

УДК 621.317.42

Батарин Р. В.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ДЕТАЛЕЙ КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время остро востребована продукция машиностроения, для получения которой необходима реализация новых перспективных технологий обработки давлением. Но в свою очередь новые технологии требуют от оборудования таких технических характеристик, которые не всегда может обеспечить существующий парк кузнечно-прессовых машин. Известно, что создание новой мощной кузнечно-прессовой машины составляет несколько лет. Общая масса мощной прессовой установки это тысячи тонн, а масса и габариты отдельных базовых деталей достигают сотен тонн и находятся на пределе технологических возможностей заводов тяжелого машиностроения и транспортных средств. Для их изготовления требуются уникальные технологии, мощное металлургическое, обрабатывающее и термическое оборудование, а также не менее металлоемкая и дорогая технологическая оснастка. Сегодня, при отсутствии перспективы загрузки и резкого снижения финансирования в условиях кризиса, ни одно предприятие не рискнет вкладывать деньги в такой проект. Выход из создавшегося положения – это модернизация существующих прессов с целью доведения их технических характеристик до современных требований. Сегодня так поступают многие ведущие мировые фирмы. Это хорошо иллюстрирует пример «ВСМПО-Ависма». После заключения контрактов с корпорациями «Boeing» и «Aerbas» на поставку титановых поковок для их самолетов, предприятие было вынуждено срочно заняться модернизацией своих тяжелых прессов. Прежнее состояние оборудования не позволяло гарантировать качество изделий и плановую ритмичность их поставки заказчикам [1].

И здесь возникает сложная инженерная задача – провести оценку технического состояния силовых деталей прессов перед проведением модернизации. Речь идет не только о выявлении макродефектов конструкции (очевидно, что при увеличении технологических сил при внедрении новых технологий, возможно «страгивание» макродефектов), но и о состоянии металла в, так называемой «бездефектной», зоне, где так же может накопиться усталостная повреждаемость, которая при дальнейшей эксплуатации пресса на интенсифицированных режимах приводит к ситуациям, проиллюстрированным рис. 1.



Рис. 1. Трещины в станине (фотография сделана специалистами ЗАО «Прочность» при выполнении экспертизы технического состояния силовых деталей кузнечно-прессового оборудования перед проведением модернизации)

Для решения этой задачи предлагается применять магнитные методы неразрушающего контроля и диагностики [2–4]. Наиболее перспективен метод измерения коэрцитивной силы, позволяющий контролировать состояние металла в реальном времени. По своему физическому смыслу коэрцитивная сила – это напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного до насыщения ферромагнетика. Любые структурные изменения, происходящие в материале, приводят к изменению величины коэрцитивной силы. То есть коэрцитивная сила может быть принята в качестве индикатора

накопленной повреждаемости металла, как возникшей в результате циклического эксплуатационного нагружения, так и технологической, привнесённой в процессе изготовления детали. По величине коэрцитивной силы можно выявить структурные изменения металла в тех случаях, когда другие магнитные свойства остаются без изменений. Приборная база этого вида неразрушающего контроля развивается быстрыми темпами, но методическое оснащение практически всех методов магнитного неразрушающего контроля заметно отстает.

Для определения технического состояния (и остаточного ресурса) силовых деталей оборудования необходимо знать две величины – значение коэрцитивной силы в неповрежденном (на момент начала эксплуатации) металле и значение коэрцитивной силы на момент «предразрушения». К сожалению, статистика по этим величинам скудна.

Целью данной работы является создание математических моделей, позволяющих эксперту, проводящему оценку состояния силовых деталей кузнечно-прессового оборудования, с заданной долей вероятности определять первоначальное значение исследуемого параметра, и после замера коэрцитивной силы в детали, отработавшей часть своего ресурса, делать вывод об уровне накопленной усталостной повреждаемости.

Модель для расчета коэрцитивной стали в состоянии поставки.

Модель была построена на основе эквивалентов Шеффлера. Диаграмма Шеффлера [5, 3] используется для определения фазового состава конструкционных сталей. Как известно, фазовый состав непосредственно влияет на магнитные свойства сталей. α -железо, образующее феррит и мартенсит, обладает лучшими магнитными свойствами, чем γ -железо, образующее аустенит. Поэтому легирующие элементы по их влиянию на фазовый состав и соответственно на магнитные свойства сталей можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся элементы, повышающие магнитную проницаемость и снижающие величину коэрцитивной силы. Для этой группы рассчитывается хромовый эквивалент m_{Cr} (%) по формуле [5]:

$$m_{Cr} = Cr + 1,5 \cdot Si + Mo + Nb, \quad (1)$$

где Cr , Si , Mo и Nb – содержание соответственно хрома, кремния, молибдена и ниобия в процентах. Ко второй группе относятся элементы, уменьшающие магнитную проницаемость и повышающие коэрцитивную силу. Для этой группы элементов рассчитывается никелевый эквивалент m_{Ni} (%) по формуле [5]:

$$m_{Ni} = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C, \quad (2)$$

где Ni , Mn и C – содержание соответственно никеля, марганца и углерода в процентах.

Проанализировав выборку исследуемых сталей (с известными значениями коэрцитивной силы и рассчитанными m_{Cr} и m_{Ni}) я пришел к выводу, что значение коэрцитивной силы больше зависит от хромовой составляющей, чем от никелевой или их отношения. Поэтому я ввел разбиение диапазона следующим образом: 1) стали с $0 < m_{Cr} \leq 1$; 2) стали с $1 < m_{Cr} \leq 2,6$. Были составлены таблицы со сталями, удовлетворяющими этим значениям (табл. 1, 2). В каждой группе присутствуют стали с заведомо известным значением (по заслуживающим доверия литературным данным [2–4]) коэрцитивной силы, которые использовались для составления уравнений вида:

$$H_c = A_1 \cdot m_{Ni} + B_1 \cdot m_{Cr}; \quad (3)$$

$$H_c = A_2 \cdot (m_{Ni})^2 + B_2 \cdot (m_{Cr})^2; \quad (4)$$

$$H_c = A_3 \cdot (m_{Ni})^2 + B_3 \cdot m_{Cr}; \quad (5)$$

$$H_c = A_4 \cdot m_{Ni} + B_4 \cdot (m_{Cr})^2, \quad (6)$$

где H_c (А/м), m_{Cr} и m_{Ni} определяются по уравнениям (1)–(2), A_i , B_i ($i=1...4$) – коэффициенты. После составления математических моделей вида (3)–(6) методами статистического анализа было выявлено, что наиболее адекватна (обладает максимальным значением

эмпирического критерия Фишера, минимальным значениями коэффициента несовпадения Тейла и всех видов ошибок) экспериментальным (в данном случае литературным данным) модель вида (5) с соответствующими коэффициентами:

$$H_c = 1,882 \cdot (m_{Ni})^2 + 383,470 \cdot m_{Cr}; \quad (7)$$

$$H_c = 3,670 \cdot (m_{Ni})^2 + 177,190 \cdot m_{Cr}. \quad (8)$$

Уравнение (7) справедливо для сталей с $0 < m_{Cr} \leq 1$, уравнение (8) для сталей $1 < m_{Cr} \leq 2,6$.

В табл. 1, 2 H_c – экспериментальное (по литературным данным), $H_{см}$ – расчетное (по математической модели вида (7)–(8) значение коэрцитивной силы. Химический состав сталей определялся как среднее по разбросу допускаемых значений содержания элемента по соответствующим ГОСТам.

Таблица 1

Стали с $0 < m_{Cr} \leq 1$

№	Сталь	H_c , А/м	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Cr, %	m_{Cr}	m_{Ni}	$H_{см}$, А/м
1	Сталь 10	240	0,11	0,27	0,50	0,25	0,15	0,555	3,800	240
2	Сталь 15		0,16	0,27	0,50	0,25	0,25	0,655	5,300	304
3	Сталь 20	320	0,21	0,27	0,50	0,25	0,25	0,655	6,800	338
4	Сталь 25		0,26	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	8,375	383
5	Сталь 30		0,31	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	9,875	435
6	Сталь 35		0,36	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	11,375	495
7	Сталь 40		0,41	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	12,875	563
8	Сталь 45	640	0,46	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	14,375	640
9	Сталь 50		0,51	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	15,875	725
10	Сталь 55		0,56	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	17,375	819
11	Сталь 60		0,61	0,27	0,65	0,25	0,25	0,655	18,875	922
12	09Г2	300	0,11	0,27	0,5	0,25	0,15	0,555	3,800	312
13	22К	500	0,23	0,29	0,85	0,30	0,30	0,735	7,625	475

Таблица 2

Стали с $1 < m_{Cr} \leq 2,6$

№	Сталь	H_c , А/м	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Cr, %	m_{Cr}	m_{Ni}	$H_{см}$, А/м
1	15Х		0,15	0,27	0,55	0,30	0,85	1,255	5,075	317
2	20Х	380	0,20	0,27	0,65	0,30	0,85	1,255	6,625	383
3	30Х	540	0,28	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	9,025	539
4	35Х		0,35	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	11,125	694
5	38ХА	800	0,39	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	12,325	798
6	40Х	815	0,40	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	12,625	825
7	45Х		0,45	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	14,125	972
8	50Х		0,50	0,27	0,65	0,30	0,95	1,355	15,625	1 136
9	30ХГСА	800	0,31	1,05	0,85	0,3	0,95	2,525	10,025	816
10	16ХСН	520	0,17	0,75	0,45	0,75	0,95	2,075	6,075	503

В табл. 1 приведены стали (строки 1–11) одного класса – конструкционные углеродистые. Для проверки адекватности модели в таблицу были включены две стали несколько иного назначения и иного класса (строки 12–13). Это стали 09Г2 – низколегированная конструкционная сталь и 22К – котельная сталь, однако с хромовым эквивалентом, входящим в исследуемый интервал. И для этих сталей (с заранее известной величиной коэрцитивной силы) предложенная модель (7) дает погрешность не более 5 %.

В табл. 2 с этой же целью к конструкционным низколегированным сталям (строки 1–8) добавлены среднелегированные стали 30ХГСА и 16ХСН (строки 9–10) иного, чем стали в строках (1–8), назначения. Тем не менее, и для этих сталей предложенная модель (8) дает погрешность не более 3 %. Это может являться доказательством того, что для сталей в состоянии поставки именно интервал, в который входит хромовый эквивалент, имеет превалирующее влияние на закон зависимости коэрцитивной силы от химического состава стали.

Модели для расчета коэрцитивной стали после термообработки.

Для составления и проверки данных моделей предлагается другой метод классификации данных, а именно расположение сталей на диаграмме Шеффлера. В данном случае положение точки, соответствующей стали на диаграмме, равно зависит от величин m_{Cr} и m_{Ni} . При составлении модели используются стали лежащие в одной области на диаграмме. Предполагая, что их магнитные свойства будут иметь схожие распределения и зависимости. Обозначения на диаграмме: М – Мартенсит, А – Аустенит, Ф – Феррит. Среди множества сталей было решено составить модель по мартенситным сталям, так как у них хорошо отслеживаются магнитные свойства.

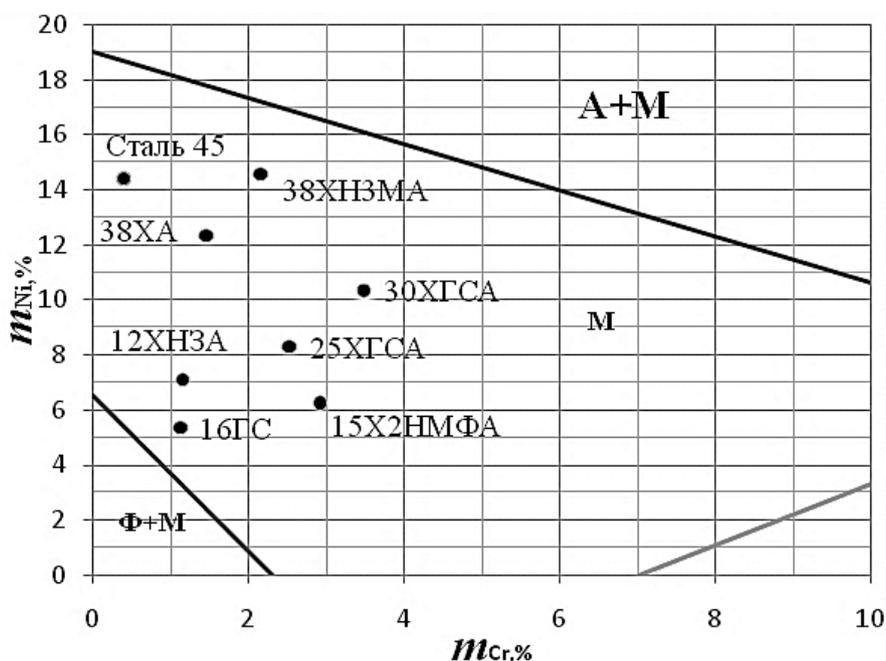


Рис. 2. Участок диаграммы Шеффлера с точками, соответствующим сталям различного назначения

Выбрав часть из спектра мартенситных сталей, я объединил их в таблицу исходных данных (табл. 3). Таблица получена из данных справочной литературы и статей [2–4], имеющих в свободном доступе. Для сталей помимо коэрцитивной силы предлагается сравнить, такие характеристики как: химический состав по марочнику сталей и сплавов [6] и параметры термической обработки по справочникам и статьям [2–4]. При составлении математических моделей я использовал не только процентное содержание химических элементов, эквивалент хромовой никелевой групп, но и углеродный эквивалент по ГОСТ 7524-89 [7]:

$$C_{\text{эkv}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{40} + \frac{V}{14},$$

где C , Mn , Si , Cr , Ni , Cu , V – содержание соответствующего легирующего элемента в процентах.

Таблица 3

Исходные данные

№	Марка стали	Термические операции		Химический состав								
		$T_{зак.}^{np.}$	$T_{отп.}^{np.}$	H_c , А/м	C , %	Mo , %	W , %	Cr , %	Si , %	V , %	Ni , %	Mn , %
1	Сталь 45	8,60	6,20	2 220	0,46	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,25	0,65
2	Сталь 45	8,20	4,00	1 360	0,46	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,25	0,65
3	Сталь 45	8,20	4,50	1 200	0,46	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,25	0,65
4	Сталь 45	8,50	6,00	2 800	0,46	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,25	0,65
5	15Х2НМФА	9,20	6,50	650	0,16	0,57	0,00	1,90	0,30	0,09	1,21	0,44
6	16ГС	9,30	5,80	480	0,15	0,00	0,00	0,30	0,55	0,00	0,30	1,05
7	12ХН3А	8,50	1,80	1 030	0,13	0,00	0,00	0,75	0,27	0,00	2,95	0,45
8	25ХГСА	8,90	6,30	950	0,25	0,00	0,00	0,95	1,05	0,00	0,30	0,95
9	30ХГСА	8,80	6,30	1 200	0,32	0,95	0,00	0,95	1,05	0,00	0,30	0,95
10	38ХА	8,60	5,50	1 000	0,39	0,00	0,00	1,05	0,27	0,00	0,30	0,65
11	38ХНЗМФА	8,50	6,00	1 000	0,37	0,40	0,00	1,35	0,27	0,14	3,25	0,37

В табл. 3 приняты следующие обозначения $T_{зак.}^{np.} = \frac{T_{зак.}}{100}$, $T_{отп.}^{np.} = \frac{T_{отп.}}{100}$ – приведенные

температуры закалки $T_{зак.}$ и отпуска $T_{отп.}$ соответственно.

$$Y = a \times F_1(x_1) \times F_2(x_2) \times F_3(x_3) \times \dots \times F_n(x_n)$$

Все приведенные ниже модели получены моделированием методом Брандона [8]. Данным методом создается модель регрессии вида: $Y = a \times F_1(x_1) \times F_2(x_2) \times F_3(x_3) \times \dots \times F_n(x_n)$, где $F_n(x_n)$ – некая функция от влияющего фактора (x_n), a – коэффициент. Чем больше фактор оказывает влияние на искомую величину Y , тем меньше его номер в общем уравнении регрессии. Вид функции $F_n(x_n)$ выбирается аналитически.

Модель для расчета коэрцитивной силы в зависимости от химического состава и приведенных температур закалки и отпуска:

$$\begin{aligned}
 H_c = & (17657 \cdot C^2 - 7257,2 \cdot C + 1452,8) \times (-1,0951 \cdot Mn^2 + 1,635 \cdot Mn + 0,4477) \times \\
 & \times (-0,1826 \cdot Cr^2 + 0,3169 \cdot Cr + 0,9403) \times (-1,4879 \cdot (T_{зак.}^{np.})^2 + 26,055 \cdot (T_{зак.}^{np.}) - 112,87) \times \\
 & \times 0,8382 \cdot Si^2 - 1,1193 \cdot Si + 1,2467) \times (-0,1143 \cdot Ni^2 + 0,3757 \cdot Ni + 0,8935) \times \\
 & \times (-10,382 \cdot V^2 + 0,6709 \cdot V + 1,012) \times (-0,0378 \cdot Mo^2 + 0,0141 \cdot Mo + 1,0023) \times \\
 & \times (0,0343 \cdot (T_{отп.}^{np.})^2 - 0,2947 \cdot (T_{отп.}^{np.}) + 1,5324)
 \end{aligned} \quad (9)$$

Модель для расчета коэрцитивной силы в зависимости от m_{Cr} и m_{Ni} и приведенных температур закалки и отпуска:

$$\begin{aligned}
 H_c = & (349,97 \cdot (m_{Cr})^2 - 1547,8 \cdot m_{Cr} + 2397,6) \times (-0,0155 \cdot (m_{Ni})^2 + 0,3648 \cdot m_{Ni} - 0,9243) \times \\
 & \times (-1,4459 \cdot (T_{зак.}^{np.})^2 + 25,378 \cdot T_{зак.}^{np.} - 110,18) \times (0,0241 \cdot (T_{отп.}^{np.})^2 + 0,1899 \cdot T_{отп.}^{np.} + 1,2808)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Модель для расчета коэрцитивной силы в зависимости от углеродного эквивалента и приведенных температур закалки и отпуска:

$$\begin{aligned}
 H_c = & (-1784,9 \cdot (T_{зак.}^{np.})^2 - 30339 \cdot T_{зак.}^{np.} + 127402) \times \\
 & \times (-9,5976 \cdot (C_{эkv.})^2 + 10,386 \cdot C_{эkv.} - 1,6252) \times \\
 & \times (-0,0011 \cdot (T_{отп.}^{np.})^2 + 0,1232 \cdot T_{отп.}^{np.} + 0,3785)
 \end{aligned} \quad (11)$$

Для проверки адекватности предложенных моделей мной был проведен эксперимент на ГСО 2192-89 комплект СОКС-1 (государственный стандартный образец для измерения коэрцитивной силы, представляющих собой пластины размером 58×35×8 мм) разработки Уральского НИИ метрологии (г. Екатеринбург) из стали 45 с различной термической обработкой. Для устранения влияния приборной погрешности измерения проводились по несколько раз в одной точке с последующим осреднением измеренных значений. В табл. 4 внесены значения коэрцитивной силы, соответствующие математическому ожиданию при каждой термической обработке.

Таблица 4

Экспериментальные значения для стали 45

№	$T_{зак}^{np.}$	$T_{отп.}^{np.}$	Твердость HRc	H_c , А/м
1	8,40	2,00	55	1 822
2	8,40	2,80	50	1 462
3	8,40	4,00	43	1 314

Известные значения коэрцитивной силы (принятые в дальнейших расчетах как истинные) и значения, рассчитанных с помощью моделей (9)–(11), приведены в табл. 5.

Таблица 5

№	Марка стали	$T_{зак}^{np.}$	$T_{отп.}^{np.}$	H_c , А/м известное значение	H_{cm} , А/м по (9)	H_{cm} , А/м по (10)	H_{cm} , А/м по (11)
1	Сталь 45	8,60	6,20	2 220	2 161	2 380	1 926
2	Сталь 45	8,20	4,00	1 360	1 209	1 291	1 354
3	Сталь 45	8,20	4,50	1 200	1 207	1 302	1 444
4	Сталь 45	8,50	6,00	2 800	1 998	2 197	1 910
5	Сталь 45	9,20	6,50	650	692	628	760
6	15Х2НМФА	9,30	5,80	480	488	491	409
7	16ГС	8,50	1,80	1 030	1 048	1 029	986
8	12ХНЗА	8,90	6,30	950	981	895	1 468
9	25ХГСА	8,80	6,30	1 200	1 245	1 817	1 326
10	30ХГСА	8,60	5,50	1 000	1 640	1 179	1 310
11	38ХА	8,50	6,00	1 000	1 001	816	853
12	Сталь 45	8,40	2,00	1 822	1 981	1 980	1 087
13	Сталь 45	8,40	2,80	1 462	1 790	1 862	1 252
14	Сталь 45	8,40	4,00	1 314	1 655	1 800	1 495

В табл. 5 в строках (1–11) известное значение H_c приведено из литературных источников, в строках (12–14) собственный эксперимент автора (табл. 4). Точность предлагаемых моделей рассчитывалась по следующим зависимостям:

Средняя относительная ошибка модели определялась по формуле [9]:

$$\delta = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} \left| \frac{H_c - H_{cm}}{H_{cm}} \right|,$$

где H_c – известное (истинное) значение коэрцитивной силы для стали; H_{cm} – значение коэрцитивной силы для этой стали, полученное расчётом по модели.

Максимальная относительная ошибка оценивалась по формуле [9]:

$$\delta = \max \left| \frac{H_c - H_{cm}}{H_{cm}} \right|.$$

Средняя квадратичная ошибка определялась по формуле [9]:

$$S = \frac{1}{14} \sqrt{\sum_{i=1}^{14} \left(\frac{H_c - H_{cm}}{H_{cm}} \right)^2}$$

Коэффициент несоответствия Тейла рассчитывался по формуле [9]:

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{14} (H_c - H_{cm})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{14} H_c^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{14} H_{cm}^2}}$$

Таблица 6

Точность предлагаемых моделей

Модель	Средняя относительная ошибка модели δ	Максимальная относительная ошибка δ_{max}	Средняя квадратичная ошибка S	Коэффициент несовпадения Тейла v
(9)	0,113	0,401	0,046	0,106
(10)	0,133	0,339	0,046	0,101
(11)	0,213	0,676	0,073	0,136

Таблица 7

Диапазон данных для моделей (9)–(11)

Значение	$T_{зак.}^{np.}$	$T_{отп.}^{np.}$	C, %	Mo, %	W, %	Cr, %	Si, %	V, %	Ni, %	Mn, %
Min	8,2	1,8	0,13	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,25	0,37
Max	9,3	6,5	0,46	0,95	0,00	1,90	1,05	0,14	3,25	1,05

ВЫВОДЫ

В статье приведены математические модели зависимости коэрцитивной силы от различных параметров. Показано, что для сталей в состоянии поставки хромовый эквивалент, имеет преобладающее влияние на закон зависимости коэрцитивной силы от химического состава стали. Для двух диапазонов хромового эквивалента [0; 1] и [1; 2,6] предложены математические модели, позволяющие обеспечивать точность получаемых результатов (максимальная относительная ошибка моделей 5 %). Для сталей после термических операций (рассмотрено сочетание – закалка и отпуск) предложены модели трех видов – в зависимости от химического состава, от хромового и никелевого эквивалентов, от углеродного эквивалента. В каждую модель входят приведенные температуры закалки и отпуска. Для проверки моделей автором были изготовлены, термообработаны и испытаны образцы типа ГСО 2192-89 комплект СОКС-1 (государственный стандартный образец для измерения коэрцитивной силы) из стали 45. Проведенный натурный эксперимент подтвердил адекватность предложенных моделей истинным значениям коэрцитивной силы в металле. Данные, изложенные в статье, могут быть применены при проведении обследования технического состояния силовых деталей кузнечно-прессового оборудования, в частности перед модернизацией, при планировании сроков остановки машин на техническое обслуживание и ремонты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпыгарь С. А. Модернизация тяжелых гидравлических прессов / С. А. Шпыгарь // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 12–16.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1: В. В. Клюев, В. Ф. Мужицкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.: ил.
3. Богачева Н. Д. Расширение возможностей применения метода коэрцитивной силы / Н. Д. Богачева // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – № 2 (28). – С. 8–10.
4. Алешин Н. П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий / Н. П. Алешин, В. Г. Щербинский – М.: Высшая школа, 1991. – 271 с.
5. Schaeffler A. L. Constitution diagram for stainless steel weld metal / A. L. Schaeffler // Metal Progress. – 1949. – V. 56. – P. 680–680B.
6. Шишков М. М. Марочник сталей / М. М. Шишков – Донецк: Юго-Восток, 2000. – 457 с.
7. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 6 с.
8. Brandon D. B. Developing mathematical models for computer control / D. B. Brandon // Instrument Society of America (ISA) Journal. – 1959. – V. 6. – № 7.
9. Розенберг Г. С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) / Г. С. Розенберг, В. К. Шитиков, П. М. Брусиловский. – Тольятти, 1994. – 182 с.

REFERENCES

1. Shpygar' S. A. Modernizacija tjazhelyh gidravlicheskih pressov / S. A. Shpygar' // Tjazheloe mashinostroenie. – 2011. – № 5. – S. 12–16.
2. Nerazrushajushhij kontrol': spravochnik: v 8 t. / pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 6. Kn. 1: V. V. Kljuev, V. F. Muzhickij, Je. S. Gorkunov, V. E. Shherbinin. Magnitnye metody kontrolja. – 2-e izd., ispr. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 832 s.: il.
3. Bogacheva N. D. Rasshirenie vozmozhnostej primenenija metoda kojercitivnoj sily / N. D. Bogacheva // V mire nerazrushajushhego kontrolja. – 2005. – № 2 (28). – S. 8–10.
4. Aleshin N. P. Radiacionnaja, ul'trazvukovaja i magnitnaja defektoskopija metalloizdelij / N. P. Aleshin, V. G. Shherbinskij – M.: Vysshaja shkola, 1991. – 271 s.
5. Schaeffler A. L. Constitution diagram for stainless steel weld metal / A. L. Schaeffler // Metal Progress. – 1949. – V. 56. – P. 680–680B.
6. Shishkov M. M. Marochnik stalej / M. M. Shishkov – Doneck: Jugo-Vostok, 2000. – 457 s.
7. GOST 7524-89. Shary stal'nye meljushhie dlja sharovyh mel'nic. Tehnicheskie uslovija. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1998. – 6 s.
8. Brandon D. B. Developing mathematical models for computer control / D. B. Brandon // Instrument Society of America (ISA) Journal. – 1959. – V. 6. – № 7.
9. Rozenberg G. S. Jekologicheskoe prognozirovanie (Funkcional'nye prediktory vremennyh rjadov) / G. S. Rozenberg, V. K. Shitikov, P. M. Brusilovskij. – Tol'jatti, 1994. – 182 s.

Батарин Р. В. – инженер-тензометрист ЗАО «Прочность», аспирант МГТУ «Станкин»

ЗАО «Прочность» – Закрытое акционерное общество «Прочность», г. Москва;

МГТУ «Станкин» – Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва.

E-mail: romashk4@yandex.ru