

А.А. Троянский /д.т.н./, В.И. Занка /к.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

А.Д. Рябцев /д.т.н./

ПАО «Русполимет» (Кулебаки, Россия)

ПРОТИВОФЛОКЕННАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Рассмотрены вопросы организации оптимальных режимов термообработки заготовок электрошлакового переплава (ЭШП) в условиях машиностроительного предприятия для предотвращения дефектов, вызванных присутствием водорода в металле. Показано, что изменением в сторону увеличения скорости нагрева и охлаждения в процессе термообработки можно существенно, до 2,5 раза, уменьшать содержание водорода в литом электрошлаковом металле и сокращать энергетические затраты.

Ключевые слова: отливки ЭШП, водород, флокены, термообработка, растворимость водорода, напряжения.

Постановка проблемы

Известно, что водород, присутствующий в стали в качестве вредной примеси, негативно влияет на ее эксплуатационные свойства и вызывает образование специфических дефектов [1]. Находясь в жидком расплаве в виде ионов, водород в процессе кристаллизации металла переходит в атомарное состояние [2,3], растворяется в железе и его сплавах, взаимодействует с дефектами кристаллической решетки [4,5] и приводит к необратимым разрушениям металла – флокенам. Кроме того, наличие водорода в сталях способствует образованию пористости, снижению уровня механических свойств в металле и, как следствие, ресурса долговечности и работоспособности металлических изделий. Водород приводит металлы и сплавы в неравновесное состояние [6,7], и возникает термодинамическая необходимость фазовых и структурных превращений, обеспечивающих их движение к термодинамическому равновесному состоянию. Вредное воздействие водорода на свойства стали, в частности явление водородного охрупчивания, тем сильнее, чем прочнее сталь. Особенно этим страдают хромоникелевые конструкционные стали [8,9].

Источниками поступления водорода в сталь являются шихтовые материалы, печная атмосфера и различные присадки в металлическую ванну. Но определяющими содержание водорода в жидком металле являются технологические особенности плавки [10].

В практике современного массового производства стали на металлургических предприятиях удается в значительной мере снять проблему водорода за счет исключения из техноло-

гических циклов восстановительных операций и использования внепечной, особенно вакуумной, обработки металла. В то же время на машиностроительных предприятиях, обладающих собственной металлургической базой, сделать это крайне сложно. Используемое в их парке металлургическое оборудование – электродуговые, индукционные и электрошлаковые печи, является агрегатами открытого типа, работающими по классической технологии. В этих условиях практически единственным способом борьбы с водородом в металле является специальный вид термической обработки – отжиг [11,12].

Анализ последних исследований и публикаций

Как показали исследования, в ряде случаев отжиг малоэффективен и не всегда обеспечивает отсутствие флокенов в металле [12,13], и связано это со следующим:

- повышение температуры отжига увеличивает растворимость водорода в металле и снижает степень его десорбции из отливок;
- отжиг снижает общий уровень внутренних напряжений в металле как одного из основных факторов флокенообразования, но практически не способствует перераспределению водорода по сечению отливок;
- отжиг является довольно энергетически затратной технологической операцией.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка альтернативного классическому отжигу варианта противоблокенной термической обработки

электрометаллургических отливок из стали 40ХН, обеспечивающего снижение содержания водорода и гарантированное качество металла.

Основной материал исследования

Сталь марки 40ХН электродуговой и электрошлаковой выплавки используют в машиностроительной практике для изготовления специальной оснастки и деталей, работающих в условиях высоких вибрационных и динамических нагрузок.

Разрабатывая новый режим противоблоксной термической обработки, исходили из следующих положений:

- полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение способствует выделению водорода из металла;

- нагрев отливки должен производиться с такой скоростью, чтобы обеспечить ощутимый по времени перегрев поверхности заготовки относительно ее сердцевины. В этих условиях растворимость водорода в перегретых слоях увеличивается, из-за чего он будет диффундировать из объема заготовки к ее поверхности;

- согласно термокинетическим диаграммам распада переохлажденного аустенита [14] полное превращение его в перлит, необходимое для снижения вероятности образования флокенов, должно произойти за время, соответствующее выбранным скоростям охлаждения.

Экспериментальные исследования проводили в условиях машиностроительного завода. Производство заготовок из стали 40ХН на предприятии организовано по следующим технологическим операциям, регламентированным заводскими инструкциями.

Исходную сталь марки 40ХН выплавляли в индукционных печах ИСТ-0,4 и разливали в расходные электроды, которые электрошлаковым способом переплавляли на установке ЭШП-4П в

медный водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 245 мм. Слитки ЭШП после противоблоксной термообработки подвергали пластической деформации – проковке и последующей прокатке. Из полученных таким образом заготовок изготавливали валы для сельскохозяйственных машин.

Ряд слитков ЭШП были изъяты из технологического процесса для исследования режимов противоблоксной термообработки. От них отбирали заготовки длиной 200 мм, удаляя головные и донные части на анодно-механическом станке. Эти заготовки после каждого этапа термообработки охлаждали и из них на глубине 15 и 120 мм от поверхности отбирали пробы для последующего определения в них содержания водорода на приборе ЕА-1 фирмы «Бальцерс». Отбор проб осуществляли полым сверлом из быстрорежущей стали Р18 [15] на вертикально-фрезерном станке при предельно допустимых минимальных скоростях вращения, обильно охлаждая эмульсией засверливаемые участки. Пробы помещали в термостат с твердой углекислотой.

Опытные заготовки нагревали в термопечах. Предварительно печи разогревали до выбранных температур и помещали в них заготовки, изменяя, таким образом, скорость их нагрева.

Охлаждение заготовок до заданных температур осуществляли сжатым воздухом в специально разработанном для этих целей устройстве камерного типа.

Температуру фиксировали хромель-алюмелевыми термопарами, внедренными на глубину 15 мм от поверхности и в центр заготовок.

В табл. 1 представлено содержание водорода в отливках ЭШП из стали 40ХН после традиционного отжига и после каждого из этапов предлагаемой термообработки.

Табл. 1. Изменение содержания водорода по сечению отливок стали ЭШП марки 40ХН диаметром 245 мм

№ п/п	Режимы термообработки отливок	Содержание водорода, Н ₂ %		Среднее содержание водорода Н ₂ , %
		Расстояние от поверхности, мм		
		15	120	
1	После ЭШП (эталонная заготовка)	0,00045	0,00060	0,00052
2	Отжиг 873К, 10 ч (существующий режим)	0,00030	0,00055	0,00042
3	Нагрев до 1133К со скоростью 7...11 К/мин	0,00037	0,00050	0,00043
4	Выдержка при 1133К, 2 ч	0,00035	0,00050	0,00042
5	Охлаждение от 1133 до 953К со скоростью 8...10 К/мин	0,00025	0,00038	0,00031
6	Выдержка при 953К, 2 ч	0,00020	0,00030	0,00025
7	Охлаждение от 953 до 573К со скоростью 8...10 К/мин	0,00010	0,00025	0,00017
8	Выдержка при 573К в течение 1,5 ч с последующим охлаждением на воздухе	0,00010	0,00025	0,00017

Как видно, предложенный режим противофлокеной термообработки, предусматривающий ускоренные нагрев и охлаждение отливок, позволяет существенно, в 2,5 раза, снизить содержание водорода в литом металле ЭШП и сократить длительность этой технологической операции. Примечательно, что при рассмотренных режимах нагрева и охлаждения водород в приповерхностном слое (глубиной 15 мм) не только не накапливается из-за перераспределения его между сердцевиной и поверхностью заготовок, а и значительно уменьшается.

Практика эксплуатации валов сельскохозяйственных машин, изготовленных из стали 40ХН ЭШП, заготовки которой термообработаны по исследованному режиму, показала существенное увеличение их рабочих характеристик и долговечности.

Новый режим противофлокеной термообработки внедрен в производство.

Выводы

Как показали выполненные исследования, варьированием скорости нагрева и охлаждения термообрабатываемых литых заготовок можно существенно влиять на диффузию и перераспределение водорода в металле и использовать это как инструмент борьбы с водородом.

Список литературы

1. Колачёв, Б.А. Водородная хрупкость металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
2. Aydin, U. Solution Enthalpy of Hydrogen in Fourth Row Elements: Systematic Trends Derived from First Principles / U. Aydin, L. Ismer, J. Neugebauer // Physical Review B. – 2012. – No.15. Vol.85. – P. 144-155.
3. Blachowski. A. Transition Metal Impurity Effect on Charge and Spin Density in Iron: Ab Initio Calculations and Comparison with Mössbauer Data / A. Blachowski, U.D. Wdowik // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2012. – No.2. Vol.73. – P. 317-323.
4. Сошко, В.А. Водородная хрупкость и водородная пластичность стали / В.А. Сошко,

И.П. Симинченко, В.С. Ляшко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2014. – №12. Т.36. – С. 170-171.

5. The effect of diffusion-mobile and combined hydrogen of hydrogen brittleness of steel / L.V. Shaskova et al. // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. – 2019. – No.8. – P. 59-66.
6. Гольцов, В.А. Фундаментальные основы водородной обработки материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №1. – С. 42-69.
7. Мирзаев, Д.А. Влияние легирования на термодинамические характеристики водорода в ОЦХ-железе / Д.А. Мирзаев, А.А. Мирзоев, М.С. Ракитин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – Челябинск, 2016. – С. 40-51.
8. Гарилюк, В.Г. Углерод, азот и водород в сталях. Пластичность и хрупкость // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2015. – №10. – С. 761-768.
9. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Пер. с англ. // Под ред. К.Л. Брайента, С.К. Бенерджи. – М.: Металлургия, 1988. – 552 с.
10. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 528 с.
11. Термическая обработка крупных поковок / Ю.А. Башнин и др. – М.: Металлургия, 1973. – 175 с.
12. Глебов, А.Г. Электрошлаковый переплав / А.Г. Глебов, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 2010. – 343 с.
13. Газетдинов, Р.Г. Физико-химические основы технологических процессов производства и обработки конструкционных материалов: Учебное пособие. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Металлургия, 1987. – 161 с.
14. Попов, А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – М.: Металлургия, 1965. – 495 с.
15. Шаповалов, В.И. Флокены и контроль водорода в стали / В.И. Шаповалов, В.В. Трофименко. – М.: Металлургия, 1987. – 161 с.

O.A. Troyanskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, V.I. Zaika /Cand. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

A.D. Ryabtsev /Dr. Sci. (Eng.)/

PJSC «Ruspolimet» (Kulebaki, Russia)

ANTI-FLAKE HEAT TREATMENT OF CAST BILLETS OF ELECTROSLAG REMELTING

Background. The problem of extra-aggregate removal of hydrogen from ingots and castings produced

at machine-building enterprises remains relevant due to the peculiarities of their metallurgical equipment base. In the ingots of most structural steels, after slow cooling, the formation of flakes is possible (irreversible defect in the metal). The maximum permissible ingots exposure time was set to reduce the risk of flakes formation during annealing, which reduces the level of internal stresses and the hydrogen content in the metal. However, the low efficiency of annealing is due to the difficulty of redistributing hydrogen in the cross-section of castings. The latter, combined with residual stresses cause the appearance of flakes. For this reason, the task of developing a method of heat treatment, which allows not only to reduce the total hydrogen content in the surface layers but also to activate its movement from the central zones to the surface with subsequent evacuation from the metal.

Materials and/or methods. We have investigated 40XH steel of electric-arc and electroslag smelting used for the production of specialised equipment working in the conditions of high vibration and dynamic loadings. 40XH steel smelted in an induction furnace and poured into consumable electrodes further remelted at the ESR installation into a crystalliser of 245 mm diameter. Shafts for agricultural machines made from the obtained billets after heat treatment. In the process of developing a new method of heat treatment, experimental billets heated in thermal furnaces and after exposure cooled in chamber-type installations. The total hydrogen content in ESR billets after various stages of heat treatment and its content at a distance of 15 and 120 mm from the surface were estimated.

Results. The variation rate of heating and cooling ESR billets allowed choosing the optimal heat treatment modes, which reduce the hydrogen content by 2.5 times compared with traditional annealing and reducing the time of treatment.

Conclusion. Shown that variation of the rate of heating and cooling of heat-treated castings can significantly affect the diffusion and redistribution of hydrogen in the metal and its use as a tool to combat hydrogen.

Keywords: ESR billets, hydrogen, flakes, heat treatment, hydrogen solubility, tension.

Сведения об авторах

А.А. Троянский

SPIN-код: 5708-7912
Телефон: +380 (71) 301-98-60
Эл. почта: taa@donntu.org

В.И. Заика

Телефон: +380 (71) 420-29-67
Эл. почта: v.i.zaika@list.ru

А.Д. Рябцев

Телефон: +380 (62) 301-08-17
Эл. почта: emkaf@tmt.donntu.org

Статья поступила 03.10.2019 г.

© А.А. Троянский, А.Д. Рябцев, В.И. Заика, 2019

Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

