равномерно, распределённых достаточно мелких карбидов, что вызывает появление микроискажений кристаллической решётки основы сплава. Соответствующая структура жаропрочного сплава затрудняет образование и движение дислокаций, а также повышает количество связей между атомами, одновременно участвующими в сопротивлении деформации.

**Список литературы: 1.** Каховский, Н. И. Сварка высоколегированных сталей [Текст] / Н. И. Каховский. – Киев. : «Техніка», 1975. – 376 с. **2.** Масленков, С. Б. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] : справочное издание / С. Б. Масленков. – М. : Металлургия, 1983. – 192 с. **3.** Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] / Ф.Ф. Химушин. – М. : Металлургия, 1969. – 752 с. **4.** Forecasting of mechanical properties of weld connections after the thermodeformation cycle on the basis of the mathematical regression analysis [Text] / S. N. Popov, V. V Naumik., T. V. Popova, D. A. Antonyuk // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – №1. – 2004. – С.150-156. **5.** Теория сварочных процессов [Текст] / Под ред. В. В. Фролова. – М. : «Высшая школа», 1988. – С.490-491. **6.** Лебедев, Б. Д. Розрахунки в теорії зварних процесів [Текст]: навч. посібник / Б. Д. Лебедев. – К. : НМК ВО, 1992. – 320 с.

Надійшла до редколегії 20.01.2013

УДК 669.14.018.44

**Анализ влияния химического состава жаропрочных сталей и температурного градиента на прочность сварных соединений / Попов С. Н.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 4 (978). – С. 15-20. – Бібліогр.: 6 назв.

У роботі наведено графоаналітичний аналіз математичних моделей спільного впливу легуючих елементів вуглецю, хрому, нікелю і температури для прогнозування міцності зварних з'єднань жароміцних сталей системи Fe-Cr-Ni-Si.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, зварювальний вузол, оптимізація, деформація, тупоплавкі елементи, поверхня відгуку.

The paper graphic-analytical analysis of mathematical models of the joint effect of alloying elements carbon, chromium, nickel and temperature to predict the strength of welded joints of heat-resistant steels of Fe-Cr-Ni-Si.

**Keywords:** physical and mechanical properties, welding assembly, optimization, strain, refractory elements, the response surface.

УДК 621.74

**О. С. КОВАЛЬ**, аспирант, НТУ «ХПІ»

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР ЧУГУНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО Si-Ba

В статье приведены результаты исследований микроструктуры чугуна, модифицированного Si-Ba. Описан процесс плавки и результаты химического анализа чугуна, а также процедура обработки данных металлографического анализа по размеру включений графита. Приведенные результаты позволяют сделать ряд важных выводов о видах законов распределения размера графитовых включений в микроструктуре, позволяющих проводить сравнительную оценку эффективности применения разных типов модификаторов для регулирования процессов структурообразования.

**Ключевые слова:** модифицирование, графитизация, микроструктура, чугун

### Введение.

Процесс получения качественного чугуна ставит в качестве первоочередной задачу регулирования процессов графитизации. С этой целью, как известно, применяются модификаторы. Однако, несмотря на огромное количество исследований, проведенных за несколько десятилетий, до сих пор неясен ответ на вопрос, какой из факторов оказывает приоритетное влияние на процесс

© О. С. КОВАЛЬ, 2013