

Машинобудування і зварювальне виробництво

the magnetic field induction and surface magnetization increase sharply. At the same time, the stop holding the other end of the magnetic circuit is removed by the current, and the magnetic circuit is attracted to the workpiece, the contact point and the maximum magnetic field induction moves along the surface being processed. After processing one section, the part is rotated by the width of the magnetic circuit, and the next section of the entire surface is processed.

The electromagnetic nature of fretting corrosion has been established and a new method for electromagnetic treatment of a support roll and journal sleeve, based on quantum processes of atomic interaction, has been developed, in which the contacting surfaces are magnetized in the opposite direction. magnetic field lines, which creates a repulsive magnetic pressure, which, during the rolling process under the influence of high specific pressures, a decrease in the area of the processed surface and a magnetic circuit located at an acute angle, concentrates the magnetic energy, strengthens the field and prevents fretting corrosion, which reduces labor intensity and metal cost.

Keywords: *fretting corrosion of the support roll and journal bushing, electromagnetic nature, magnetic energy, contacting surfaces are magnetized in the opposite direction. creates a repulsive magnetic pressure, electromagnetic nature of fretting corrosion, magnetic core located at an acute angle, concentrates the magnetic energy.*

Стаття надійшла 15.03.2026р.

Стаття прийнята 19.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990312026359306

Аришин О.В., Макаров О.В., Михайлів Ю.В., Трофуненко І.С.

ПРИРОДА УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТА ХОЛОДНИХ ТРІЩИН ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

На основі рентгеноструктурного аналізу, що проводився на дифрактометрі ДРОН-3 встановлено, що при електродуговому наплавленні, під дією дуги та термодіформацийного циклу, в наплавленому металі порушується рівновага, виникають мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і утворюються зварювальні напруги. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги. Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур $T_l - T_c$, ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої $T_{FeS} = 1150^{\circ}C$. Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ТІК, в якому значно знижується межа міцності. Для запобігання утворення гарячих тріщин і підвищення тріщиностійкості високовуглецевих сталей, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS і високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, що знижує зварювальні напруги і подрібнює мікроструктуру, внаслідок зростання швидкості кристалізації. При наплавленні високовуглецевих сталей, для запобігання утворення холодних і гарячих тріщин рекомендується спочатку проводити

Машинобудування і зварювальне виробництво

попередній і супутній підігрів до 250 – 300⁰ С і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений зменшує вміст вуглецю, зварювальні напруги, запобігає тріщинам, і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від більшого до меншого, елементи рухаються з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією, що призводить до мимовільного вирівнювання концентрацій, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується, і тріщиностійкість підвищується. Рекомендовано наплавлення перших двох проходів буферного шару високовуглецевих сталей проводити низьковуглецевим дротом, що забезпечує зменшення вуглецю, за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення СО. Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендовано замість дроту Зв08А проводити наплавлення кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни, запобігають утворення пір СО і підвищують зносостійкість. Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин, зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість. Розроблено процес наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS, запобігання утворення гарячих, холодних тріщин і пір, зниження енергії, мікростворення кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

Ключові слова: гарячі та холодні тріщини, температурний інтервал крихкості, робочі валки прокатних станів сірка, високошвидкісне наплавлення на низькій енергії, буферний шар, наплавлення низьковуглецевим дротом, пори, зварювальні напруги, кремнемарганцевий дріт Зв08Г2С, тріщиностійкість, та зносостійкість.

Постановка проблеми. Робочі валки прокатних станів, що експлуатуються в умовах високих тисків і змінюючихся температур, виготовляються зі, схильної до утворення гарячих і холодних тріщин, високовуглецевої сталі 90ХФ. Тому, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості високовуглецевих сталей є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При наплавленні високовуглецевих сталей утворення гарячих і холодних тріщин залежить від хімічного складу буферного шару наплавленого металу. Механізм утворення і запобігання гарячих тріщин не встановлено [1]. Однак, Н. М. Прохоров відмічає, що при значному зменшенні погонної енергії тріщиностійкість зростає. Вплив хімічного складу буферного шару наплавленого металу та енергії на структуру, тріщиностійкість та зносостійкість досліджено недостатньо [1–7].

Мета досліджень. Встановлення механізму утворення гарячих тріщин і розробка процесу високошвидкісного наплавлення на низькій енергії, що забезпечує підвищення тріщиностійкості та зносостійкості робочих валків прокатних станів.

Основний матеріал дослідження. При електродуговому наплавленні високовуглецевих сталей, під дією дуги та термодформаційного циклу, порушується рівновага і виникають

Машинобудування і зварювальне виробництво

мікронапруги[2]. Мікронапруги $\sigma = E \frac{\Delta a}{a}$, МПа в наплавленому металі, визначаються мікроспотвореннями кристалічної решітки $\frac{\Delta a}{a}$.

Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги і температурний інтервал крихкості (рис.1), що забезпечується при зростанні швидкості наплавлення і зниженні енергії при високошвидкісному наплавленні.

Для регулювання якості наплавленого металу проведені дослідження впливу погонної енергії на структурні та фазові перетворення, шляхом виміру мікроспотворень кристалічної решітки і щільності дислокацій наплавленого металу. Дослідження величини мікроспотворень кристалічної решітки проводили методом рентгеноструктурного аналізу на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.

В результаті встановлено, що при наплавленні на низькій погонній енергії мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги та щільність дислокацій знижуються[3]. Підвищення енергії призводить до зростання мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин.

Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити зменшення термодформаційного циклу і мінімальні зварювальні напруги, які знижуються при підвищенні швидкості зварювання і зменшенні погонної енергії[4].

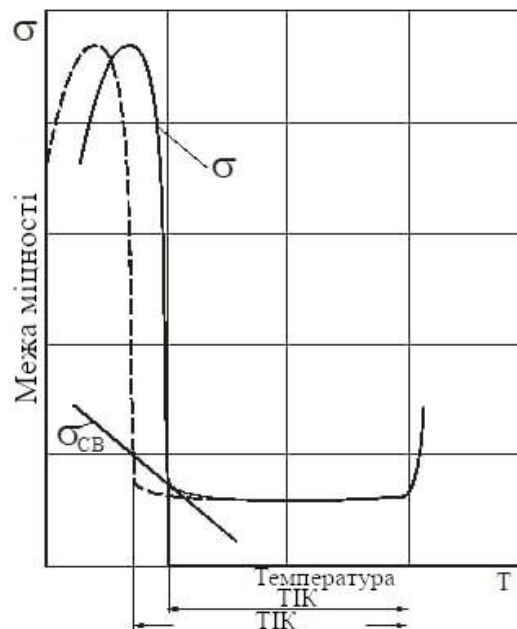


Рисунок 1 – Температурний інтервал крихкості

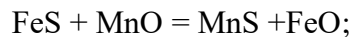
На основі проведеного рентгеноструктурного аналізу, для попередження утворення тріщин при наплавленні високовуглецевих сталей, спочатку проводять попередній та супутній підігрів до температури 250 – 300°C і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, зменшує вміст вуглецю і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від

Машинобудування і зварювальне виробництво

більшого до меншого, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується і тріщиностійкість підвищується.

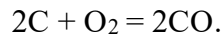
Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур $T_l - T_c$ „ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої $T_{FeS}=1150^0$ C[5]. Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ПК (рис.1).

Ефективним способом запобігання виникнення гарячих тріщин є зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS;



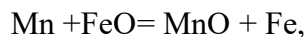
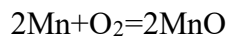
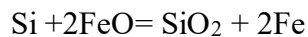
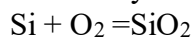
Тому, для запобігання утворення гарячих тріщин, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С.

Валки листопрокатних станів виготовляються з високовуглецевої сталі, тому, при наплавленні перших двох проходів, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення CO:



При високошвидкісному наплавленні зростає швидкість кристалізації і газу, що не встигли виділитися, призводять до утворення пір.

Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендується замість дроту Зв08А використовувати кремнемарганцевий дріт Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни:



запобігають утворення пір CO і підвищують зносостійкість.

Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість[6].

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів, з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, запобігання утворення гарячих і холодних тріщин, зниження енергії, зростання швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

Встановленні закономірності і розроблений спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій енергії буферних шарів робочих валків кремнемарганцевим дротом можуть бути використані при високошвидкісному наплавленні опорних валків.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси високошвидкісного наплавлення на низькій енергії буферних шарів високовуглецевих сталей низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом, який забезпечує підвищення тріщиностійкості та зносостійкості.

ВИСНОВКИ

На основі рентгеноструктурного аналізу, що проводився на дифрактометрі ДРОН-3, встановлено, що при електродуговому наплавленні, під дією дуги та термодформаційного циклу, в наплавленому металі порушується рівновага, виникають мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і утворюються зварювальні напруги. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги.

Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур $T_L - T_C$, ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої $T_{FeS}=1150^0$ С. Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ПІК, в якому значно знижується межа міцності. Для запобігання утворення гарячих тріщин і підвищення тріщиностійкості високовуглецевих сталей, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS і високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, що знижує зварювальні напруги і подрібнює мікроструктуру, внаслідок зростання швидкості кристалізації.

При наплавленні високовуглецевих сталей, для запобігання утворення холодних і гарячих тріщин, рекомендується спочатку проводити попередній і супутній підігрів до $250 - 300^0$ С і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений зменшує вміст вуглецю, зварювальні напруги, запобігає тріщинам, і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від більшого до меншого, елементи рухаються з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією, що призводить до мимовільного вирівнювання концентрацій, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується і тріщиностійкість підвищується.

Рекомендовано наплавлення перших двох проходів буферного шару високовуглецевих сталей проводити низьковуглецевим дротом, що забезпечує зменшення вуглецю, за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення СО. Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендовано, замість дроту Зв08А, проводити наплавлення кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни, запобігають утворення пір СО і підвищують зносостійкість.

Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин, зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS, запобігання утворення гарячих, холодних тріщин і пір, зниження енергії, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, зростання швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури,

Машинобудування і зварювальне виробництво

зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

Список використаних джерел

1. Прохоров Н.М. Фізичні процеси у металі при зварюванні /Н.Н.Прохоров. - Т.ІІ. - К.: Металургія, 2006. - 600 с
2. Порівняльне визначення щільності дислокацій у напівкристалах за шириною рентгенівських ліній та електронномікроскопічно / О.М.Іванов, Ю.О. Меженний, А.Є. Острів та інших. // Заводська лабораторія. - 1997. - №2. - С.43 - 48.
3. Фінкель В.М. Фізика руйнування/В.М. Фінкель. - К.: Металургія, 1970. - 376с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - К.: Світ, 2002. - 306с.
5. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітними дротиками /В.К. Каленський, Я.П. Черняк, В.Г. Васильєв, Т.Г. Соломійчук // Автоматичне зварювання. - 2001. - №11. – С. 11–14.
6. Технологія, матеріали, обладнання/І.А. Рябцев, І.А. Кондратьєв, Є.Ф.Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Київ, ІЕЗ ім. О.О. Патона НАНУ, 2015. – 402 с.
7. Рябцев І.А. Наплавлення деталей машин та механізмів. - Київ: Екотехнологія, 2004. - 160 с.

Aryshyn O.V., Makarov O.V., Mykhailiv Y.V., Trofunenko I.S.

NATURE OF HOT AND COLD CRACKING IN HIGH-SPEED WITH HIGH-SPEED WELDING AND SURFACING

Based on X-ray structural analysis using a DRON-3 diffractometer, it was established that during electric arc surfacing, under the action of the arc and the thermal deformation cycle, the equilibrium in the deposited metal is disturbed, micro-distortions of the crystal lattice, micro-stresses, dislocation density arise, and welding stresses are formed. Micro-cracks lead to intense crack growth and crack growth. The nature of crack formation is electromagnetic. Hot and cold cracks form, when welding stresses exceed the tensile strength, so to improve crack resistance, it is necessary to ensure minimal welding stresses.

Crystallization or hot cracks are formed in the temperature range $T_l - T_c$, liquidus – solidus, close to the solidus line, due to the formation of a low-melting eutectic FeS, the melting temperature of which is $T_{FeS} = 11500$ C. Hot cracks are formed in the brittleness temperature range T_{IH} , in which the ultimate strength is significantly reduced. To prevent the formation of hot cracks and increase the crack resistance of high-carbon steels, it is recommended to weld a buffer layer with low-carbon silicon-manganese welding wire Zv08G2S, which reduces the temperature brittleness range by reducing the sulfur content by binding sulfur into the MnS compound and high-speed surfacing at low heat input, which reduces welding stresses and refines the microstructure due to an increase in the crystallization rate.

When surfacing high-carbon steels, to prevent the formation of cold and hot cracks, it is recommended to first carry out preliminary and subsequent heating to 250 - 3000 C and surfacing of a buffer layer with low-carbon wire, which, due to the diffusion of carbon from the base metal into the weld reduces carbon content, welding stresses, prevents crack formation, and increases crack resistance. In nature, everything moves randomly from greater to lesser; elements move from areas

Машинобудування і зварювальне виробництво

of high concentration to areas of low concentration, which leads to a random equalization of concentrations. Therefore, the carbon content in the deposited metal decreases and crack resistance increases.

It is recommended surfacing the first two passes of the buffer layer on high-carbon steels to carry out with low-carbon wire, which ensures a reduction in carbon due to the diffusion of carbon from the base metal into the weld metal, pores form in the weld metal due to the release of CO. To prevent the formation of pores when surfacing the first two passes of the buffer layer, it is recommended to use Zv08G2S silicon-manganese wire instead of Sv08A wire, which, due to the increased content of silicon and manganese, which have a high affinity for oxygen, ensures the deoxidation of the weld pool liquid metal, prevent CO pores the formation and increase wear resistance.

High-speed surfacing prevents the hot and cold cracks formation, reduces linear energy, the brittleness temperature range, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, increases the surfacing and crystallization speed, grinds microstructure, reduces interatomic distances, increases interatomic bonds, crack resistance and wear resistance

A process has been developed for high-speed, low-energy surfacing of working rolls of rolling mills with heating and surfacing of a buffer layer using low-carbon silicon-manganese welding wire Sv08G2S, which ensures a reduction in the temperature range of brittleness due to a reduction in the sulfur content by binding sulfur into the MnS compound, preventing the formation of hot and cold cracks and pores, reducing energy, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, surfacing and crystallization speed, refining the microstructure, reducing interatomic distances, increased interatomic bonds, crack resistance and wear resistance.

Keywords: *rolling mill rollers, hot and cold cracks, the brittleness temperature range, sulfur, high-speed surfacing low energy, the buffer layer, surfacing with low-carbon, pores, welding stresses, silicon-manganese welding wire Zv08G2S, crack resistance, wear resistance.*

Стаття надійшла 16.03.2026р.

Стаття прийнята 21.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990312026359310

Ніколаєв Р.В., Мінін Д.І., Плешаков А.О.

ВПЛИВ ФОРМИ ВИРОБУ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

При зварюванні та наплавленні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, індукція магнітного поля підвищується, внаслідок концентрації силових ліній у замкненій трубі, що володіє великою магнітною проникністю. Струм тече шляхом найменшого опору, силові лінії магнітного поля – шляхом найменшого магнітного опору. Адекватність методики вимірювання магнітного поля реальним умовам підтверджена при вимірюванні індукції поля струму, що тече виробом, у виробничих умовах при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб діаметром 0,426 м, з товщиною стінки 0,008 м.