

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СТАЛИ 34ХН1М

Власов А. Ф.

Изучена склонность металла коленчатого вала, получаемого способом ЭШЛ, к флокеобразованию и определены режимы термической обработки заготовок элементов коленчатого вала. Приведены данные влияния различных видов термической обработки на механические свойства литого электрошлакового металла. Показано, что предлагаемый новый способ получения электрошлакового металла, с применением разработанного «твердого» старта и экзотермического флюса экономичнее существующих способов получения литого электрошлакового металла. Экспериментально установлено, что усталостная прочность металла коленчатого вала газомотокомпрессора МК-8 из стали 34ХН1М, полученного методом электрошлакового литья, соответствуют значениям усталостной прочности сталей, используемых в машиностроении, для производства крупных деталей ответственного назначения из поковок сталей открытой выплавки.

Вивчено схильність металу колінчатого вала, одержуваного способом ЕШЛ, до флокеоутворенню й визначені режими термічної обробки заготовель елементів колінчатого вала. Наведено дані впливу різних видів термічної обробки на механічні властивості литого електрошлакового металу. Показано, що пропонуваній новий спосіб одержання електрошлакового металу із застосуванням розробленого «твердого» старту й екзотермічного флюсу економічніше існуючих способів одержання такого металу. Експериментально встановлено, що утомлена міцність металу колінчатого вала газомотокомпрессора МК-8 зі сталі 34ХН1М, отриманого методом електрошлакового лиття, відповідає значенням утомленої міцності сталей використовуваних у машинобудуванні для виробництва великих деталей відповідального призначення з куваних сталей відкритої виплавки .

Studied the tendency of metal crank shaft, obtainable by the method ESHL to flokenoobrazovanie and defined thermal treatment of blanks elements of the crankshaft. The data-the influence of the different kinds of heat treatment on the mechanical properties of of electroslag metal. It is shown that the proposed new method for producing of electroslag metal using the developed "solid" start and exothermic flux of the economical methods existing of producing of electroslags metal. Experimentally established that the fatigue strength of the metal crank shaft gasmotorcompressors МК-8 of steel 34HN1M obtained by of electroslag casting correspond to values of the fatigue strength of steel used in machinery for the production of large parts of responsible appointment of forged steel smelting open.

Власов А. Ф.

канд. техн. наук, доц. каф. ТиОСП ДГМА
sp@dgma.donetsk.ua

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 669. 187.56

Власов А. Ф.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СТАЛИ 34ХН1М

Качество готовых металлических изделий, их надежность и долговечность в эксплуатации определяются, прежде всего, качеством слитка, из которого эти изделия изготовлены, т. е. степенью его физической и химической однородности, содержания в нем вредных примесей.

Одной из наиболее ответственных деталей дизеля является коленчатый вал. Известно, что элементы коленчатого вала подвержены действию циклических напряжений изгиба и кручения от периодических сил давления газа, продольных и крутильных колебаний. Разрушение коленчатого вала вызвано усталостью металла и начинается от концентраторов напряжений, чаще всего галтелей сопряжения шеек со щеками [1]. Поэтому к качеству коленчатого вала предъявляют особые повышенные требования, главное из которых – безаварийная работа в течение всего срока эксплуатации дизеля.

Разработанная на предприятиях страны технология получения крупногабаритных заготовок методом ЭШЛ предусматривает «жидкий» старт, путем сифонной заливки, в кристаллизатор расплавленного в отдельной флюсоплавильной печи флюса. Однако, трудоемкость выплавки той или иной заготовки в печах ЭШП с использованием «жидкого» старта с учетом времени расплавления рабочего флюса во флюсоплавильных печах значительно выше «твердого» старта. В работах [2] и [3] приведены сведения о влиянии разработанных способах твердого старта по монофилярной и бифилярной схеме ведения процесса с использованием экзотермических флюсов, проводящих ток в твердом состоянии.

Целью данной работы является исследование влияния режимов различных видов термической обработки на физико-механические свойства электрошлаковой стали 34ХН1М, выплавленной на «твердом» старте с использованием экзотермических флюсов применительно к заготовкам коленчатых валов газомотокомпрессоров.

В данной работе исследовалось влияние экзотермического флюса, представляющего собой механическую металлофлюсовую смесь окалины, алюминиевого порошка, легирующих элементов (FeCr, Ni, Mo) и рабочего флюса (АНФ-6).

Качество металла шеек коленчатых валов в нетермообработанном и термообработанном состоянии определялось на образцах в продольном и поперечном направлении.

В задачи термической обработки входит обеспечение следующих механических свойств коленчатых валов из исследуемой стали: $\sigma_T = 490$ МПа; $\sigma_B = 686$ МПа; $\delta \geq 13\%$; $KCU = 57,6$ кДж/м²; $HB \geq 207$; $\psi \geq 45\%$.

Согласно чертежу на коленчатый вал минимальный размер максимального сечения в сечении шейки коленчатого вала составляет 350 мм, в сечении щеки – 160 мм. Согласно данным [4] требуемые показатели механических свойств заготовок с определяющими размерами 300–500 мм стали марки 34ХН1М открытой выплавки обеспечиваются после закалки с высоким отпуском. После нормализации с отпуском эти показатели ниже. По данным [5] предел прочности, твердость, прокаливаемость сталей электрошлакового переплава несколько ниже, чем сталей открытой выплавки. При этом следует учитывать повышенную флокочувствительность данной марки стали. Известно, что основными предпосылками образования флокенов в стали являются значительные напряжения и водород. Поэтому, в задачи термообработки входит также предупреждение развития значительного уровня и градиента остаточных напряжений и создание условий для выделения водорода из стали.

В настоящее время не накоплено достаточного количества данных по напряженному состоянию крупных деталей ответственного назначения, получаемых методом ЭШЛ. На металле заготовок полусекции коленчатого вала производился замер остаточных напряжений.

Для этой цели использовалась нижняя часть секции, на которую наклеивались тензодатчики 2ПКБ-100-10ГВ. Секция прошла термическую обработку по режиму: циклический отжиг при температуре 850 °С, нормализация при температуре 870 °С, отпуск 650 °С. Величина остаточных напряжений определялась по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu \cdot \varepsilon_2), \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \mu \cdot \varepsilon_1),$$

где E – модуль упругости (Юнга); μ – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – деформация, определяемая по тензодатчикам.

Величина остаточных напряжений по сечению щеки секции и шейки в зоне линии сплавления находилась в пределах 20–50 МПа, что позволяет сделать вывод о том, что остаточные напряжения в секциях коленчатого вала из стали 34ХН1М, прошедших термическую обработку, практически отсутствуют.

Составной частью всех известных режимов противоблоксной обработки является изотермическая выдержка при температуре выше точки M_n . Охлаждение шеек коленчатого вала до 750–850 °С после выплавки проводилось в кристаллизаторе и далее – на спокойном воздухе.

Результаты газового анализа металла шейки показали, что содержание водорода повышенное (3,52–3,71 см³ на 100 г металла) и согласно литературным источникам требуется проведение противоблоксной термообработки.

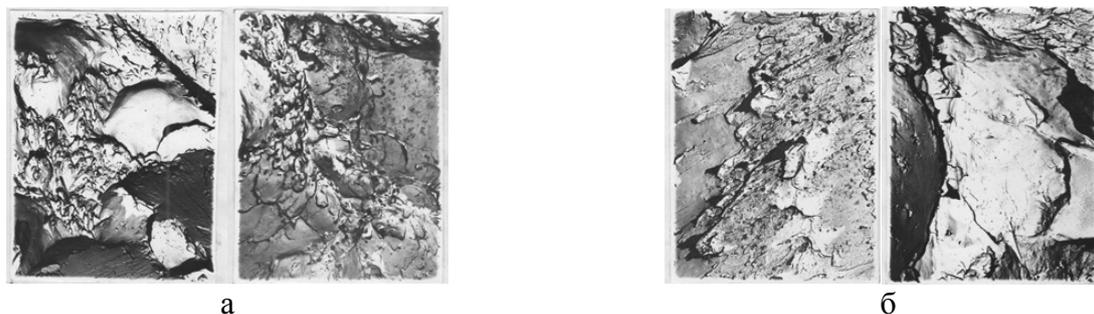
Механические свойства нетермообработанной литой электрошлаковой стали 34ХН1М определялись при динамических нагрузках на образцах, вырезанных из продольного темплета шейки (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний на ударный изгиб нетермообработанного металла шейки

Месторасположение и ориентация образцов	Ударная вязкость (минимальное и максимальное значение по 5-ти образцам, кДж/м ²)
Донная часть слитка, поверхностная зона, поперек первого порядка транскристаллитов	30–49
Донная часть слитка, зона ½ радиуса слитка, вдоль осей первого порядка транскристаллитов	61
Донная часть слитка, зона ½ радиуса слитка, поперек осей первого порядка транскристаллитов	49–61
Центральная часть слитка, поверхностная зона, вдоль осей первого порядка транскристаллитов	55
Центральная часть слитка, поверхностная зона, поперек осей первого порядка транскристаллитов	49–61
Центральная часть слитка, зона ½ радиуса слитка, вдоль осей первого порядка транскристаллитов	49–61
Центральная часть слитка, зона ½ радиуса слитка, поперек осей первого порядка транскристаллитов	49–61
Верхняя часть слитка, поверхностная зона, поперек осей первого порядка транскристаллитов	34–49

Ударная вязкость нетермообработанной стали 34ХН1М, полученной способом ЭШЛ, имеет низкие значения (29–61 кДж/м²), что характерно для литого металла с резко выраженной межкристаллитной ликвацией. Меньшее значение ударной вязкости получено на образцах, плоскость разрушения которых совпадала с направлением осей первого порядка транскристаллитов. Было проведено электронномикроскопическое исследование изломов образцов на ударный изгиб, вырезанных в продольном и поперечном направлении транскристаллитов относительно осей первого порядка. Исследование проводилось методом угольных реплик на просвет на электронном микроскопе ЭМВ-100Л. Фотографии участков изломов представлены на рис. 1.



а

б

Рис. 3. Изломы образцов на ударный изгиб из стали 34XН1М после ЭШЛ ($\times 5000$): а – излом поперек осей первого порядка транскристаллитов; б – излом вдоль осей первого порядка транскристаллитов

В обоих случаях излом хрупкий по степени пластической деформации и энергии разрушения. Микрорельеф поверхности представлен вытянутыми мелкими чашечками, что свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении. Сопротивление отрыву при разрушении в разных направлениях низкое и сопровождается характерным строением изломов.

Образцы для усталостных испытаний вырезались из заготовок полусекций коленчатого вала (рис. 4). Три образца металла вырезались из зоны сплавления из поверхности шейки и по три образца, расположенных в поперечном направлении из металла шейки центральной и поверхностных зон.

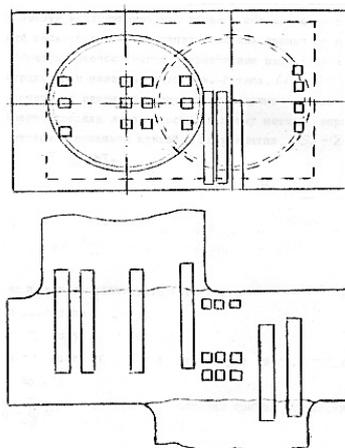


Рис. 4. Схема вырезки заготовок для усталостных испытаний из секции коленчатого вала

Значения твердости (24 – 27 HRC) нетермообработанной стали 34XН1М, полученной способом ЭШЛ, определялись на поперечном темплете шейки и продольном темплете щеки полусекции.

Испытания на многоцикловую усталость проводили по схеме поперечного изгиба консольно закрепленных образцов диаметром 10 мм при частоте 100 Гц на усталостной машине УКИ-10М. Испытания проводились по методу Локати [6] при неизменном критерии предельного состояния образцов [7]. Метод предусматривает определение предела выносливости металлов путем испытания одного (лучше двух – трех образцов) при ступенчатом увеличении нагрузки [8].

В табл. 2 приведены результаты усталостной прочности металла различных зон полусекции коленчатого вала, полученного способом ЭШЛ из стали 34XН1М, свидетельствующие об однородности (изотропности) свойств металла сопротивляться циклическим нагрузкам, и не зависит от места вырезки и расположения образцов диаметром 10 мм.

Таблица 2

Усталостная прочность металла стали 34ХН1М после термообработки
(циклический отжиг, нормализация с отпуском)

Исследуемая зона полусекции	Предел выносливости, σ_{-1} , МПа	Примечание
Зона сплавления, центр шейки	284	
Зона сплавления, поверхность шейки	315	Метод Локати
Центр щеки, продольное направление	358	
Центр щеки, поперечное направление	360	Метод Локати
Поверхность щеки, поперечное направление	360	Метод Локати

Значения механических свойств образцов из темплета шейки (рис. 2), прошедших термическую обработку по режиму: нормализация при температуре 870 ± 10 °С и отпуск при температуре 650 ± 10 °С, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства стали 34ХН1М после нормализации с отпуском

Место расположения образца	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, кДж/м ²
Вдоль оси шейки, центральная зона	773	558	20,0	46,7	636–779
Вдоль оси шейки, зона 1/2 радиуса шейки	778	566	19,7	50,4	809–1090
Вдоль оси шейки, зона поверхности	768	555	20,3	57,8	772–916
Поперек оси шейки, центральная зона	771	558	18,8	53,5	723–894
Поперек оси шейки, зона 1/2 радиуса шейки	774	558	18,8	53,4	820–894
Поперек оси шейки, зона поверхности	776	563	21,0	58,5	628–662
Центральная зона щеки полусекции	–	–	–	–	1230–1540

Структура металла после вышеуказанных режимов термической обработки – сорбит отпуска, балл 7–8.

Содержание водорода (см³ на 100 г металла) при изотермическом отжиге при 860 °С, нормализации при температуре 870 °С и отпуску при 650 °С составило 2,0–2,03; при циклическом отжиге при 860 °С, нормализации при 870 °С и отпуску при 650 °С – 1,66–1,74.

Проведенные режимы термической обработки (нормализации и высокого отпуска отожженных заготовок) обеспечивают отсутствие флокенов в выплавленном металле и содержание водорода 1,44–1,63 см³ на 100 г металла (табл. 4).

Таблица 4

Содержание газов в металле после термической обработки

№ заготовки	Количество газа (см ³) на 100 г металла				№ состав		
	СО	N ₂	H ₂	Всего	O ₂	N ₂	H ₂
1	1,08	8,33	1,44	10,35	0,0007	0,0104	0,00012
2	2,48	6,35	1,63	10,46	0,0017	0,0079	0,00014

Приведенные в статье [11] данные по свойствам литого электрошлакового металла 34Х1НМ с использованием экзотермических флюсов (микро и макроанализы и другие свойства) показывают, что они удовлетворяют требованиям соответствующих ГОСТов или ТУ по этим показателям к данной стали.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что можно рекомендовать следующие виды термической обработки заготовок элементов коленчатых валов:

– циклический отжиг при температуре 860 ± 10 °С, охлаждение на подине до 300 °С и воздухе;

– нормализация при 860 ± 10 °С, охлаждение на воздухе;

– отпуск при температуре 650 ± 10 °С, охлаждение на воздухе.

В случае неудовлетворительной микроструктуры и механических свойств допускается повторная термическая обработка.

ВЫВОДЫ

1. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что термическая обработка литой стали ЭШЛ марки 34ХН1М с использованием разработанного способа «твердого» старта и экзотермического флюса обеспечивает соответствие механических свойств литого электрошлакового металла требованиям технических условий к ковальной стали открытой выплавки, содержание водорода до $2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла и отсутствие флокенов.

2. Изучена склонность металла коленчатого вала, получаемого способом ЭШЛ, к флокенообразованию и определены режимы термической обработки заготовок элементов коленчатого вала.

3 Экспериментально установлено, что усталостная прочность металла коленчатого вала газомотокомпрессора МК-8 из стали 34ХН1М, полученного методом электрошлакового литья, соответствуют значениям усталостной прочности сталей, используемых в машиностроении для производства крупных деталей ответственного назначения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стативкин Г. П. Усталостные поломки коленчатых валов дизелей и борьба с ними / Г. П. Стативкин, В. А. Янчеленко. // В кн. : Труды ЦНИДИ. – Л. : – вып. 60. – 1970. – С. 37–42.
2. Власов А. Ф. Электрошлаковый переплав на твердом старте по бифилярной схеме ведения процесса с использованием экзотермических электропроводных флюсов / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко // Сварочное производство. – 2014. – № 4. – С. 20–25.
3. Власов А. Ф. Электрошлаковый переплав на твердом старте при монофилярной схеме ведения процесса / А. Ф. Власов, В. К. Заблоцкий // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – № 3 (28). – С. 74–79.
4. Марочник сталей для машиностроения. – М. : Научно-исследовательский институт информации по машиностроению, 1965.
5. Проблема специальной электрометаллургии. Сборник статей. Вып. 1–10. – К. : Наукова думка, 1975–1979.
6. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник – М. : Металлургия, 1978. – 304 с.
7. ГОСТ 25.507-85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.
8. Рекомендации по ускоренному определению пределов выносливости методом Локати. – М. : ВНИИИМАШ, 1971. – С. 41.
9. Расчетная и экспериментальная проверка надежности противифлокенной обработки цельнокованных колес / Г. С. Морозов [и др.]. – В кн. : Термическая обработка металлов. Тематический отраслевой сборник. – М. : Металлургия. – № 5, 1977. – С. 26–32.
10. Исследование некоторых режимов противифлокенной обработки колес в конвейерных печах / Г. С. Морозов [и др.]. – В кн. Термическая обработка металлов. Тематический отраслевой сборник. – М. : Металлургия. – № 5, 1977. – С. 22–26.
11. Власов А. Ф. Электрошлаковое литье коленчатого вала газомотокомпрессора МК-08 из стали 34ХН1М с использованием экзотермических электропроводных флюсов / А. Ф. Власов // Технология машиностроения. – М. – 2013. – № 9. – С. 10–15.