

2. Повышение ресурса технических систем путём использования электрических и магнитных полей : монография [Текст] / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. П. Лысиков, О. В. Соловьев, А. А. Тропина. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2006. – 544 с.
3. Сканави, Г.И. Физика диэлектриков (Область слабых полей) [Текст] / Г.И. Сканави. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 253 с.
4. Трофімов, І. Л. Метод підвищення експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів дією електростатичного поля [Текст] / І. Л. Трофімов // Вісник Національного технічного університету України „КПІ” (Машинобудування), – 2008. – вип. №53/2008, ч.1 – С. 134–144.
5. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М.: Физ. гиз., 1963. – 472 с.
6. Трофімов, І. Л. Підвищення триботехнічних властивостей палив і олив електричним полем [Текст] / І. Л. Трофімов // Вопросы химии и химической технологи. – №3/2010. – С. 132–137.

### Abstract

*The article concerns the application of the electric field to ensure the stabilization of operational properties of the lubricating media and presents the results of our research in this area. The main purpose of this research is the theoretical justification of influence of the electric field on the tribological properties of the lubricating media and formation of the mathematical dependences, which describe the influence. The high specifications for the lubricating media define the need to improve the tribological properties of the existing lubricating media, and to find new methods and technologies for production of the lubricating media for machinery. The article justifies the ideas concerning the mechanism of interaction of molecules of the lubricating media and their parts under the influence of external electric and natural electrostatic fields, on the basis of the analyzed works and results of our research. The presented theoretical justification of the influence of the electric field on the working fluids permitted to obtain the mathematical dependences, to analyze and model the influence of the electric field on the tribological properties of the lubricating media, and to obtain the explanation of the relation between the main physical parameters of tribosystems and the electric field. The results of this work can be used to improve the performance properties of the working fluids, in particular anti-wear properties by means of the electric field. The research results can be applied by tribologists, chimnotologists, as well as by specialists in the sphere of operation of fuel and lubricating systems of ground and aviation equipment*

**Keywords:** *lubricating media, tribological properties, electric field, mathematical dependences*

УДК 621.791.052:669.14

# ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni-Si

**С. Н. Попов**

Доктор философских наук, профессор  
Кафедра "Оборудование и  
технология сварочного производства"

Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

Контактный тел.: 050-341-72-17

E-mail: spopov@zntu.edu.ua

*В роботі розглянуті можливості застосування графоаналітичного методу досліджень для аналізу прогнозування механічних властивостей зварних з'єднань жароміцних сталей системи Fe-Cr-Ni-Si, що був проведений на базі активного експерименту*

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

*В работе рассмотрены возможности применения графоаналитического метода исследований для анализа прогнозирования механических свойств сварных соединений жаропрочных сталей системы Fe-Cr-Ni-Si проведенного на базе активного эксперимента*

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

## 1. Введение

Жаропрочные стали и сплавы, применяемые для изготовления деталей, которые работают при высоких температурах в условиях сложнапряженного состояния в течение заданного периода времени, должны выдерживать напряжение, вызывающее заданную деформацию, не приводящую к разрушению.

$$HV = 373,4 + 6564 \cdot C + 102 \cdot Cr + 52,88 \cdot Ni - 1,23 \cdot T - 5628,8 \cdot C^2 - 1,86 \cdot Cr^2 - 0,86 \cdot Ni^2 - \left. \begin{aligned} &-211,74 \cdot C \cdot Cr - 220,4 \cdot C \cdot Ni - 1,2 \cdot C \cdot T - 0,91 \cdot Cr \cdot Ni - 0,004 \cdot Cr \cdot T + 0,03 \cdot Ni \cdot T + \\ &+ 9,7 \cdot C \cdot Cr \cdot Ni + 0,107 \cdot C \cdot Cr \cdot T - 0,024 \cdot C \cdot Ni \cdot T - 0,001 \cdot Cr \cdot Ni \cdot T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В зависимости от условий эксплуатации применяют различные жаропрочные материалы [1-3]. 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).

Жаропрочные стали нашли широкое распространение в турбинах электростанций, судов и авиационных двигателей, рабочих и направляющих лопатках, деталях камер сгорания, арматуре термических печей, другом печном оборудовании. 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 (рис. 1). Рациональным в данном случае является проведение ремонтных работ методами сварки и наплавки.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является оптимизация химического состава наплавленного жаропрочного металла для арматуры термических печей, нахождение материала с максимальными эксплуатационными характеристиками, а также изучение распределения механических характеристик по сечению сварного соединения и околошовной зоне из жаропрочных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей.

## 4. 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:

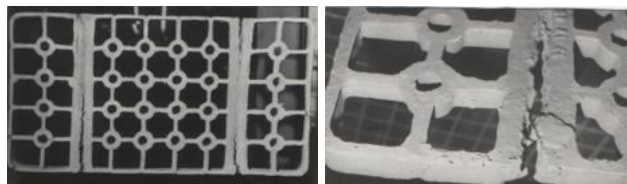


Рис. 1. Дефекты, выводящие из строя арматуру термических печей (поддоны весом 200 кг)

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

Анализ полученных регрессии 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]. Хром 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  $\sigma_b$  (предела прочности) так и относительного удлинения  $\delta$ . Однако, это повышение ограничено наличием в уравнении квадратичных членов за  $(C^2, Cr^2, Ni^2)$  с отрицательным вкладом, что свидетельствует о возможном наличии локальных экстремумов на поверхности отклика. Учитывая то, что значения физико-механических свойств могут принимать только положительные значения, уравнение было проверено в точках факторного пространства, ограниченного нижним и верхним уровнями варьирования. Отрицательных значений не зарегистрировано. 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 «-».

Вхождение в уравнения регрессии температуры (Т) со знаком «-» негативно сказывается на физико-механических свойствах сплавов. В зависимости от величины температурного градиента структура металла сварного соединения различна [5]. Так в интервале температур между линиями солидуса и ликвидуса 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 (рис. 2) металл полностью переходит в состояние аустенита.

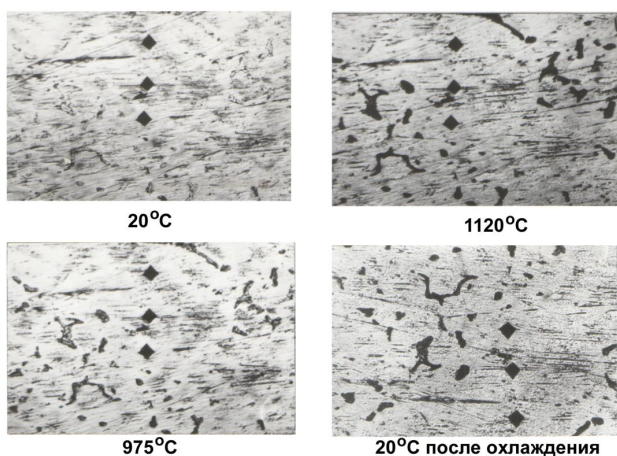


Рис. 2. Микроструктура стали 16X25H10C2 при различных температурах, x280

При этом происходит рост зерна, размеры которого увеличиваются тем более, чем выше нагрет металл выше температуры точки  $A_3$ . После охлаждения это может привести к образованию неблагоприятной видманштеттовой структуры. На участке нормализации 750-800°C до температуры 1100-1150°C металл имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. На участке неполной перекристаллизации металл нагревается до температур между точками  $A_1$  и  $A_3$ , поэтому этот участок характеризуется почти неизменившимися первоначальными ферритными, перлитными и аустенитными зернами и более мелкими зернами феррита и перлита после перекристаллизации, а также сфероидизацией перлитных участков. 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. Однако металл на этом

участке может обладать пониженной пластичностью и несколько повышенной прочностью.

На основе полученных уравнений регрессии были построены пространственные математические модели (рис. 3-6), характеризующие влияние углерода, хрома и никеля, а также температуры на физико-механические свойства (твердость) жаропрочного сплава.

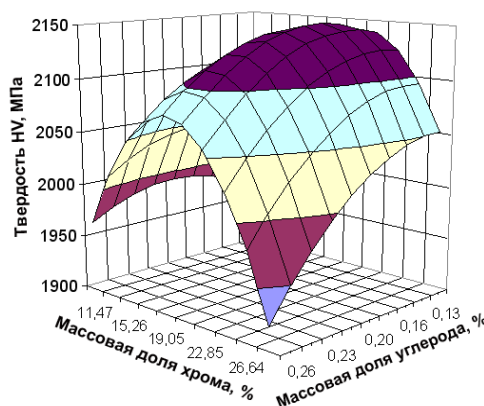


Рис. 3. Поверхность отклика функции HV при Ni = 15,95%; T = 20°C, Ni = 15,95%

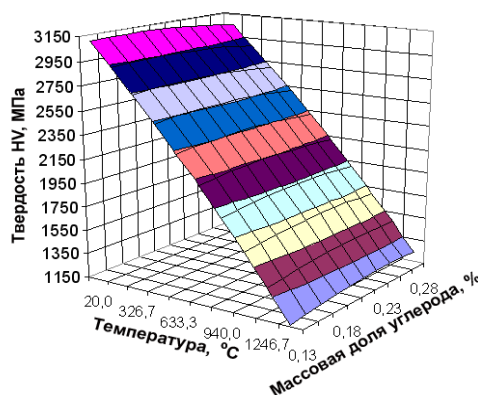


Рис. 4. Поверхность отклика функции HV при Cr = 20,95%

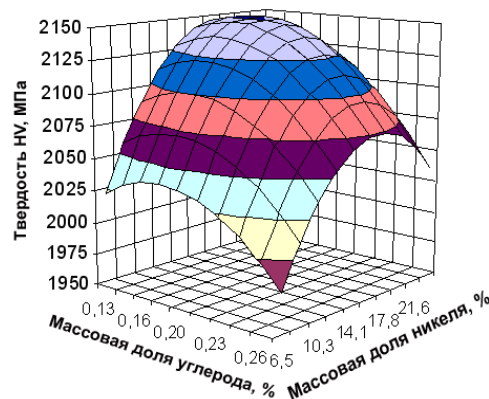


Рис. 5. Поверхность отклика функции HV при Cr = 20,95%; T = 20°C

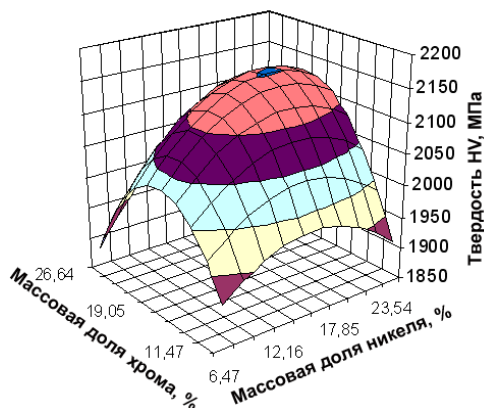


Рис. 6. Поверхность отклика функции HV при  $C = 0,16\%$ ;  $T = 20^\circ\text{C}$

В тоже время, аналитическое решение уравнения оказалось затруднительным, вследствие полного набора парных взаимодействий входящих в регрессионные модели. Поэтому было проведено исследование поверхности отклика на основе ее графического отображения в виде пространственных диаграмм и их сечений. На рис. 3 – 6 представлены пространственные 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.

Обработка результатов исследования целевой функции твердости (HV) показала наличие экстремумов в данной области варьирования факторов (рис. 3, 5, 6). Рассматривая их в сечениях можно утверждать, что оптимальные значения твердости достигаются при значениях легирующих элементов:  $C = 0,14-0,19\%$ ,  $Cr = 21-23\%$ ,  $Ni = 17-20\%$ .

## 5. Выводы

1. Теоретически доказана возможность исправления дефектов арматуры термических печей методами сварки и наплавки.
2. Проведен графоаналитический анализ математических моделей в виде уравнений регрессии, описывающих совместное влияние легирующих элементов (C, Cr, Ni) и температурного градиента (T) на физико-механические свойства (твердость HV) жаропрочных сталей и сплавов. Установлены оптимальные значения содержания легирующих элементов, при которых достигаются оптимальные значения физико-механических свойств наплавленного металла:  $C = 0,14-0,19\%$ ,  $Cr = 21-23\%$ ,  $Ni = 17-19\%$ .
3. Показано, что дальнейшие исследования необходимо провести с учетом расчетов, которые учитывают прекращения действия источника нагрева путем введения понятий фиктивного источника теплоты и фиктивного стока теплоты.

## Литература

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.

## Abstract

The article discusses the possibility of using the graph-analytical method for the analysis of prediction of the mechanical properties of the welded joints of heat-resistant steels Fe-Cr-Ni-Si. The heat-resistant steels and alloys, used for the manufacture of parts, which operate at high temperatures under a hard-intense state for a specified period of time, should withstand the tension, causing the deformation that does not lead to destruction. The aim of the work is to optimize the chemical composition of the welded heat-resistant metal for fittings of thermic furnaces, to find the material with maximum performance characteristics, and to study the distribution of the mechanical properties (HV hardness) on section of welded joint and heat-affected zone from heat-resistant austenitic and austenitic-ferritic steels.

Theoretically we have proved the possibility of correction of the defects of fittings of thermic furnaces by welding methods. We have held the graphic-analytical analysis of mathematical models in the form of regression equations, describing the joint influence of the alloying elements (C, Cr, Ni) and temperature gradient (T) on the physical and mechanical properties (HV hardness) of the heat-resistant steels and alloys. The optimal values for the content of the alloying elements were determined; they can provide the optimal values of the physical and mechanical properties of the welded metal:  $C = 0,14-0,19\%$ ,  $Cr = 21-23\%$ ,  $Ni = 17-19\%$ .

**Keywords:** physical and mechanical properties, welding joint, optimization, deformation, high-melting elements, response surface