



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



**PROLONGING OFF GAS DUCT LIFE
WITH SPRAY-COOLING**

By Troy D. Ward, P.E.

Systems Spray-Cooled Equipment Company, Nashville, TN

INTRODUCTION

Spray-Cooled Ducts utilize water at atmospheric pressure for cooling. Since the cooling system is not pressurized, high volume water leaks due to high pressure are eliminated. Nozzles that create turbulence through droplet impingement optimize heat transfer rates at any flow rate. An independent, enclosed cooling circuit provides the ability to vary the cooling capacity of the system according to localized demands. Thin-walled construction and a prescription assembly lessen the impact of thermal induced stress fatigue cracking. Shell construction combined with the separate cooling circuit promotes low cost maintainability.

This paper discusses the various features of Spray-Cooled Ducts and how their design reduces furnace downtime by prolonging duct life.

DISCUSSION TOPICS

PROCESS FEATURES

SHELL CONSTRUCTION

SPRAY SYSTEM

COOLING WATER

PIPING AND INSTRUMENTATION

MAINTENANCE AND REPAIR





KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



PROCESS FEATURES

Spray cooling performs the cooling function at atmospheric pressure utilizing spray nozzles to supply cooling water to the duct. Nozzles are located and sized to provide the required amount of cooling water for the varying heat load areas identified in the duct. The series of overlapping sprays create a high degree of turbulence at low (atmospheric) pressure. The greater the turbulence, the more efficient the system cools. The heat transfer coefficient for turbulent flow is ten times greater than the heat transfer coefficient for laminar flow.

The benefits of spray cooling include:

- Operation at atmospheric pressure reduces the amount of water that escapes the duct enclosure when there is a leak. A typical spray-cooled furnace component operating at 3 gallons per minute per square foot would dispense only 2.5 gallons per hour through a 2 square inch hole. In contrast, a typical tubular water-cooled furnace component operating at 60 psi would discharge more than 16,000 gallons per hour through the same size hole.
- Usage of cooling water is kept efficient by distributing it according to the requirements of the varying heat load areas identified throughout the duct; less water per square foot being required in cooler areas and more water per square foot being required in hot spots. Distribution of cooling water within the duct is via stainless steel piping that is not a part of the heated surface. Fouling of the water-cooled distribution piping, which can adversely affect the heat transfer rates in tubular water-cooled ducts, is not a factor with spray cooling. Cooling water is distributed throughout the duct at the same inlet water temperature. Cooling remains constant.
- Lower water volumes at lower pressures reduce pumping costs. Pumping the same volume of cooling water at one-half the pressure reduces pumping costs by 50%. Pumping one-half the volume of water at one-half the pressure reduces pumping costs by 75%.
- Thin-walled plate construction of the independent inner shell utilizing minimal welds, rounded corners and mechanical forming make the duct less susceptible to thermal induced stress fatigue cracking. Plate construction enables repairs to be made from the outside, rather than the inside. Operation at atmospheric pressure permits leaks to be temporarily repaired by an easy "weld-a-patch" technique with the duct still in service. Permanent repairs can be scheduled around production needs.

These benefits equate to reduced furnace downtime due to improved equipment availability.

SHELL CONSTRUCTION



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



Spray-Cooled Ducts are typically assemblies of obround (Figure 1) or cylindrical sections. Sectioning assists in the control of accumulative water, which cascades along the inner shell bound by surface tension. Shipping and installation are also benefactors of the section approach. Each section consists of an inner and outer shell. The inner shell is the hot plate and is in direct contact with the furnace off-gas. The outer shell surrounds the inner shell forming an annular enclosure. At each end is a closure piece that connects the inner shell to the outer shell. The annulus between the two shells is referred to as the spray chamber. Access to the spray chamber is through easy-opening hatches located on the outer shell. Hatches allow inspection of the spray system and inner shell and are positioned strategically near identified hot spots.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



The outer shell is the structural component of the Spray-Cooled Duct. It carries the load of the duct and is to which all supports are attached. The outer shell provides support to the inner shell by attachment only at the ends. Since the enclosure is vented and operates at atmospheric pressure, no additional connections between the inner and outer shell are required. This construction provides the minimal amount of constraint on the inner shell, which undergoes cyclic thermal expansion and contraction. Combined with plate thickness optimized based on heat load, this feature serves to minimize thermal stress fatigue cracking.

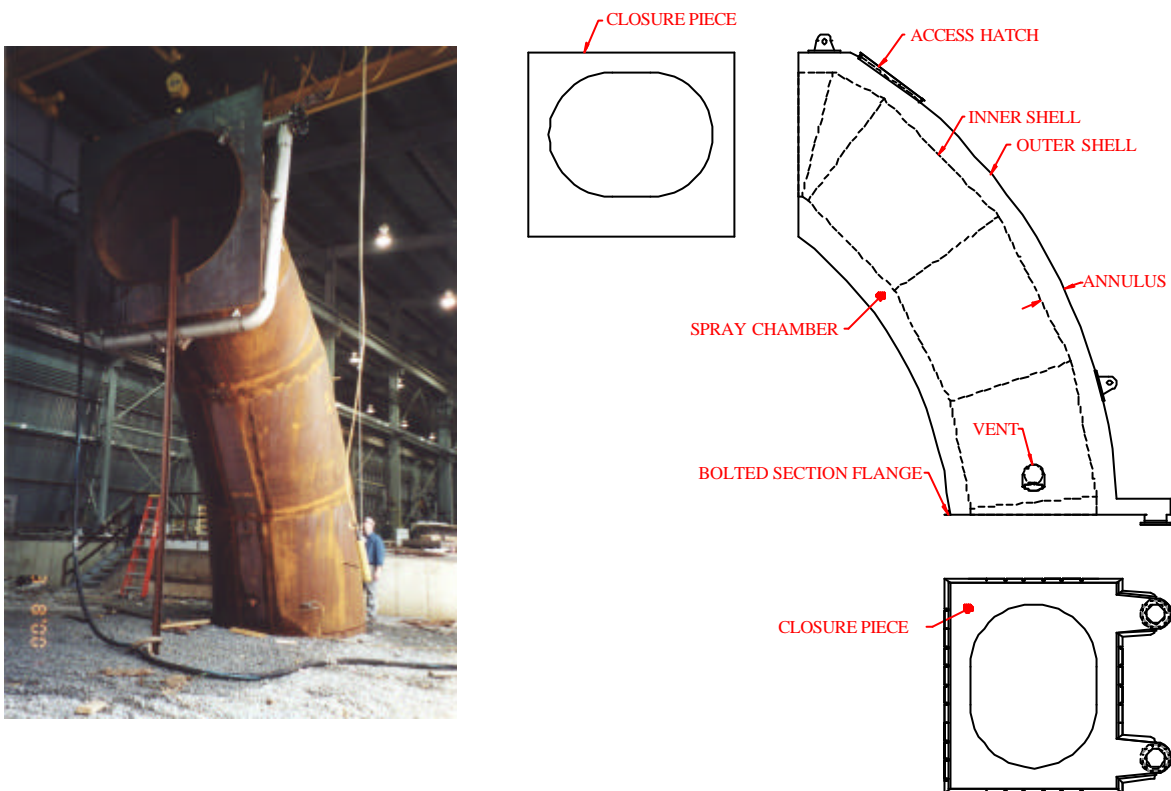


Figure 1

The primary material used for the inner shell in Spray-Cooled Equipment is carbon steel, pressure vessel quality ASTM A-516 Grade 70 plate. Properties such as thermal conductivity, allowable stress, workability and cost effectiveness have demonstrated that, for most applications, carbon steel suitable for use at elevated temperatures is preferred.

Thickness of the inner shell is a function of two considerations. One thickness will be considered based on its effectiveness in minimizing thermal stress fatigue cracking. Another thickness will be considered based on its effectiveness in resisting corrosion and



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



wear. Following is a sample determination of the proper material thickness considerate of heat load and thermal stress:



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



GIVEN INFORMATION:

- Existing duct cooling water flow rate = 3000 gpm
- Water temperature in = 80°F
- Water temperature out = 160°F
- Surface area = 617 ft²
- Plate Coefficient of Thermal Expansion = 6.33 x 10⁻⁶ in / in x °F
- Plate Modulus of Elasticity = 30 x 10⁶ lb / in²
- Plate Poisson's Ratio = 0.303
- Plate Thermal Conductivity = 25 Btu/hr x ft x °F

ANALYSIS:

$$\text{Heat Flux} = \frac{\text{Mass Flow Rate} \times \text{Specific Heat} \times \text{Delta Temperature}}{\text{Area}}$$

$$\text{Plate Differential Temperature} = \frac{\text{Heat Flux} \times \text{Plate Thickness}}{\text{Plate Thermal Conductivity}}$$

$$\text{Stress} = \frac{\text{Plate Coefficient of Thermal Expansion} \times \text{Plate Modulus of Elasticity} \times \text{Plate Differential Temperature}}{2 \times (1 - \text{Plate Poisson's Ratio})}$$

Combining the last two equations produces the following relationship:

$$\text{Stress} = \frac{\text{Plate Coefficient of Thermal Expansion} \times \text{Plate Modulus of Elasticity} \times \text{Heat Flux} \times \text{Plate Thickness}}{2 \times (1 - \text{Plate Poisson's Ratio}) \times \text{Plate Thermal Conductivity}}$$

HEAT FLUX:

$$\text{Heat Flux} = \frac{3000 \text{ gal/min} \times 8.33 \text{ lb/gal} \times 60 \text{ min/hr} \times 1 \text{ Btu/lb} \times \text{°F} \times 80\text{°F}}{617 \text{ ft}^2}$$

$$\text{Heat Flux} = 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2$$

STRESS:

$$\text{(For 0.50" Plate) Stress} = \frac{6.33 \times 10^{-6} \text{ in/in} \times \text{°F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times \frac{0.50}{12} \text{ ft}}{2 \times (1 - 0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times \text{°F}}$$



KONUS ICESA S.A.
SOLUCÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



Stress = 44,158 lb/in²



$$\text{(For 0.375" Plate) Stress} = \frac{6.33 \times 10^6 \text{ in/in} \times ^\circ\text{F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2}{\frac{x 0.375/12 \text{ ft}}{2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times ^\circ\text{F}}}$$

$$\text{Stress} = 33,118 \text{ lb/in}^2$$

$$\text{(For 0.25" Plate) Stress} = \frac{6.33 \times 10^6 \text{ in/in} \times ^\circ\text{F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.25/12 \text{ ft}}{2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times ^\circ\text{F}}$$

$$\text{Stress} = 22,079 \text{ lb/in}^2$$

FATIGUE:

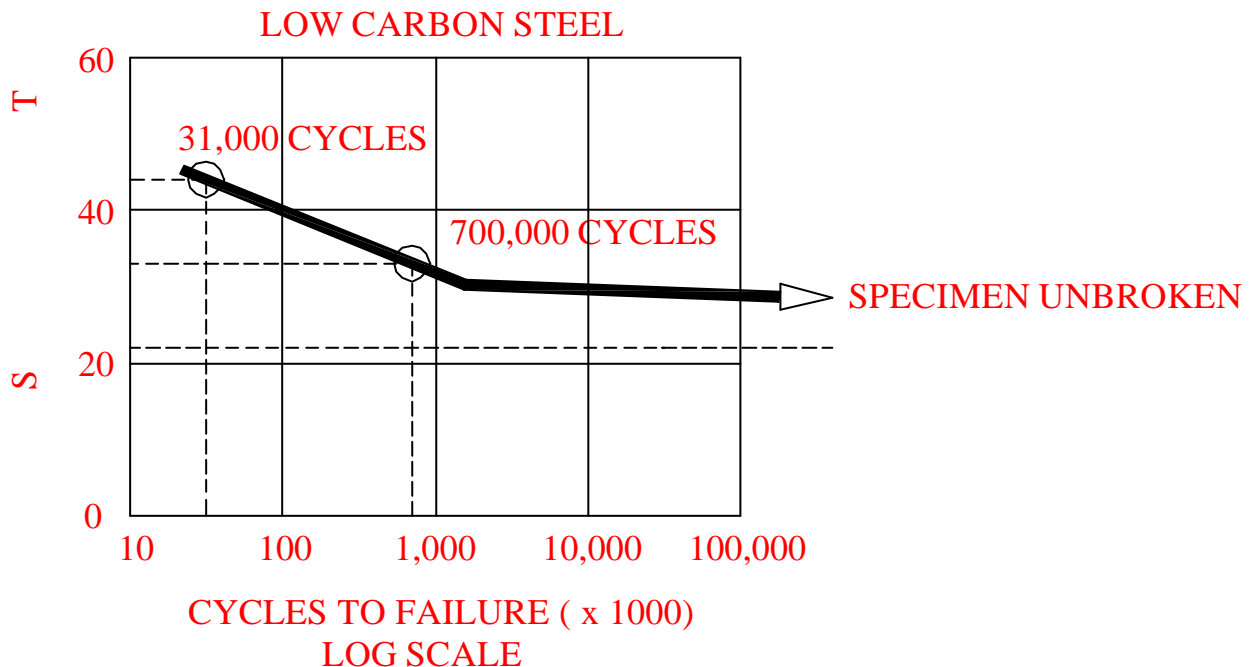


Figure 2



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS

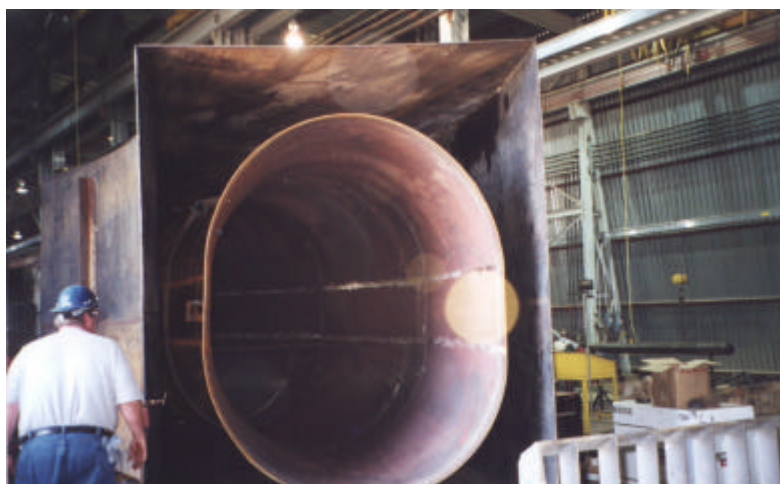


From Figure 2, the cycles to failure for the sample with a 0.50" thick inner shell is approximately 31,000 cycles. The cycles to failure for the sample with a 0.375" thick inner shell is approximately 700,000 cycles. A 0.25" thick inner shell would have a fatigue life that would exceed 100 million cycles. If based solely on fatigue life expectancy, the proper thickness for the carbon steel inner shell would be 0.25".

Typically, off gas duct gas streams are directed through relatively sharp bends enroute to emissions control equipment. Requisite high emissions draft rates increase the amount of particles that become entrained in the gas stream. These particles initiate erosion that is intensified by the sharp gas stream directional changes and the topography of the common tubular water-cooled ducts. Compounding this, corrosion caused by deposition of aggressive gas stream components (dilute sulfuric acid accumulations on slag particles or entrapped hydrochloric acid concentrations) can result in the formation of oxide scales. Oxidation, and the repetitive formation and removal of the oxide scales by erosion can accelerate metal removal or thinning of the exposed surface. This process can have a negative effect on the fatigue life of the duct as this chemical/physical attack can accelerate crack propagation and effectively reduce the number of cycles to fatigue failure. Except for the miter joint directional changes used in the construction of the spray-cooled duct inner shell, the exposed surface of the spray-cooled duct is smooth and presents free passage to the gas stream. The miter joint weld seams are ground smooth on the exposed surface and provide no crevices for the accumulation of corrosion causing gas stream components. However, if corrosion or erosion wear is identified as the mode of failure, life can be extended proportional to an increase in plate thickness. Doubling the inner shell thickness would double the wear life expectancy. Shell thickness though, should be optimized for wear considerate of an acceptable fatigue life expectancy.

Fatigue and wear life are built into the spray-cooled duct with the proper selection of inner shell plate thickness. Shell design must also take into account the effects of welded corners. Corners present a point of high potential for thermal stress fatigue cracking. They should be allowed to expand and contract freely by being unrestrained by their geometry or by nearby welds, reinforcements or attachments. Chamfering is an effective means of minimizing stress concentration at corners.

Prescription plate construction and assembly are parts of a successful recipe for improved maintainability that prolongs off gas duct life.





KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS





KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



SPRAY SYSTEM

The spray system (Figure 3) is an arrangement of noncorrosive piping and nozzles. Spray nozzles are typically removable by means of detachable spray bars that connect to a water supply header. A single inlet feeds the header. The entire piping network is attached to the outer shell so that the inner shell may be replaced without affecting the spray system.

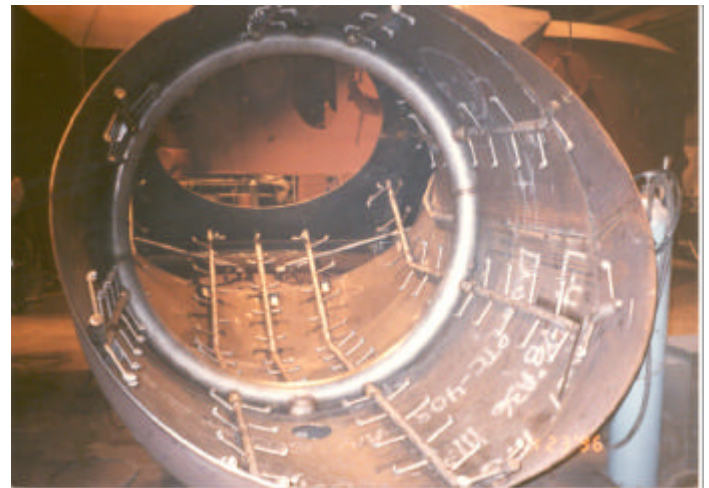
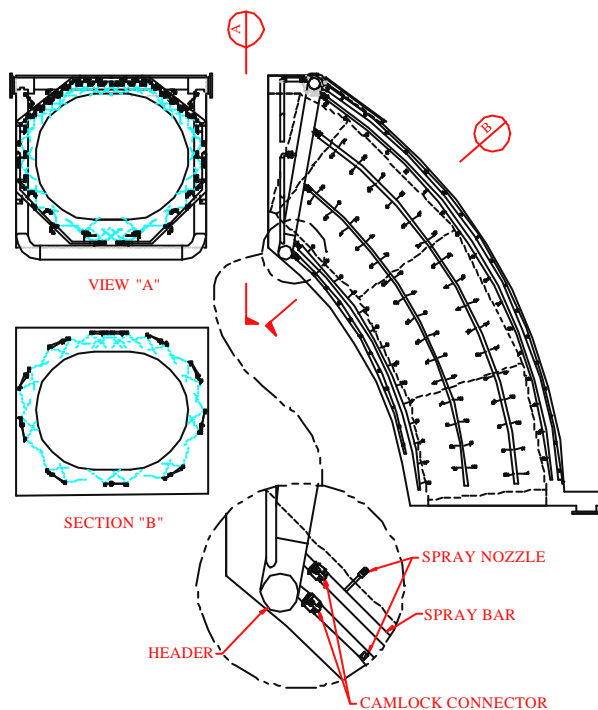


Figure 3

The amount of water distributed in a particular area of the duct is determined by the size of the nozzle used, the quantity of nozzles and the pressure at which the water is supplied. The resulting water distribution (gpm/ft²) affects the system efficiency and reliability.

Droplet impingement produced by the spray nozzles rather than water velocity typical for pressurized tubular cooling provides the turbulence required for optimal heat transfer. Very effective heat transfer is thereby obtained at virtually any flow rate. Cooling water is distributed according to the varying heat load demands identified in the duct; cool spots – less water, hot spots – more water. Available water is used most efficiently.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



Cooling capacity can also be readily increased. Camlock connectors facilitate spray bar removal. Either replacing existing nozzles with larger capacity nozzles or adding more nozzles will supply additional water and corresponding cooling.

Spray nozzles are available in a variety of capacities and spray angles. The nozzles most commonly employed in spray-cooled equipment today range in capacity between 2.6 and 7.0 gpm per nozzle @ 30 psig and have a 110° full cone spray pattern. To accommodate placement of the piping network a 12-inch annulus is preferred. Nozzle spray angle, nozzle capacity and the distance the nozzle is away from the spray-cooled surface determine the cooling water flow rate per unit area (gpm/ft²) and the amount of overlapping coverage. Figure 4 shows the effect of nozzle distance away from the spray-cooled surface.

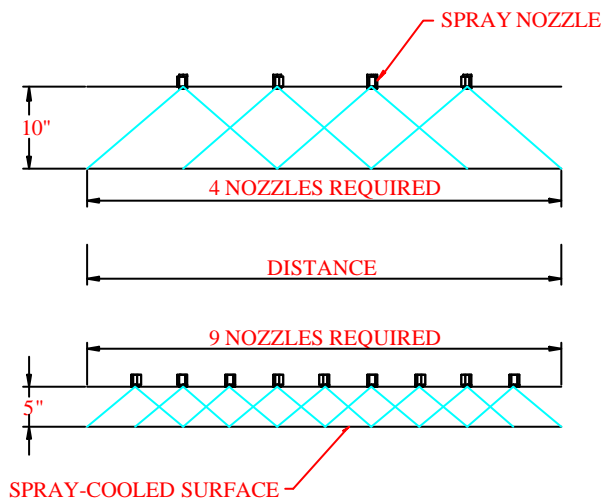


Figure 4





KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



COOLING WATER

Heat loads dictate the cooling water requirements for spray-cooled equipment. The amount of water required is inversely proportional to the allowable water temperature rise between the inlet and outlet of a particular section for an identified heat load. Lower water temperature rises require usage of higher volumes of cooling water. Higher water temperature rises permit usage of lower volumes of cooling water.

There is however, a limitation that must also be observed. Cooling water must be supplied at a rate sufficient to minimize film boiling. Evaporative cooling is undesirable. Boiling begins as water on the heated surface is superheated slightly, and subsequently evaporates. Bubbles begin to form on the surface during nucleate boiling. As the temperature continues to rise, rapidly forming bubbles blind the heated surface preventing replenishment with fresh liquid. A vapor film, which covers the surface, forms as the bubbles coalesce. Heat must then be conducted through the film before it can again be exposed to the cooling water. This thermal resistance causes a reduction in heat transfer and conditions become very unstable. Film boiling occurs. The surface must dissipate the applied heat flux, or its temperature will rise catastrophically above the melting temperature of the metal. For this reason, outlet temperatures are limited to at or around 160°F ensuring that sufficient cooling water is available for the normal heat flux and providing ample margin to accommodate transient heat loads. Nozzle spray pattern overlap provides additional protection against this phenomenon. Should a nozzle somehow become restricted, adjacent nozzles will provide back-up cooling to the affected area.

Accumulative run-off water forms a cascading film that bonds to the inner shell by surface tension and flows along the shell to assist the cooling process by offering reserve cooling capacity.



COOLING WATER QUALITY

Water quality requirements are comparable to the requirements of water used in other water-cooled equipment throughout the plant. Keeping water temperatures low and distributing the water through noncorrosive piping lessens water quality requirements. Water with a **ph**, which is neutral to slightly alkaline (7 to 8), has **Total Hardness** not greater than 200 ppm, has an **Alkalinity** not greater than 150 ppm, has **Total Dissolved Solids** not greater than 400 ppm, has **Largest Particulate Size** not greater than 0.030 in. and at a **Temperature** not greater than 110°F is optimal.

Properly functioning spray nozzles are a key factor in the successful operation of spray-cooled equipment. Nozzle blockage is minimized by the installation of a mechanical strainer through which all cooling water must pass in route to the duct inlet. A strainer screen opening of 1/32" maximum is recommended.



SUPPLY WATER SYSTEM PIPING AND INSTRUMENTATION

Cooling water is supplied to a Spray-Cooled Duct through noncorrosive piping circuits as simplified in Figure 5. A supply line carries water to the duct location. From there, a header distributes water to the duct section(s). Each section has a single inlet with its respective flow control valve. A strainer, typically common to all sections, is installed in the proximity of the duct. Noncorrosive piping downstream of the strainer ensures against rust contamination. A flow measurement device located between the strainer and the section is used to monitor low and high flow conditions. Temperature sensors located at the discharge outlet of each section monitor discharge water temperature. The flow and temperature monitors are connected to an alarm panel or PLC.

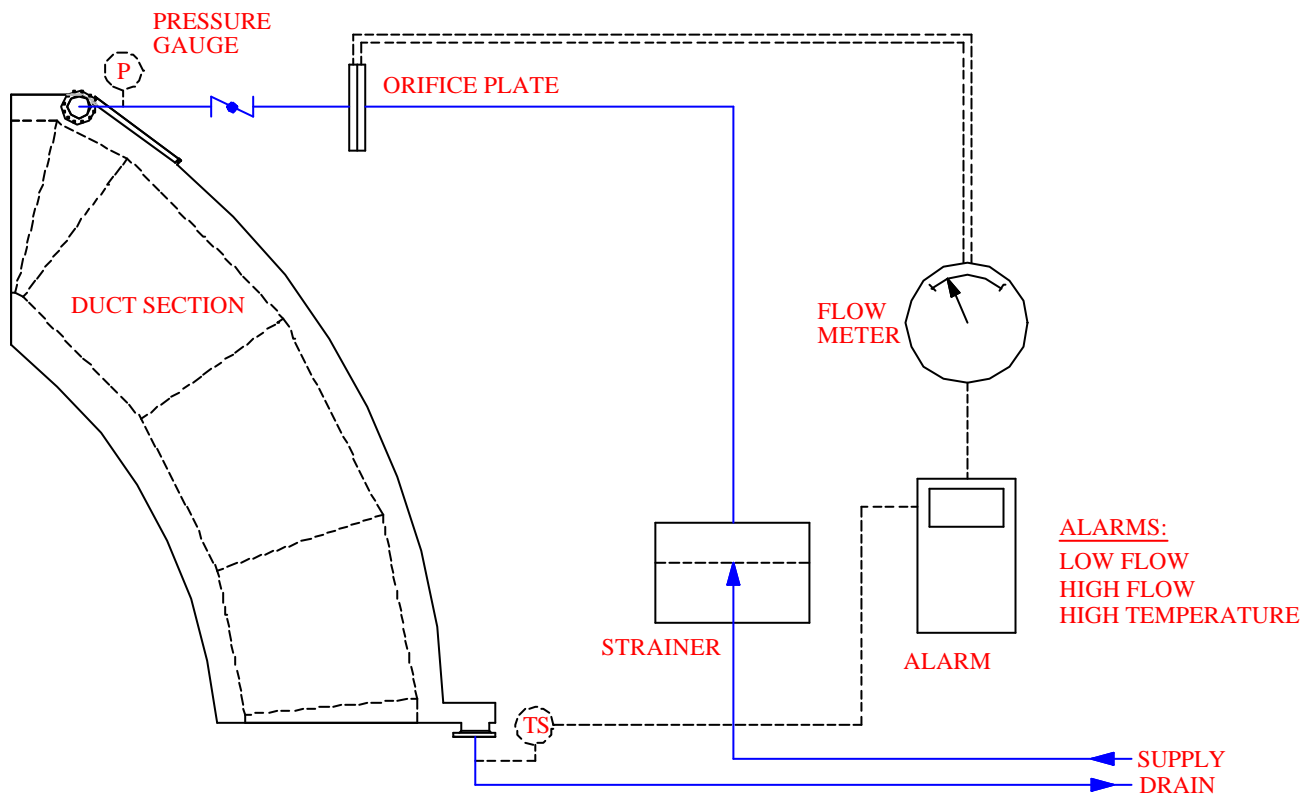


Figure 5



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



INSPECTION

Daily maintenance should not be required. Periodic inspection should be done to ensure proper operation of the cooling system. A visual inspection of the spray chamber and verification that flow and temperature monitoring equipment are functioning properly should be sufficient.

Visual inspection of the spray chamber requires access during a time when cooling water flow can be reduced. Visibility is increased as the flow rate is reduced. An inspection confirms that nozzle spray patterns are uniform with no signs of blockage and that the condition of the inner shell is normal. New spray nozzle designs, with larger passages that are less likely to become blocked, have reduced the need to inspect the spray patterns.

REPAIR

Should a crack or hole be discovered in the inner shell, the amount of water leakage would be minimal. For this reason, most inner shell repairs can be scheduled during a planned shutdown.

Repairs can be made from the outside of the duct. Temporary repairs involving welding up a crack or installing a patch over a hole is an inherent advantage of spray cooling and is recommended to maintain operations until a scheduled shutdown. The inner shell is accessible by cutting an opening in the outer shell. The incident area is prepared by removing the damaged plate material to a minimum distance larger than the hole or back to original thickness plate whichever is the greater. Then a patch plate of similar thickness carbon steel, which overlaps the prepared cut out, is welded in place with a full circumferential fillet weld. Permanent repairs can be made on a down day when time will permit removal and replacement of the damaged area. Preparation of the incident area is the same. More care is taken that the patch be prepared from the same thickness material and grade of steel recommended for a permanent hot plate repair. The patch plate is installed flush with the existing plate with the edges of both the new plate and existing plate prepared for a full penetration weld and finish.

Spray-Cooled Ducts are designed for maintainability. The inner shell eventually wears out but can be replaced in whole or part. Since there are no attachments from the outer shell or spray system to the inner shell other than the end connections, replacement is quick and inexpensive. The inner shell is simply cut free by removing the weld at the closure piece ends. Once free, the old inner shell is slid out and a new inner shell is slid in and welded to the closure piece ends. The outer shell and spray system, allowing for normal wear and tear, should last indefinitely.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



CONCLUSION

A Spray-Cooled Duct has inherent features that minimize many of the problems typical of pressurized tubular ducts. As previously discussed, high pressure, high volume water leaks, unmanageable thermal stress fatigue cracking and difficult and/or expensive maintenance are a few areas where spray cooling provides appreciative improvement.

In summary, the primary advantages of spray-cooling over conventional pressurized cooling are the elimination of the source of high pressure, high volume water leaks; the ability to effectively transfer heat at low flow rates; the consistency and uniformity at which cooling water is distributed; the ease at which cooling water distribution can be matched to duct requirements; construction that lessens the impact of thermal induced stress fatigue cracking; and a complete assembly that promotes life prolonging maintainability.

This discussion described the features of spray cooling that prolong fixed duct life. These and other benefits can be substantiated by years of consistently good performance in electric arc, basic oxygen and argon-oxygen decarburization furnace steel making.

Systems Spray-Cooled Technology is covered by one or more patents – United States Patent Nos. 4,715,042; 4,813,055; 4,815,096; 4,849,987; 5,115,194; 5,330,161; 5,327,453; 5,444,734; 5,561,685; 5,648,981 and foreign patents.

Systems Spray-Cooled Equipment Company, 311 Plus Park Boulevard, Suite 280, Nashville, Tennessee 37217, (615) 366-7772, Web Site: www.thesystemsgroup.biz.

REFERENCES:

Avallone, E. A., and Theodore Baumeister III: *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 10th edition, McGraw-Hill Book Company 1996, page 5-9, Figure 5.1.17.

Lehr, D. A.: *Features of UCARÒ Spray Cooling That Prolong BOF Hood Life*, UCAR Carbon Company, Inc.

Holman, J. P.: *Heat Transfer*, 5th edition, McGraw-Hill Book Company 1981.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



DUTOS DO DESPOEIRAMENTO REFRIGERADOS POR SPRAY

Por Troy D. Ward, P.E.
Systems Spray-Cooled Equipment Company, Nashville, TN

Traduzido por – Lauro Chevrad
KONUS ICESA SA
DIRETOR TECN/COMERCIAL

INTRODUÇÃO

Dutos Refrigerados por “spray” utilizam água à pressão atmosférica. Uma vez que o sistema de refrigeração não é pressurizado, os vazamentos de grande volume de água por causa da alta pressão são eliminados. No caso de sprays, que criam turbulência as taxas de transferência de calor são otimizadas em qualquer taxa de fluxo. Um circuito de refrigeração independente fechado oferece a possibilidade de variar a capacidade de refrigeração do sistema de acordo com as exigências locais. Uma construção com paredes finas reduz o impacto de fissuras causadas por fadiga térmica induzida

A construção do corpo combinada com o circuito de refrigeração separado promove uma manutenção de baixo custo.

Este documento discute as diversas formas de Dutos Refrigerados por “spray”) e como seu projeto reduz o tempo improdutivo da fornalha ao prolongar a vida do duto.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



PONTOS DE DISCUSSÃO

CARACTERÍSTICAS DE PROCESSO

CONSTRUÇÃO DO CORPO

SISTEMA DE “spray”

ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

MANUTENÇÃO E REPAROS

1. CARACTERÍSTICAS DE PROCESSO

A refrigeração por “spray” realiza a função de refrigeração à pressão atmosférica utilizando bocais “spray” para a refrigeração ao duto.

Os bocais “sprays” fornecem a quantidade necessária de água de refrigeração para as áreas de carga de calor variáveis identificadas no duto. A série de “sprays” sobrepostos cria um alto grau de turbulência a baixa pressão atmosférica. Quanto maior a turbulência, mais eficientemente o sistema será.

O coeficiente de transferência de calor para fluxo turbulento é dez vezes maior do que o coeficiente de transferência de calor para fluxo laminar.

Os benefícios da refrigeração por “spray” incluem:

- A operação à pressão atmosférica reduz a quantidade de água que vaza para o sistema interno de despoejamento há uma trinca no duto.
- Um duto típico de despoejamento refrigerada por “spray” operando a 6,9 m³/hora/m² vazaria somente 11,34 l/h por hora através de uma abertura de 2 polegadas quadradas. Por contraste, um típico componente tubular de fornalha refrigerada a água operando a 4 bar descarregaria mais do que 72.576 l/h através de furo do mesmo tamanho.
- O uso de água de refrigeração é mantido eficiente distribuindo-a de acordo com as exigências das áreas de carga de calor variáveis identificadas ao longo do duto; menos água por pé quadrado sendo exigida em áreas mais frias e mais água por pé quadrado sendo exigida em pontos quentes. A distribuição de água de refrigeração dentro do duto é feita por meio de tubulação de aço inoxidável que não é parte da superfície aquecida. O acúmulo de resíduos na tubulação de



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



distribuição de refrigeração a água, o que pode afetar adversamente as taxas de transferência de calor em dutos tubulares resfriados a água, não é um fator a considerar quando se trata da refrigeração por “spray”. A água de refrigeração é distribuída ao longo do duto com a mesma temperatura da água que entra. A refrigeração se mantém constante.

- Volumes de água menores a pressões menores reduzem os custos com bombeamento. Bombear o mesmo volume de água de refrigeração à metade da pressão reduzirá os custos de bombeamento em 50%. Bombear metade do volume de água a metade da pressão reduzirá os custos de bombeamento em 75%.

Se a construção do duto é feita adequadamente, ele ficará menos suscetível a fissura térmica induzida por fadiga. A construção em chapa permite que sejam feitos reparos pelo lado de fora, ao invés de ser feita pelo lado de dentro. A operação à pressão atmosférica permite que os vazamentos sejam temporariamente reparados por meio de uma fácil técnica de solda com remendo ainda com o duto em serviço. Os reparos permanentes podem ser programados considerando as necessidades de produção. Esses benefícios resultam numa redução do tempo improdutivo do forno devido a uma melhor disponibilidade do equipamento.

2 - CONSTRUÇÃO DO CORPO

Os dutos refrigerados por “spray” são tipicamente conjuntos de seções cilíndricas ou oblongas (Figura 1). A divisão em seções auxilia no controle de acúmulo de água, o que gera um efeito em cascata ao longo da duto interno pela tensão superficial.

O transporte e a instalação também são beneficiados pela abordagem por seção. Cada seção consiste de uma duto interno e uma externa.

A duto interno é a face quente e fica em contato direto com os gases quentes. A armação externa envolve a duto interno formando um invólucro anular. Em cada extremidade existe uma peça de fechamento que conecta a duto interno à armação externa. O anel entre as duas armações é a câmara de “spray”. O acesso à câmara de “spray” é através de janelas de fácil abertura que estão na armação externa. As janelas permitem a inspeção do sistema de “spray” e do duto quente. Elas ficam posicionadas estrategicamente próximas aos pontos quentes identificados.

A armação externa é o componente estrutural do duto refrigerado por “spray”. É por ela que passa a carga do duto e onde todos os apoios são fixados. A armação externa dá apoio à duto interno prendendo-se somente nas extremidades. Uma vez que o invólucro tem ventilação e opera à pressão atmosférica, não são exigidas conexões adicionais entre as armações interna e externa. Esta construção oferece a mínima limitação de espaço à duto interno, passando por expansões e contrações térmicas cíclicas. Combinado com a espessura otimizada da chapa, que é baseada na carga de calor, este recurso serve para minimizar a fissura térmica por fadiga.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



PEÇA DE FECHAMENTO

PORTINHOLA DE ACESSO

DUTO INTERNO ("INNER SHELL")

ARMAÇÃO EXTERNA ("OUTER SHELL")

CÂMARA DE "spray"

ANEL

PEÇA DE FECHAMENTO

ABERTURA DE VENTILAÇÃO

FLANGE DE SEÇÃO APARAFUSADA

PEÇA DE FECHAMENTO

Figura 1

O material básico usado para o duto interno em equipamentos refrigerados por "spray" é a chapa de aço carbono, com qualidade para cilindro de pressão ASTM A-516 Grau 70. Propriedades como condutividade térmica, fadiga admissível, exeqüibilidade, e relações custo-benefício têm demonstrado que, para a maior parte das aplicações, o aço-carbono adequado para o uso em temperaturas elevadas é preferido.

A espessura da duto interno é uma função de duas considerações. Uma espessura será considerada baseada em sua eficácia em minimizar a fissura térmica por fadiga. Uma outra espessura será considerada baseada em sua eficácia em resistir à corrosão e ao desgaste. Segue uma amostra de determinação da espessura apropriada do material considerado de carga de calor e fadiga térmico:

INFORMAÇÃO DADA:

- Taxa de fluxo da água de refrigeração no duto existente = 681 m³/h
- Temperatura da água no interior = 80° F = 27° C
- Temperatura da água no exterior = 160° F = 71° C
- -Área da superfície = 61,7 m²
- Coeficiente de Expansão Térmica da Chapa = 6.33×10^{-6} pol./ pol. x °F



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



- Módulo de Elasticidade da Chapa = $30 \times 10^6 \text{ lb / pol.}^2$
- Raio da Chapa Poisson's = 0.303
- Condutividade Térmica da Chapa = $25 \text{ Btu/hr x ft x } ^\circ\text{F}$

ANÁLISE:

Fluxo de Calor = (Taxa de Fluxo de Massa x Calor Específico x Delta T/ Área)

Temperatura Diferencial da Chapa = (Fluxo de Calor x Espessura da Chapa)/Condutividade Térmica da Chapa)

Fadiga = Coeficiente de Expansão Térmica da Chapa x Módulo de Elasticidade da Chapa x Temperatura Diferencial da Chapa/2x(1 – Razão da Chapa Poisson)

A combinação das duas últimas equações produz a seguinte relação:

Fadiga = Coeficiente de expansão térmica da chapa x Módulo de elasticidade da chapa x (fluxo de calor x Espessura da chapa / 2 x (1 – Razão da Chapa Poisson) x Condutividade térmica da chapa

FLUXO DE CALOR:

Fluxo de calor = $3000 \text{ gal/min} \times 8.33 \text{ lb/gal} \times 60 \text{ min/hr} \times 1 \text{ Btu/lb} \times ^\circ\text{F} \times 80\text{F} / 617 \text{ ft}^2$

Fluxo de calor = 194,490 Btu / hr x ft²

FADIGA:

Para chapa de 12,5 mm Fadiga = $(6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times ^\circ\text{F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.50/12 \text{ ft}) / [2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times ^\circ\text{F}]$

Fadiga = 44,158 lb/pol²

Para chapa de 9,5 mm Fadiga = $(6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times ^\circ\text{F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.375/12 \text{ ft}) / (2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times ^\circ\text{F})$

Fadiga = 33,118 lb/pol²

Para chapa de 6,35 mm Fadiga = $(6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times ^\circ\text{F} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.25/12 \text{ ft}) / 2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times ^\circ\text{F}$

Fadiga = 22,079 lb/pol²



KONUS ICESA S.A.
SOLUCÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



FADIGA:

FADIGA, kpsi

AÇO COM BAIXO CARBONO (“LOW CARBON STEEL”)

31,000 CICLOS

700,000 CICLOS

ESPÉCIME INTEIRO

CICLOS PARA FALHA (x 1000)

ESCALA (“LOG SCALE”)

Figura 2

Da figura 2, os ciclos para falha para a amostra com um duto interno com 12,5 mm de espessura são aproximadamente 31,000. Os ciclos para falha para a amostra com um duto interno de 9,5 mm de espessura são aproximadamente 700,000.

Um duto interno com 6,35 mm de espessura teria uma vida de fadiga que excederia a 100 milhões de ciclos. Se apenas baseado na expectativa de vida com fadiga, a espessura apropriada para o duto interno de aço carbono seria de 6,35 mm.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



Tipicamente, os cursos de gás em dutos são direcionados através de curvas relativamente fortes no sentido do equipamento de controle de emissões.

Exigir altas taxas de vazão aumentará a quantidade de partículas no fluxo de gás. Estas partículas dão início a erosão que é intensificada pelas fortes mudanças direcionais no fluxo do gás e pela topografia dos dutos tubulares comuns refrigeradas a água.

Levando isso em consideração, a corrosão causada pelo depósito de componentes existentes no fluxo do gás (acúmulo de ácido sulfúrico diluído em partículas de escória ou concentrações de ácido hidrocloreídrico retidas) pode resultar na formação de uma película oxidada. A oxidação, e a constante formação e remoção de películas oxidadas pela erosão pode acelerar a remoção do metal ou o desgaste da superfície exposta. Este processo pode ter um efeito negativo sobre a fadiga do duto pois esta agressão químico/física pode acelerar a propagação de fissuras e reduzir efetivamente o número de ciclos à falha por fadiga.

Exceto quanto às mudanças direcionais nas juntas usadas na construção do duto interno do duto refrigerado por “spray”, a superfície exposta do duto refrigerado por “spray” é regular e apresenta livre passagem do fluxo de gás. As costuras de solda da junta em são alisadas com esmeril na superfície exposta e não deixam fendas para o acúmulo de corrosão que venha causar aos componentes de fluxo de gás.

Entretanto, se corrosão ou desgaste por erosão forem identificados como o motivo da falha, a vida pode ser estendida proporcionalmente a um aumento na espessura da chapa.

Dobrar a espessura da duto interno dobraria a expectativa de vida útil. A espessura da armação entretanto, deve ser otimizada para uso considerando uma expectativa de aceitável de vida útil.

A fadiga e desgaste estão compreendidas no duto refrigerado por “spray” com a escolha apropriada da espessura da chapa do duto interno. O projeto da armação também deve levar em consideração os efeitos nos cantos soldados. Os cantos apresentam um ponto de alto potencial para fissura térmica por fadiga. Deve-se permitir que eles se expandam e contraíam livremente sem ser impedidos por sua geometria ou pelas soldas vizinhas, reforços ou anexos. O uso de chanfro é um meio eficaz de minimizar a concentração de fadiga nos cantos.

A construção e montagem de chapa conforme as instruções são partes de uma receita bem-sucedida para a manutenção bem aproveitada que prolonga a vida do duto.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



3 - SISTEMA DE “spray”

O sistema de “spray” (figura 3) é uma disposição de tubulação e bocais não-corrosivos. Os bocais de “spray” são tipicamente removíveis por meio de barras destacáveis de “spray” que se conectam com um tubo de alimentação que é a fonte de água. Uma entrada simples alimenta este tubo de alimentação. A rede de tubulação inteira fica fixa à armação externa para que a duto interno possa ser substituída sem afetar o sistema de “spray”.

SEÇÃO “B”

TUBO DE ALIMENTAÇÃO

VISTA “A”

CONECTOR “CAMLOCK”

BARRA DE BORRIFO (“spray bar”)

BOCAL DE BORRIFO (“spray nozzle”)

Figura 3

A quantidade de água distribuída numa área particular do duto é determinada pelo tamanho do bocal usado, a quantidade de bocais e a pressão com que a água entra. A resultante distribuição da água (gpm/ft²) e a eficácia e confiabilidade do sistema.

A incidência de gotejamento produzida pelos bocais de “spray” ao invés da típica velocidade da água para refrigeração tubular gera a turbulência necessária para a transferência de calor otimizada. A transferência de calor bem eficaz é então obtida a virtualmente qualquer taxa de fluxo. A água de refrigeração é distribuída de acordo com as variáveis demandas de carga de calor identificadas no duto; pontos frios com menos água, pontos quentes com mais água. A água disponível é usada mais eficientemente.

A capacidade de refrigeração também pode ser facilmente aumentada. Os conectores facilitam a retirada da barra de “spray”. Seja substituindo os bocais existentes por outros com maior capacidade ou acrescentando mais bocais resultará na entrada de mais água e a respectiva refrigeração.

Os bocais de “spray” estão disponíveis numa variedade de capacidades e ângulos de “spray”. Os bocais mais comumente empregados em equipamento refrigerado por “spray” hoje em dia variam em capacidade entre 12 e 32 l/min por bocal a 2 bar e têm um cone padrão 110° padrão cone cheio.

O ângulo do “spray” do bocal, a capacidade do bocal e a distância entre o bocal e a superfície refrigerada pelo “spray” determinam a taxa de fluxo da água de refrigeração por unidade de área (L/min/m²) e a cobertura-overlapping. A figura 4 mostra o efeito da distância entre o bocal e a superfície refrigerada por “spray”.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



BOCAL DE BORRIFO ("spray nozzle")

SUPERFÍCIE REFRIGERADA POR "spray"

9 BOCAIS NECESSÁRIOS

4 BOCAIS NECESSÁRIOS

DISTÂNCIA

Figura 4

3 - ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

As cargas de calor determinam quanto de água de refrigeração é necessária para o equipamento refrigerado por "spray". A quantidade de água necessária é inversamente proporcional ao delta T entre a sua entrada e saída da seção para uma carga de calor identificada. Para elevar a temperatura da água quando está mais baixa exige o uso de maior quantidade de água de refrigeração. Para elevar a temperatura da água quando está mais alta permite o uso de menor quantidade de água de refrigeração.

Há entretanto, uma limitação que também deve ser observada. A água de refrigeração deve ser fornecida a uma taxa que seja suficiente para minimizar a ebulição da película. A refrigeração evaporativa é indesejável. A ebulição começa à medida que a água sobre a superfície aquecida é levemente superaquecida, e subsequente evapora. Bolhas começam a se formar sobre a superfície durante a ebulição nucleada. À medida que a temperatura continua a subir, rapidamente formando bolhas a superfície aquecida é encoberta evitando o reabastecimento com novo líquido. Uma película de vapor, que cobre a superfície, se forma enquanto as bolhas se aglutinam.

O calor deve então ser conduzido por meio da película antes que ele possa novamente ser exposto à água de refrigeração. Esta resistência térmica causa uma redução na transferência de calor, e as condições se tornam muito instáveis.

A ebulição da película ocorre. A superfície deve dissipar o fluxo de calor que foi aplicado, caso contrário sua temperatura subirá catastroficamente acima da temperatura de fusão do metal. Por causa disso, as temperaturas de saída são limitadas em cerca de 71° C garantindo que água de refrigeração suficiente esteja disponível para o fluxo de calor normal e oferecendo uma margem ampla para acomodar as cargas de calor transitórias. A superposição dos jatos dos de "spray" dá proteção adicional contra este fenômeno.

Se de alguma forma o bocal se encontrar entupido, os bocais adjacentes oferecerão auxílio no resfriamento da área afetada.

A água cumulativa que escorre forma uma cascata que se fixa ao duto interno por tensão superficial e flui ao longo da armação para ajudar no processo de refrigeração, oferecendo reserva à capacidade de refrigeração.



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



4 - QUALIDADE DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

As necessidades de qualidade da água são comparáveis às da água usada em outros equipamentos refrigerados por água dentro da planta. Manter baixa a temperatura da água e distribuí-la por tubulação não-corrosiva diminui as necessidades de qualidade da água.

A água ideal deve ter as seguintes características:

com um Ph que varie de neutro a levemente alcalina (7 a 8), tenha um fator de **Resistência Total** que não é maior do que 200 ppm, tenha um fator de **Alcalinidade** que não é maior do que 150 ppm, tenha um fator de **Sólidos Dissolvidos Totais** que não é maior do que 400 ppm, tenha **o maior tamanho de partículas** que não é maior do que 0.030 pol. e a uma **Temperatura** que não é maior do que 11°F é a ideal.

Funcionando apropriadamente, os bocais de “spray” são um fator-chave na operação bem-sucedida do equipamento refrigerado por “spray”. O entupimento do bocal é minimizado pela instalação de um filtro mecânico através do qual toda a água de refrigeração deve passar a caminho da entrada do duto. Um filtro cuja tela tenha abertura de no máximo 1/32 pol. é recomendável.

5 - ENCANAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA

A água do “spray” é conduzida por tubulações de aço inoxidável conforme simplificado na Figura 5. Cada seção tem uma entrada com sua respectiva válvula de controle de fluxo. Um filtro comum a todas seções, fica instalado nas proximidades do duto. A tubulação de aço inoxidável garante contra contaminação por ferrugem.

Um dispositivo de medição de fluxo localizado entre o filtro e a seção é usado para monitorar as condições de baixo e de alto fluxos. Sensores de temperatura localizados na saída de descarga de cada seção monitoram a temperatura da água sendo descarregada. Os monitores de fluxo e de temperatura ficam conectados a um painel de alarme ou PLC.

RALO

SEÇÃO DO DUTO

FLUXO

FLUXO BAIXO

TEMPERATURA ALTA

FLUXO ALTO

ALARMES:

ALARME

MEDIDOR (“METER”)



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



ENTRADA ("SUPPLY")

CHAPA DE ORIFÍCIO ("ORIFICE PLATE ")

PRESSÃO

MANÔMETRO

FILTRO

Figura 5

6 - VISTORIA

A manutenção diária não é necessária. A vistoria periódica deverá ser realizada para garantir a operação apropriada do sistema de refrigeração. Basta uma vistoria visual da câmara de "spray" e a verificação de que o equipamento de monitoramento de fluxo e de temperatura está funcionando apropriadamente.

A vistoria visual da câmara de "spray" é feita quando o fluxo de água de refrigeração possa ser reduzido. A visibilidade é aumentada à medida que a taxa de fluxo reduz. Uma vistoria confirmará se os padrões de "spray" estão uniformes e sem sinais de entupimento e se a condição da duto interno está normal. Novos modelos de "spray", que têm menor tendência a entupir, têm menos necessidade de inspeção nos padrões de "spray".

7 - REPAROS

No caso de uma furo no duto interno, o volume de vazamento de água seria mínimo. Por causa disso, a maioria dos reparos em armações internas podem ser programados para ser feitos durante uma parada programada.

Os consertos podem ser feitos pelo lado externo do duto. Reparos temporários que envolvam a soldagem de uma fissura ou a instalação de um remendo sobre um furo são uma vantagem inerente da refrigeração por "spray" e são recomendáveis para manter as operações até um desligamento programado. O duto interno é acessível ao se cortar e abrir a armação externa.

Reparos permanentes podem ser feitos em um dia sem atividades quando o tempo permitir a remoção e colocação na área danificada. Deve-se tomar mais cuidado para que o remendo seja preparado com material da mesma espessura e grau do aço recomendado para um reparo permanente em chapa quente. A chapa do remendo será instalada rente à chapa já existente com ambas as bordas da chapa nova e da preexistente preparadas para uma solda com penetração e acabamento totais.

Os dutos refrigerados por "spray" são projetados para durar. O duto interno eventualmente se desgasta mas pode ser substituído. Uma vez que não há outra conexão entre a armação externa ou o sistema de "spray" com a carcaça interna além



KONUS ICESA S.A.
SOLUÇÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



dos terminais de conexões, a substituição é rápida e não é de custo alto. Separa-se o duto interno de forma simples ao remover a solda nas extremidades da peça de fechamento. Quando estiver livre, a duto interno usado deslizará para fora e a nova peça deslizará para dentro e será soldada às extremidades da peça de fechamento. A armação externa e o sistema de “spray”, dentro do desgaste e consumo normais, deverão durar por tempo indefinido.

8 -CONCLUSÃO

Um duto refrigerado por “spray” tem características inerentes que minimizam muitos dos problemas típicos em dutos tubulares pressurizados. Como anteriormente discutido, a pressão alta, grandes volumes de vazamentos de água, fissuras causadas por fadiga térmica induzida de manuseio e manutenção difíceis e/ou de alto custo são algumas das áreas onde a refrigeração por “spray” oferece melhorias consideráveis.

Em resumo, as vantagens básicas da refrigeração por “spray” em contraste com a refrigeração pressurizada convencional são:

- a eliminação da fonte de alta pressão, dos grandes volumes de vazamentos de água;
- a capacidade de efetivamente transferir calor a taxas baixas de vazão;
- a consistência e a uniformidade com que a água de refrigeração é distribuída;
- a facilidade com que a distribuição dessa água pode ser compatibilizada com as necessidades do duto;
- a construção que reduz o impacto das fissuras causadas por fadiga térmica induzida;
- e um conjunto completo que permite uma manutenção com prolongamento da vida útil.

Esta discussão descreveu as características da refrigeração por “spray” que prolonga a vida do duto fixo. Estes e outros benefícios podem ser substanciados ao longo de anos de desempenho bom e consistente na produção de aço em fornalhas por arco elétrico, decarbonização com oxigênio básico e argônio-oxigênio.

A Tecnologia de Sistemas Refrigerados por “spray” está coberta por uma ou mais patentes OE Patente nos Estados Unidos de Nos. 4,715,042; 4,813,055; 4,815,096; 4,849,987; 5,115,194; 5,330,161; 5,327,453; 5,444,734; 5,561,685; 5,648,981 e por patentes estrangeiras.

Systems **Spray**-Cooled Equipment Company, 311 Plus Park Boulevard, Suite 280, Nashville, Tennessee 37217, (615) 366-7772, website: <http://www.thesystemsgroup.biz>

REFERÊNCIAS:



KONUS ICESA S.A.
SOLUCÕES TÉRMICAS E SIDERÚRGICAS



Avallone, E. A., and Theodore Baumeister III: *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 10th edition, McGraw-Hill Book Company 1996, page 5 – 9, figure 5.1.17.

Lehr, D. A.: *Features of UCAR. Spray Cooling That Prolong BOF Hood Life*, UCAR Carbon Company, Inc.

Holman, J. P.: *Transferência de calor*, 5th edition, McGraw-Hill Book Company 1981.