

ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ ПО ПАРАМЕТРАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

© 2024 г. Р. А. Соколов^{1,*}, К. Р. Муратов^{1,**}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: *falcon.rs@mail.ru; **muratovkr@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024; после доработки 16.04.2024
Принята к публикации 03.05.2024

Представлены результаты лабораторных исследований конструкционных сталей. Показана возможность применения комплексных параметров, полученных на основе гармонических составляющих петли магнитного гистерезиса для практической оценки временного сопротивления стали. Определение величины комплексного параметра осуществляется при помощи метода разделения диагнозов в пространстве признаков и метода группового учета аргументов. Регистрация петель магнитного гистерезиса проведена при помощи магнитного структуроскопа DIUS-1.15M. Установлены весовые коэффициенты влияния гармонических составляющих на величину комплексного параметра. Результаты исследования демонстрируют возможность удовлетворительной оценки предела прочности стали по величине комплексного параметра.

Ключевые слова: временное сопротивление, петля магнитного гистерезиса, гармонический анализ, методы технической диагностики, термическая обработка.

ESTIMATION OF THE TIME RESISTANCE OF STEEL BY THE PARAMETERS OF THE HARMONIC SPECTRUM OF THE REMAGNETIZATION CURVE

© 2024 R.A. Sokolov^{1,*}, K.R. Muratov^{1,**}

¹Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen»/ IUT, Russia 625000 Tyumen, Volodarsky str., 38
E-mail: *falcon.rs@mail.ru; **muratovkr@tyuiu.ru

The paper presents the results of laboratory studies of structural steels. The possibility of application of complex parameters obtained on the basis of harmonic components of magnetic hysteresis loop for practical estimation of steel time resistance is shown. Determination of the value of the complex parameter is carried out by means of the method of separation of diagnoses in the feature space and the method of group accounting of arguments. Registration of magnetic hysteresis loops is carried out by means of magnetic structuroscope DIUS-1.15M. The weight coefficients of the influence of harmonic components on the value of the complex parameter were determined. The results of the study demonstrate the possibility of satisfactory estimation of the strength of steel by the value of the complex parameter.

Keywords: time resistance, magnetic hysteresis loop, harmonic analysis, methods of technical diagnostics, heat treatment.

DOI: 10.31857/S0130308224040068

Одним из свойств стали, по которому судят о надежности и сроке эксплуатации изделия, является временное сопротивление (σ_b) [1, 2]. Определение ее величины проводят стандартным образом в процессе разрушения образца, имеющего определенную форму и геометрические размеры [2].

Помимо разрушающих методов определения σ_b существуют неразрушающие косвенные методы, например, основанные на регистрации ультразвуковых волн, проходящих через объект контроля [3].

Между пределом прочности материала и твердостью существует связь [7]. Так, в работе [8] была предложена формула, описывающая связь между твердостью группы сталей и их σ_b , а также приведены статистические результаты оценки σ_b по H_c . Однако относительность установленных связей ограничивает их практическую применимость.

В работе [9] приведены обобщенные простые аналитические зависимости, описывающие связи между твердостями сталей, измеренными по шкалам Бринелля и Роквелла, и их σ_b .

Известны методы [4, 5], основанные на измерении и интерпретации магнитных характеристик вещества. В настоящей работе представлены результаты применения подобного подхода для определения величины временного сопротивления материала.

В качестве анализируемого параметра использовался гармонический спектр петли магнитного гистерезиса, полученный согласно методике, изложенной в [6].

Термическая обработка и размеры образцов из сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С

Марка стали	Термическая обработка	Размеры образцов, мм
09Г2С	Н (930 °С) + ЗВ	58,5×26,0×3,7
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	
Ст3	Н (930 °С) + ЗВ	59,0×29,0×3,8
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	
15ХСНД	Н (930 °С) + ЗВ	59,0×28,0×7,5
	Н (930 °С) + ЗВ + О (200 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (350 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (500 °С)	
	Н (930 °С) + ЗВ + О (650 °С)	

Н — нагрев; ЗВ — закалка в воде; О — отпуск

Анализируемые данные были получены на образцах, изготовленных из сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С после термической обработки. Термическая обработка и размеры образцов приведены в табл. 1.

Одноосное растяжение образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50. Скорость перемещения захватов при испытаниях составляла 15 мм/мин.

На рис. 1 представлены результаты, отражающие изменение σ_b исследуемых сталей от температуры термической обработки образцов. Нулевое значение на графиках соответствует состоянию исследуемых образцов после закалки в воде, далее по горизонтальной шкале отложены температуры отпуска.

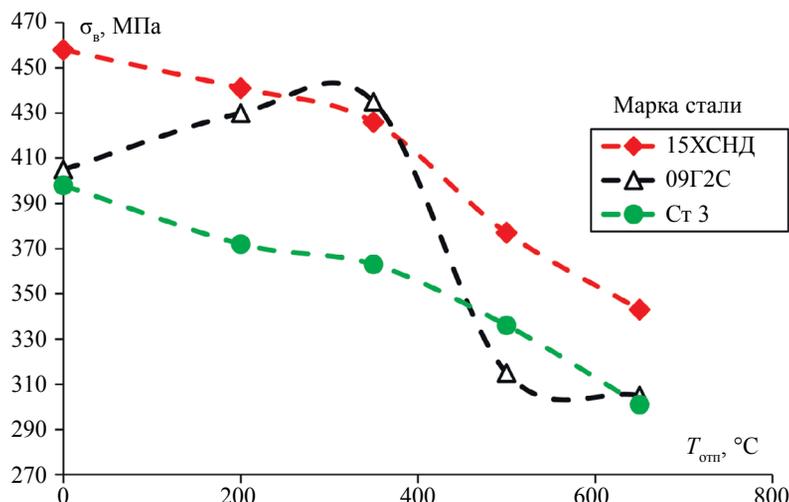


Рис. 1. Зависимость величины предела прочности от термической обработки.

Регистрация петель магнитного гистерезиса проводили при помощи магнитного структурографа АПС DIUS 1.15, реализующего измерения в замкнутой магнитной цепи. Величины маг-

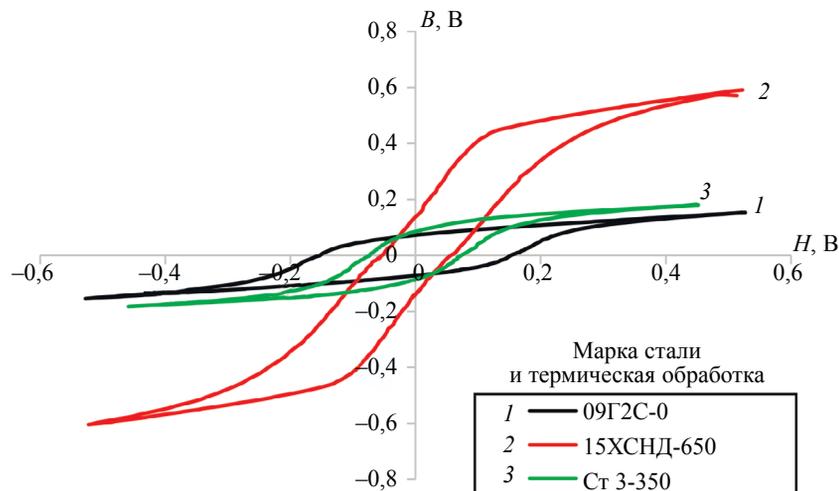


Рис. 2. Петли магнитного гистерезиса полученные на магнитном структуроскопе АПС DIUS 1.15.

нитной индукции и напряженности магнитного поля использованный прибор фиксирует в мВ. Примеры полученных петель магнитного гистерезиса представлены на рис. 2.

На основе метода разделения диагноза в пространстве признаков и метода группового учета аргумента были найдены комплексные параметры P_1 и P_2 , величина которых имеет удовлетворительную корреляцию с σ_B исследуемых материалов (рис. 3).

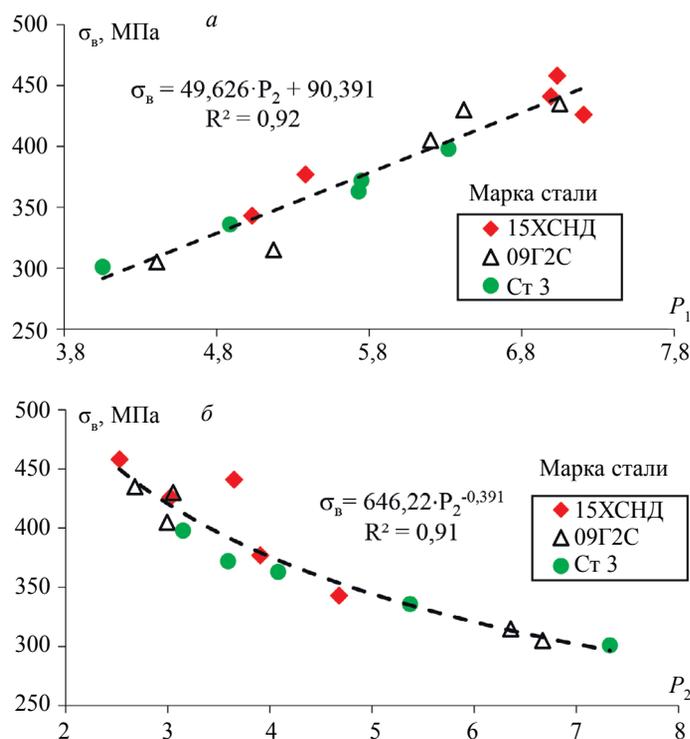


Рис. 3. Зависимость комплексного параметра от величины временного сопротивления исследуемых сталей: комплексный параметр P_1 (а); комплексный параметр P_2 (б).

Анализ представленных данных показывает, что термообработка закалкой в воду, после нагрева исследуемых сталей выше критической температуры A_{c3} , повышает временное сопротивление в среднем в 1,3 раза по сравнению с образцами, отпущенными при 650 °С. При уве-

личении температур отпуска происходит линейное снижение временного сопротивления сталей до уровня незакаленного состояния. У стали 09Г2С при температурах низкого и среднего отпуска наблюдается рост величины временного сопротивления, что связано с активными процессами преобразования структуры, ростом плотности дислокаций и величины внутренних остаточных напряжений [10].

Приведенные данные показывают, что в практических условиях, в качестве контрольного критерия, возможно использовать комплексный параметр, полученный по спектральным составляющим петли магнитного гистерезиса, который имеет высокую чувствительность к изменению физико-механических свойств стали.

ВЫВОДЫ

При помощи метода разделения диагнозов в пространстве признаков и метода группового учета аргументов найдены комплексные параметры, включающие в себя несколько гармонических составляющих.

В результате анализа полученных данных о гармонических составляющих и величине предела прочности было установлено, что для комплексного параметра P_1 и временного сопротивления σ_v наблюдается наличие удовлетворительной корреляционной зависимости, описываемой функцией с достоверностью $R^2 = 0,92$. При этом относительная ошибка определения временного сопротивления σ_v составляет $\pm 9,6\%$. Между комплексным параметром P_2 и временным сопротивлением σ_v наблюдается корреляция, описываемая степенной функцией с достоверностью $R^2 = 0,91$. При этом разброс определения временного сопротивления σ_v по комплексному параметру P_1 составляет ± 27 МПа, для комплексного параметра P_2 эта величина лежит в пределах ± 14 МПа.

Полученные результаты отражают возможность практического использования комплексного параметра, полученного по спектральным составляющим, петли магнитного гистерезиса для оценки величины временного сопротивления σ_v .

Статья подготовлена за счет средств гранта Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агамиров Л.В. Машиностроение / Энциклопедия. В 40 т. Разд. 2. Материалы в машиностроении. Т. 2-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. М.: Машиностроение, 2010. 851 с.
2. ГОСТ 1497—84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: Введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 52 с.
3. Полетика И.М., Егорова Н.М., Куликова О.А., Зуев Л.Б. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 3. С. 37—40.
4. Пономарев Ю.Ф. Закономерности гармонических составляющих намагниченности циклически перемагничиваемых ферромагнитных сердечников и возможности их использования. I. Критерии физического подобия // Дефектоскопия. 1983. № 9. С. 52—62.
5. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2016. Т. 18. № 2. С. 38—49.
6. Соколов Р.А., Муратов К.Р., Новиков В.Ф. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 70—72.
7. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 171 с.
8. Сандомирский С.Г. Анализ связи коэрцитивной силы с временным сопротивлением углеродистых сталей // Сталь. 2016. № 9. С. 62—65.
9. Сандомирский С.Г. Обобщенные корреляционные зависимости между временным сопротивлением сталей и их твердостью // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 11. С. 52—57.
10. Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Ковенский И.М., Муратов К.Р., Венедиктов А.Н., Чаугарова Л.З. Влияние термической обработки на образование соединения MNS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 4. С. 113—126.

REFERENCES

1. *Agamirov L.V.* Mashinostroenie / Enciklopediya. 40 t. Razd. 2. Materialy v mashinostroenii. T. 2-1. Fiziko-mekhanicheskie svoystva. Ispytaniya metallicheskih materialov (Mechanical Engineering. Encyclopedia. In 40 vol. Section 2. Materials in mechanical engineering. T. 2-1. Physical and mechanical properties. Tests of metallic materials), Moscow: Mashinostroenie, 2010, P. 851.
2. GOST 1497—84. Metally. Metody ispytanij na rastyazhenie (Metals. Tensile test methods): Introduced 1986-01-01. Moscow: Izd-vo standards, 1990. P. 52.
3. *Poletika I.M., Egorova N.M., Kulikova O.A., Zuev L.B.* About ultrasonic control of heterogeneity of mechanical properties of hot-rolled steel // Journal of Technical Physics. 2001. T. 71. No. 3. P. 37—40.
4. *Ponomarev Yu.F.* Laws of harmonic components of magnetization of cyclically remagnetized ferromagnetic cores and possibilities of their use. I. Criteria of physical similarity // Defectoscopya. 1983. No. 9. P. 52—62.
5. *Novikov V.F., Neradovsky D.F., Sokolov R.A.* Use of quasi-static magnetic hysteresis loops for steel structure control // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. 2016. T. 18. No. 2. P. 38—49.
6. *Sokolov R.A., Muratov K.R., Novikov V.F.* Application of the spectral characteristics parameters of the remagnetization curve to determine the hardness of a ferromagnetic material // Defectoscopya. 2023. No. 6. P. 70—72.
7. *Markovets M. P.* Determination of Mechanical Properties of Metals by Hardness. M.: Mashinostroenie, 1979. P. 171.
8. *Sandomirsky S.G.* Analysis of the relationship between the coercive force and the time resistance of carbon steels // Steel. 2016. No. 9. P. 62—65.
9. *Sandomirsky S.G.* Generalized correlation dependences between the time resistance of steels and their hardness // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostics of materials. 2017. T. 83. No. 11. P. 52—57.
10. *Sokolov R.A., Novikov V.F., Kovenskij I.M., Muratov K.R., Venediktov A.N., Chaugarova L.Z.* The effect of heat treatment on the formation of MnS compound in low-carbon structural steel 09Mn2Si. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) // Metal Working and Material Science. 2022. V. 24. No. 4. P. 113—126.