

- 1984, no. 7, vol. 16, pp. 441-445.
5. Blakeley P.J., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding. *Welding Journal*, 1984, no. 1, pp. 42-49.
 6. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 2. Effects and solutions. *Metal Construction*, 1984, no. 8, vol. 16, pp. 496-500.
 7. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briskman A.N., Shelenkov G.M. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Welding with electromagnetic stirring]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983. 127 p. (Rus.)
 8. Rizhov R.M., Kuznetsov V.D. *Magnitne keruvannia iakistiu zvarnikh z 'ednan'* [Magnetic quality control of welded joints]. Kiev, Ekotehnologiya Publ., 2010. 288 p. (Ukr.)
 9. Chernysh V.P., Ryzhov R.N. Zavisimost' parametrov upravliaiushchego magnitnogo vozdeistviia ot energovlozheniia vstyk pri dugovoi svarke [Dependence of the parameters of the controlling magnetic effect on the butt-in energy input during arc welding]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 1998, no. 5, pp. 49-51. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Статья надійшла 15.08.2019

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201055

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Коваль О.В.³

ПІДВИШЕННЯ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ВАЛКІВ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ І ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ

Встановлено закономірності впливу товщини наплавленого металу і погонної енергії на зварювальні напруги і тріщиностійкість валків. Зі зростанням товщини наплавленого металу та погонної енергії зварювальні напруги підвищуються, що приводить до утворення холодних тріщин і відшаровування наплавленого металу. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує зниження зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, попередження утворення тріщин, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Ключові слова: зварювальні напруги, погонна енергія, товщина наплавленого металу, горячи та холодні тріщини, відшаровування наплавленого металу, тріщиностійкість, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.

Щетинин С.В., Щетинина В.И., Коваль А.В. Повышение трещиностойкости валков путем снижения сварочных напряжений и погонной энергии. Установлены закономерности влияния толщины наплавленного металла и погонной энергии на сварочные напряжения и трещиностойкость валков. С ростом толщины наплавленного металла и погонной энергии сварочные напряжения повышаются, что приводит к образованию холодных трещин и отслаиванию наплавленного металла. Разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение сварочных напряжений, измельчение микроструктуры, предупреждение образования трещин, повышение трещиностойкости и износостойкости валков.

Ключевые слова: сварочные напряжения, погонная энергия, толщина наплавленного металла, горячие и холодные трещины, отслоение наплавленного металла.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, O.V. Koval. Rolls crack resistance increase by reducing welding stresses and heat input. The rolling mills working and backup rolls operate under high specific pressures, abrasion and corrosion wear, thermal cycling conditions and they are produced of high carbon steel, prone to hot and cold cracks formation. Therefore, crack resistance and wear resistance increase is an important scientific-technical problem. It has been established that the deposited metal crack resistance is largely determined by welding stresses, which are formed as a result of heat input and thermal deformation cycle, imbalance, at which the energy is zero, and energy increase. According to the superposition law in multilayer electric arc welding, welding stresses are summed up during surfacing of each metal layer, which leads to welding stresses increase and deposited metal scaling. The welding stresses and heat input influence on the deposited metal crack resistance has been established. With increasing the deposited metal thickness, the deformations and welding stresses increase, which leads to cracks formation and weld metal scalings. It has been established by calculation and experiment that the optimum the deposited metal thickness per the rolls radius is 25 mm. With increasing the weld metal thickness up to 40 mm, welding stresses sharply increase, under the action of which cold cracks form and the deposited metal scaling. The welding stresses main role in crack formation has been confirmed. Minimum energy result in maximum quality, weld metal crack resistance and wear resistance. The high-speed surfacing at low heat input process, which provides welding stresses reduction, fine-grained microstructure, the absence of deposited metal scalings, and the rolls crack and wear resistance increase, has been developed.

Keywords: *welding stresses, heat input, deposited metal thickness, cold and hot cracks, deposited metal scaling, crack resistance, high-speed surfacing at low heat input.*

Постановка проблеми. Робочі та опорні валки прокатних станів експлуатуються в умовах високих питомих тисків, абразивного і корозійного зносу, термоцилювання і виготовляються з високовуглецевої сталі, схильної до утворення гарячих і холодних тріщин. Тому підвищення тріщиностійкості та зносостійкості є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Природа утворення холодних і гарячих тріщин різна. Утворення гарячих тріщин пояснюють випадінням легкоплавкої евтектики FeS з температурою плавлення 1150°C в температурному інтервалі крихкості, при температурі ближче Т-солідус, коли зварювальні напруги стають більше межі міцності. На природу утворення холодних тріщин існує завалочна теорія, яка пояснює тріщини виникненням мартенситу, що характеризується великою твердістю, низькою пластичністю і великим об'ємом, що призводить до підвищення зварювальних напруг. Згідно водневої теорії водень з металу шва з більшою концентрацією водню дифундує в зону сплавлення з меншою концентрацією водню. В мартенситі рухливість водню зменшується, він переходить з атомарного до молекулярного стану, тиск і зварювальні напруги зростають, що призводить до утворення холодних тріщин. Дані впливу швидкості зварювання на тріщиностійкість наплавленого металу суперечливі [1]. Закономірності впливу товщини наплавленого металу і погонної енергії на деформацію, зварювальні напруги та тріщиностійкість досліджено недостатньо [1-9].

Мета статті – вивчення механізму підвищення тріщиностійкості наплавленого металу шляхом зниження зварювальних напруг і розробка процесу високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії робочих і опорних валків.

Виклад основного матеріалу. Метал перед наплавленням знаходиться в рівновазі, при якій енергія дорівнює нулю. При електродуговому наплавленні енергія дуги передається основному металу. Під дією тепловкладення і термодформаційного циклу рівновага порушується і енергія зростає, з'являються зварювальні напруги, які призводять до утворення тріщин. Тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги, які визначаються деформаціями.

Згідно закону мінімуму енергії в природі всі процеси самоцільно протікають в напрямку від більшої до меншої енергії. Струм тече від більшого до меншого потенціалу, газ тече від більшого до меншого тиску, елементи дифундують від більшої до меншої концентрації, тепло розповсюджується від більшої до меншої температури. При утворенні тріщини енергія зменшується, що підтверджує закон мінімуму енергії.

Ефективним способом зменшення зварювальних напруг і підвищення тріщиностійкості є зниження погонної енергії та тепловкладення шляхом підвищення швидкості наплавлення і зменшення товщини наплавленого металу, вплив якої на зварювальні напруги досліджено недостатньо.

Дослідження впливу товщини наплавленого металу і погонної енергії на деформації та зварювальні напруги проводили при напавленні на пластини розміром $(30 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$ м порошковим дротом ПД-Нп-25Х5ФМС діаметром 3,6 мм під флюсом АН26П з погонною енергією 1,9 МДж/м і 1,1 МДж/м, яку зменшували за рахунок підвищення швидкості наплавлення. Електродугове наплавлення з погонною енергією 1,9 МДж/м проводили в режимі: величина струму – $I = 600-650$ А, напруга на дузі – $U = 32-34$ В, швидкість наплавлення – $V = 36$ м/г. Наплавлення з погонною енергією 1,1 МДж/м проводили в режимі: величина струму – $I = 800-850$ А, напруга на дузі – $U = 30-32$ В, швидкість наплавлення – $V = 75$ м/г. В якості джерела живлення використовували випрямляч ВДУ1604. Після наплавлення вимірювали деформацію пластин, по яким розраховували зварювальні напруги [5]. Як встановлено (рис.), при підвищенні товщини наплавленого металу і погонної енергії зварювальні напруги зростають, що призводить до утворення гарячих і холодних тріщин.

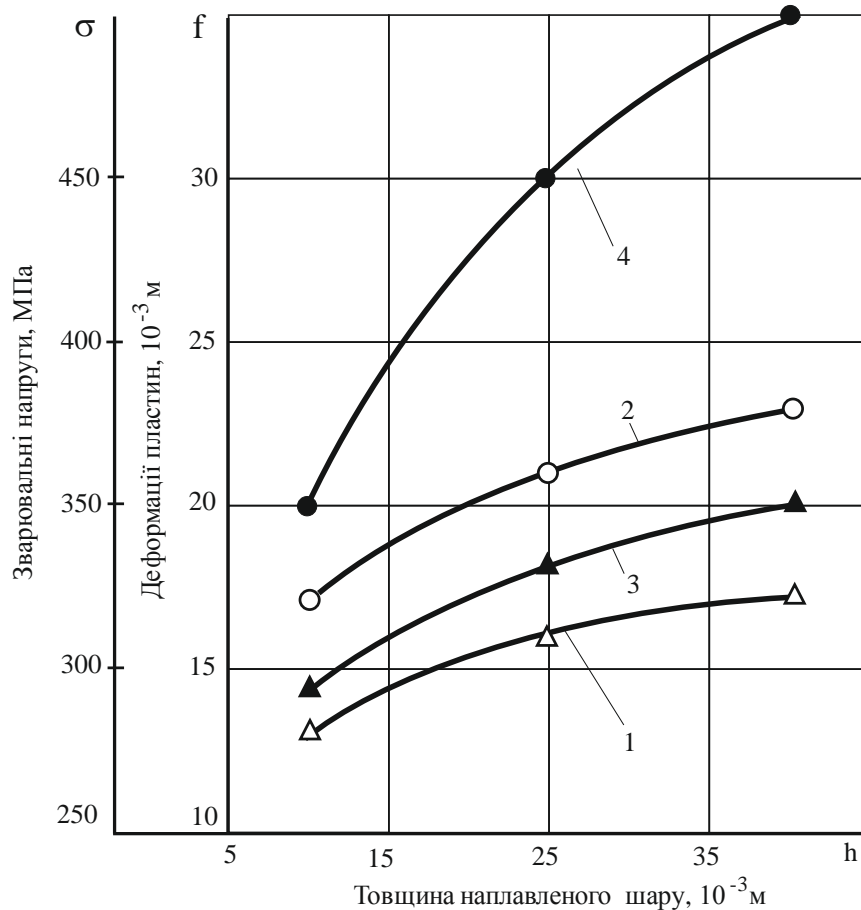


Рисунок – Закономірність впливу товщини наплавленого металу і погонної енергії на деформації (1, 2) і зварювальні напруги (3, 4): 1, 3 – $\frac{q_{ли}}{V} = 1,1$ МДж/м; 2, 4 – $\frac{q_{ли}}{V} = 1,9$ МДж/м

Залежність зварювальних напруг від погонної енергії пропорційна [5]:

$$\sigma \geq \mu E \frac{q_{ли}}{VF}, \text{ Па}, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, для вуглецевої сталі $\mu = 0,335\alpha/c\gamma$; E – модуль пружності, для вуглецевої сталі $E = (2,0 - 2,1) \cdot 10^5$ МПа; $\frac{Q_{и}}{V}$ – погонна енергія, МДж; F – поперечний переріз пластини, м².

Деформація пластин залежить від зварювальних напруг:

$$f = 0,613l \sqrt{\frac{\sigma - \sigma_{кр}}{E}}, \text{ м}, \quad (2)$$

де l – довжина пластин, м; $\sigma_{кр}$ – критичне значення зварювальних напруг, Па.

Критичне значення зварювальних напруг:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2, \text{ Па}. \quad (3)$$

При нарузі більше критичної відбувається деформація пластини.

З наведених виразів випливає, що зварювальні напруги пропорційні деформації:

$$\sigma = \frac{f^2 E}{0,613^2 l^2} + \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2, \text{ МПа}. \quad (4)$$

При багат шаровому наплавленні згідно принципу суперпозиції деформації та зварювальні напруги після наплавлення кожного шару підсумовуються, тому з ростом товщини наплавленого металу деформації та зварювальні напруги підвищуються (рис.), що призводить до утворення тріщин і відшаровування наплавленого металу.

Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більші за межу міцності, тому необхідно забезпечувати зниження зварювальних напруг за рахунок зменшення товщини наплавленого металу. Розрахунково-експериментальні дані підтверджено у виробничих умовах наплавлення і експлуатації робочих валків стану 1700. Як встановлено, при наплавленні на радіус 25 мм холодні тріщини не утворюються, робочий валок експлуатується без відшаровування наплавленого металу. При наплавленні на радіус 40 мм в робочому валку утворились холодні тріщини і наплавлений метал відшарувався по зоні сплавлення з основним металом валка.

На основі встановлених закономірностей розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує зниження тепловкладення, зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, попередження утворення гарячих і холодних тріщин, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Встановленні закономірності впливу товщини наплавленого металу та погонної енергії на зварювальні напруги та розроблений процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії можуть бути використані при наплавленні робочих та опорних валків.

Подальше дослідження в даному напрямку є перспективним, так як дозволяє розробити нові процеси, що забезпечують підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Висновки

1. Тріщиностійкість наплавленого металу в значній мірі визначається зварювальними напругами, які виникають під дією тепловкладення і термодформаційного циклу внаслідок порушення рівноваги, при якій енергія дорівнює нулю, і підвищення енергії.

2. Згідно закону суперпозиції при багат шаровому електродуговому наплавленні зварювальні напруги підсумовуються при наплавленні кожного шару металу, що призводить до підвищення зварювальних напруг і відшаровування наплавленого металу.

3. Встановлено вплив зварювальних напруг та погонної енергії на тріщиностійкість наплавленого металу. При підвищенні товщини наплавленого шару деформація і зварювальні напруги зростають, що призводить до утворення тріщин і відшаровування наплавленого металу.

4. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що оптимальний шар наплавленого металу на радіус валків становить 25 мм. При підвищенні товщини наплавленого шару до 40 мм енергія зростає, під дією зварювальних напруг утворюються холодні тріщини і відшарується наплавлений метал.

5. Підтверджено головну роль зварювальних напруг в утворенні тріщин. Мінімум енергії – максимум якості, тріщиностійкості та зносостійкості наплавленого металу.

6. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який

забезпечує зниження зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, відсутність відшаровування наплавленого металу, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Перелік використаних джерел:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке : в 2 т. Т. 2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения / Н.Н. Прохоров. – М. : Metallurgy, 1976. – 600 с.
2. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 228 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М. : Metallurgy, 1970. – 376 с.
4. Николаев Г.А. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
5. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
6. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – Киев : Экотехнология, 2004. – 160 с.
7. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – М. : Metallurgy, 1961. – 250 с.
8. Влияние погонной энергии на образование отколов при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками / В.К. Каленский, Я.П. Черняк, В.Г. Васильев, Т.Г. Соломийчук // Автоматическая сварка. – 2001. – № 11. – С. 11-14.
9. Суслова Е.А. Влияние технологических факторов на склонность к образованию трещин / Е.А. Суслова, В.А. Игнатов, А.С. Зубченко // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 35-36.

References:

1. Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessy v metalle pri svarke. Tom 2: Vnutrennie napriazheniia, deformatsii i fazovye prevrashcheniia* [Physical processes in the metal during welding. Vol. 2: Internal stresses, deformations and phase transformations]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H., Belov V.V. *Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv stali pri svarke* [Phase transformations and changes in properties of the steel during welding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 228 p. (Rus.)
3. Finkel V.M. *Fizika razrusheniia* [Destruction Physics]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 376 p. (Rus.)
4. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokourov V.A. *Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruksii* [Strength of welded joints and structural deformations]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1982. 272 p. (Rus.)
5. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. *Teoriia svarochnykh deformatsii i napriazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (Rus.)
6. Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev, Ecotechnology Publ., 2004. 160 p. (Rus.)
7. Frumin I.I. *Avtomaticheskaia elektrodugovaia naplavka* [Automatic electric arc surfacing]. Moscow, Metallurgy Publ., 1961. 250 p. (Rus.)
8. Kalensky V.K., Chernyak J.P., Vasilyev V.G., Solomiychuk T.G. Vliianie pogonnoi energii na obrazovanie otkolov pri naplavke vysokouglerodistoi stali austenitnymi provolokami [Effect of heat input on the formation of splits in high steel deposition austenitic wires]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2001, no. 11, pp. 11-14. (Rus.)
9. Suslova E.A., Ignatov V.A., Zubchenko A.S. Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na sklonnost' k obrazovaniiu treshchin [Influence of technological factors on the crack susceptibility]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1990, no. 5, pp. 35-36. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугин
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.09.2019