

УДК 621.74.002.6:681.3

КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СТАЛИ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Князев С.В.¹, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного
и сварочного производства (krookia@mail.ru)

Скопич Д.В.², директор

Фатьянова Е.А.², инженер

Усольцев А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства

Куценко А.И.¹, к.т.н., начальник управления научных исследований

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ООО «Индас Холдинг»
(654000, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Суворова, 2)

Аннотация. Аудит технологического процесса выплавки стали марки 20ГФЛ в дуговых печах емкостью шесть тонн Рубцовского филиала ОАО «Алтайвагон» выявил проблемы, связанные с получением брака стали по механическим свойствам. При этом химический состав исследуемых образцов находился в установленных ГОСТ границах. Для подтверждения этого факта и выявления причин проблемы брака был проведен статистический анализ влияния химического состава на качественные характеристики механических свойств металла. Для проведения регрессионного анализа и построения модели прогнозирования использовались следующие алгоритмы: Linear Regression (LR), Random Forest (RF) и Support Vector Machine (SVM). Предложено решение проблем, связанных с получением брака стали по механическим свойствам с помощью прогнозных моделей. В результате было установлено, что существует возможность прогнозирования и управления механическими свойствами стали по ходу ее выплавки. При получении прогноза брака по одному из параметров, задав текущие значения содержания элементов химического состава и конечные условия, можно рассчитать химический состав стали, которого еще возможно добиться на рассматриваемой плавке и который будет гарантировать отсутствие брака. Установлено, что для анализа тенденций качества стали литых изделий можно использовать два ключевых показателя из двух групп механических свойств – предел текучести σ_t и ударную вязкость KCV. Графический контроль качества можно осуществлять по временной диаграмме удаления среднего значения контролируемого параметра по браку от граничных его значений в стандартных отклонениях. Показателем хорошего качества и минимизации рисков является выход графика временной диаграммы за границу двух стандартных отклонений.

Ключевые слова: сталь, прогнозирование, механические свойства, химический состав, моделирование, плавка, управление, отливки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-128-132

Проведенный на предприятии Рубцовского филиала ОАО «Алтайвагон» аудит технологического процесса выплавки стали марки 20ГФЛ в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) емкостью 6 т выявил ряд проблем, связанных с получением брака стали по механическим свойствам [1 – 3]. При этом химический состав исследуемых образцов находился в установленных ГОСТ границах. Чтобы подтвердить этот факт и выявить причины возникновения брака, провели статистический анализ влияния химического состава на качественные характеристики механических свойств металла. Для эксперимента были отобраны годовые данные по пяти ДСП емкостью 6 т. Выборка составила 6000 плавов. Для анализа были взяты пять показателей механических свойств (ударная вязкость KCU_{-60 °C} и KCV_{-60 °C}; временный предел прочности σ_b , МПа; относительные сужение и удлинение ψ , % и δ , %) и десять элементов химического состава (C, S, Mn, P, S, Cr, Ni, Al, Cu, V). Анализ проводился в среде RStudio на языке обработки статистических данных R.

Для проведения регрессионного анализа и построения модели прогнозирования использовались следующие алгоритмы: Linear Regression (LR), Random Forest (RF) [4 – 6] и Support Vector Machine (SVM) [7 – 9].

Методы SVM и RF показали более хорошие результаты, чем LR, и примерно одинаковую среднюю абсолютную ошибку MAPE – соответственно 6,44 и 6,78 %. Для дальнейшего анализа был выбран метод RF. Далее была построена прогнозная модель абсолютной ошибки прогнозирования параметра с помощью этого метода. После корректировки прогнозных значений параметра KCU на величину прогнозируемой ошибки удалось снизить показатель MAPE прогнозной модели до 2,46 %. Средняя абсолютная ошибка прогноза по всем механическим свойствам не превысила 3 %.

С помощью Genetic Algorithm (GA) и полученных прогнозных моделей был проведен поиск минимума значения по каждому параметру механических свойств при заданных требованиями ГОСТ границах на процентное содержание элементов в химическом составе

стали марки 20ГФЛ. Согласно проведенным расчетам, минимальные значения показателей ψ , δ и КСУ не вышли за границы зоны качества. Расчет минимальных значений КСВ и σ_b показал возможность получения брака при хорошем с точки зрения ГОСТ химическом составе. Графики поиска минимумов с помощью алгоритма GA для параметров КСВ и σ_b показаны на рис. 1.

Проведенные расчеты подтвердили возможность получения брака стали по механическим свойствам при соблюдении границ на содержание элементов в химическом составе плавки согласно ГОСТ [1]. Таким образом, существует необходимость прогнозирования механических свойств стали по ходу выплавки, например после получения результатов экспресс-лаборатории перед сливом стали в ковш.

При получении прогноза брака по одному из параметров, используя алгоритм GA и прогнозную модель RF, задав текущие значения элементов химического состава и конечные условия, можно рассчитать химический состав стали, которого еще возможно добиться на данной плавке и который будет гарантировать отсутствие брака. После расчета рекомендуемого химического состава можно рассчитать необходимые добавки в ковш при сливе плавки. Это позволит частично или полностью уйти от брака по механическим свойствам.

Актуальность обеспечения высокого уровня показателей контроля и управления качеством, ответственности при производстве стальных литых изделий (рамы боковой и балки надрессорной грузовых железнодорожных вагонов) связана с обеспечением безопасности на железных дорогах, а также постоянным повышением требований к качеству отливок на уровне государственных и межгосударственных стандартов [3, 10 – 16].

Так, с 2001 г. качество рам и балок регламентировалось ОСТ 32.183–2001. В 2013 г. был принят межгосударственный стандарт ГОСТ 32400–2013, который в значительной мере повышает требования к механическим

свойствам марок стали, используемых для литья. Сравнение требований по механическим свойствам предыдущего и нового стандартов показано ниже (в числителе – min, в знаменателе – max):

Документ	σ_T , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ ₋₆₀ , Дж/см ²	КСВ ₋₆₀ , Дж/см ²
ОСТ 32.83–2001	$\frac{294}{343}$	$\frac{490}{510}$	$\frac{20}{18}$	$\frac{30}{25}$	24,5	16,7
ГОСТ 32400–2013	$\frac{300}{343}$	$\frac{500}{510}$	$\frac{20}{18}$	$\frac{35}{30}$	–	17 (20*)

* с 01.01.2016

Как видно, особые изменения относятся к относительному сужению и ударной вязкости. Контроль ударной вязкости на U-образном образце стал необязательным.

Регламентируемые значения параметров механических свойств – не единственные требования, предъявляемые к отливкам для железнодорожного транспорта. С учетом структуры металла и его химического состава получается большой список контролируемых параметров. Для повышения оперативности и автоматизации процесса контроля качества можно попытаться выделить из этого списка ключевые показатели, которые позволяют производителю оценить тенденции и состояние качества производимых изделий по гораздо меньшему количеству параметров. Это возможно благодаря тому, что многие из них связаны между собой.

В силу грубой своей оценки показатель величины зерна структуры металла не может быть эффективным параметром улучшения или ухудшения качества. Лабораторные исследования, зачастую, только констатируют тот факт, что эта характеристика в норме. Но уменьшение величины зерна приводит к повышению характеристик пластичности с одновременным ростом прочностных показателей. Поэтому оценка этого параметра может быть косвенной на основе ее влияния на

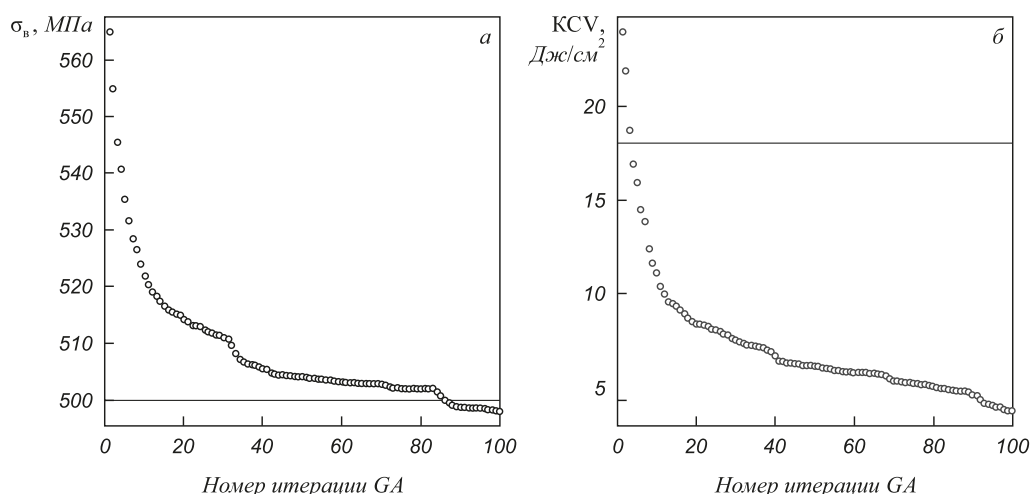


Рис. 1. Графики работы GA для показателей σ_b (а) и КСВ (б)

Fig. 1. GA operating schedule for parameters σ_b (a) and KCV (b)

механические свойства.

Химический состав стали, безусловно, важный набор показателей, но предоставляет сложную систему оценок, состоящую из большого числа контролируемых значений при сильном их взаимном влиянии. Нельзя контролировать, например, один углерод, так как само по себе его содержание без учета общего состава не дает понимания качества отливки. Необходимо учитывать и тот факт, что литые изделия проходят обязательную термическую обработку в печах нормализации, что в итоге изменяет химический состав готовых изделий уже после проведения спектрального анализа.

В итоге приходим к тому, что оптимальным является выбор ключевых показателей из тех, которые характеризуют механические свойства, в силу того, что испытания проводятся на готовых изделиях после всех обработок, а все другие контролируемые параметры влияют на показатели механических свойств.

Для проведения анализа была использована база данных 6000 лабораторных испытаний отливок из стали марки 20ГФЛ рамы боковой и балки наддрессорной. Исследовали пять механических свойств, контролируемых согласно ГОСТ: предел текучести (σ_T), временное сопротивление (σ_B), относительное сужение (ψ), относительное удлинение (δ) и ударную вязкость (KCU и KCV).

Механические свойства по способу испытания на воздействие различных нагрузок можно разделить на две группы – это пластичность (σ_B , δ , ψ) и ударная вязкость (KCU и KCV на образцах разной геометрии).

По требованиям ГОСТ 32400–2013 в группе свойств сопротивления металла ударным нагрузкам контролируется только нижняя граница ударной вязкости на V-образном образце (KCV). Поэтому в качестве первого ключевого показателя качества выберем степень приближения параметра KCV к своей нижней границе.

В связи с тем, что результаты измерений имеют нормальное распределение, то степень приближения можно оценивать в стандартных среднеквадратичных отклонениях (S) от среднего значения за отчетный период, например месяц (рис. 2). Из приведенного на рис. 2 графика видна постоянная положительная динамика параметра KCV. Для снижения рисков получения бра-

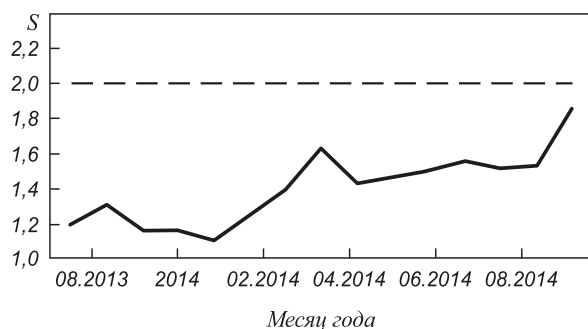


Рис. 2. Анализ динамики показателя KCV по месяцам

Fig. 2. Analysis of dynamics of KCV parameters by months

ка по механическим свойствам необходимо стабильное превышение этого показателя как минимум в два стандартных отклонения, что гарантирует отсутствие брака в 95 % плавов. Как видно, в данном случае уровень качества еще не достиг зоны пониженного риска.

Для анализа и сравнения механических свойств по группе пластичности в силу большой их волатильности воспользуемся трендами их выборок. Для выделения трендов применим метод «Гусеница» [14 – 20], основанный на сингулярном разложении.

На рис. 3 показаны графики выборок значений показателей механических свойств и их тренды. Все выборки отсортированы по пределу текучести. Вверху находятся тренды выборок, штриховой линией показана нижняя граница по ГОСТ.

Из графиков видно, что временное сопротивление находится в прямой зависимости от предела текучести, а относительные сужение и удлинение в обратной. Если выбрать предел текучести в качестве ключевого показателя, то критическое значение временного сопротивления будет ограничивать его в области низких значений, а относительные сужение и удлинение – в области высоких. Также видно, что у значений относительных удлинения и сужения есть большой запас до своих границ, поэтому они имеют малую ценность для ведения контроля.

Рассмотрим зависимость временного сопротивления от предела текучести, представленную на рис. 4, где штриховыми осевыми линиями отмечены границы качества параметров по ГОСТ; штрих-пунктирной линией показана аппроксимация графика. Быстрее график пересечет границу временного сопротивления при 500 МПа в точке, соответствующей пределу текучести 316 МПа. Это и будет нижняя граница предела текучести.

Теперь покажем график отклонения предела текучести от рассчитанной нижней границы (316 МПа) в стандартных отклонениях по месяцам (рис. 5). На графике виден рост показателя, в середине выбранного периода отмечен выход за два стандартных отклонения, однако в конце графика наблюдаются небольшой спад и относительная стабилизация в пределах критической зоны.

Выводы. Для анализа тенденций качества стали литых изделий можно использовать два ключевых показателя из двух групп механических свойств – предел текучести и ударную вязкость на V-образном образце (KCV). Графический контроль качества можно осуществлять по временной диаграмме удаления среднего значения контролируемого параметра от границы брака в стандартных отклонениях. Показателем хорошего качества и минимизации рисков является выход графика временной диаграммы за границу двух стандартных отклонений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Князев С.В., Скопич Д.В., Усольцев А.А., Фатьянова Е.А. Прогнозирование качественных характеристик стали марки 20ГФЛ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 2 (12). С. 31 – 33.

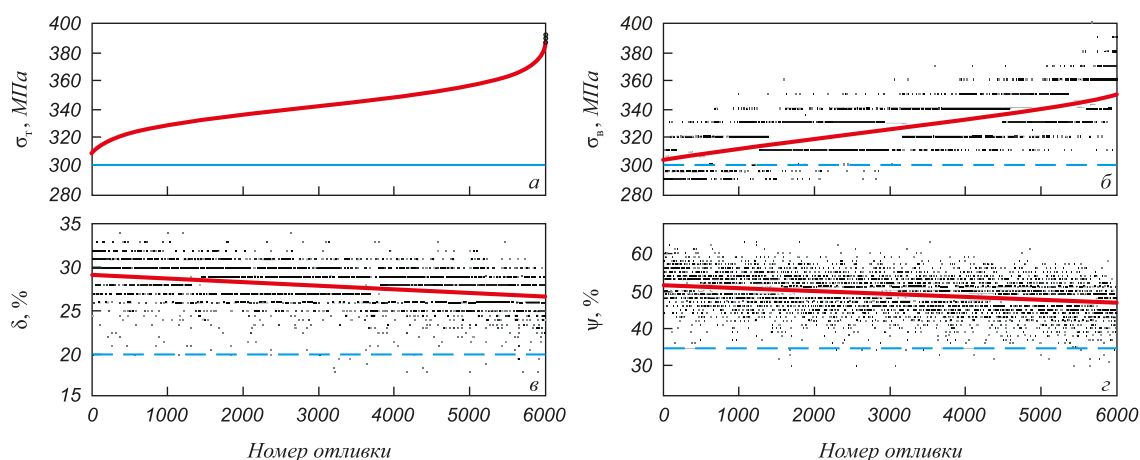


Рис. 3. Тренды механических свойств

Fig. 3. Trends of mechanical properties

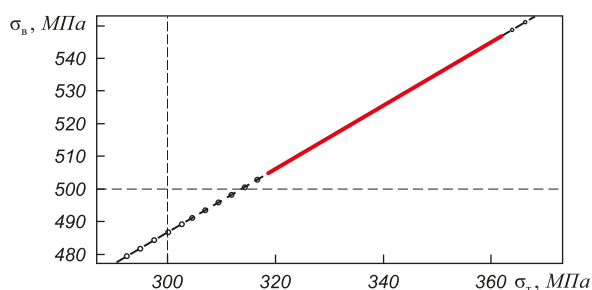


Рис. 4. Зависимость временного сопротивления от предела текучести

Fig. 4. Dependence of breaking strength on yield point

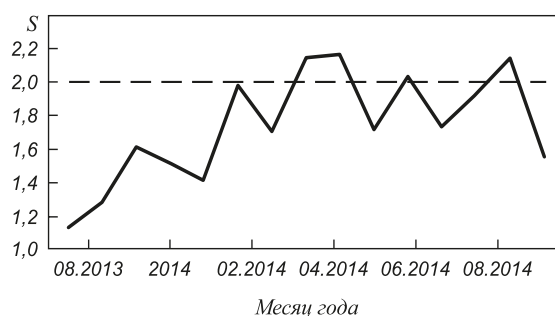


Рис. 5. Анализ тенденции предела текучести по месяцам

Fig. 5. Analysis of tendency of yield point by months

- Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production / Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgoplov A.E. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1 – 5 (012039).
- Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Dolgoplov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1 – 5 (012026).
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009.
- Ho Tin Kam 1995. Random Decision Forests. Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, Montreal, QC, 14–16 August 1995, pp. 278 – 282.
- Prinzie A., Van den Poel D. Random Multiclass Classification: Generalizing Random Forests to Random MNL and Random NB, DEXA 2007, Lecture Notes in Computer Science, 4653, pp. 349 – 358.
- Alexander Statnikov, Constantin F. Aliferis, Douglas P. Hardin. A Gentle Introduction to Support Vector Machines in Biomedicine: Theory and methods. – World Scientific, 2011. (ISBN 978-981-4324-38-0).
- Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
- Nello Cristianini, John Shawe-Taylor. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. – Cambridge University Press, 2000. (ISBN 978-1-139-64363-4).
- Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples. Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo), 1987, no. 7, p. 34.
- Ильинский В.А., Костылева Л.В., Гребнев Ю.В. Оптимизация состава литой среднеуглеродистой стали // Сталь. 1985. № 1. С. 24 – 26.
- Костылева Л.В., Гребнев Ю.В., Ильинский В.А. Дендритная ликвация в отливках из углеродистой стали // Литейное производство. 2000. № 4. С. 13 – 15.
- Болух В.А., Шинский И.О. Повышение механических свойств крупных стальных отливок путем их армирования при ЛПМ // Процессы литья. 2010. № 2. С. 57 – 62.
- Кульбовский И.К., Солдатов В.Г., Мануев М.С. Повышение механических свойств низколегированной стали для ответственных отливок железнодорожного транспорта // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 4. С. 3 – 6.
- Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Металлургия, 1981. – 63 с.
- Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница”-SSA: анализ временных рядов: учебное пособие. – СПб.: BBM, 2004. – 76 с. (ISBN 5-96510019-1).
- Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода “Гусеница”-SSA. // ExponentaPro. Математика в приложениях. 2004. Вып. 3-4. С. 54 – 61.
- Golyandina N., Osipov E. The ‘Caterpillar’-SSA method for analysis of time series with missing values // J. Stat. Plan. Inference. 2007, no. 137 (8), pp. 2642 – 2653.
- Golyandina N., Usevich K. (2010): 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory. In: Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications. (Olshevsky V. and Tyrtyshnikov E. ed.). World Scientific Publishing, pp. 449 – 473.

Поступила 31 марта 2016 г.

KEY INDICATORS OF STEEL QUALITY OF CAST PRODUCTS FOR RAILWAY TRANSPORT

S.V. Knyazev¹, D.V. Skopich², E.A. Fat'yanova², A.A. Usol'tsev¹, A.I. Kutsenko¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²JSC "Indas Kholding", Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The audit of the technological process of 20GFL steel melting in arc furnaces with the capacity of six tons in Rubtsovsk branch office of JSC "Altaivagon" has revealed some problems connected with defects of mechanical properties of steel. The chemical composition of the researched samples is within the established State Standards. To confirm this fact and to reveal the cause of the defect problem the authors of the article have conducted the statistical analysis of the influence of chemical composition on the quality characteristics of mechanical properties of metal. To conduct the regression analysis and to build the model of forecasting the following algorithms there have been used: Linear Regression (LR), Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM). The solution of the problem connected with the steel defects by mechanical properties has been offered with the help of forecasting models. As the result it has been established that there are some possibilities to forecast and to control mechanical properties of steel along its melting. When receiving the forecast of defects by one of the parameters, assuming the current values of the content of chemical composition and the final conditions, one can calculate the chemical composition of steel, which can be reached on the considering melting and which will assure the absence of defects. It has been established that for the analysis of tendencies of steel quality of cast products one can use two key indicators out of two groups of mechanical properties – yield point stress σ_y and impact hardness KCV. Schematic control of the quality can be fulfilled by timing diagram of mean removal chart of the controlled parameters by the defect from its border value in standard defections. The indicator of good quality and the risk minimization is the output of the time-base diagram from the two standard defections.

Keywords: steel, forecasting, mechanical properties, chemical composition, modeling, melting, control, castings.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-128-132

REFERENCES

- Knyazev S.V., Skopich D.V., Usol'tsev A.A., Fat'yanova E.A. Forecasting of quality characteristics of 20GFL steel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2015, no. 2 (12), pp. 31–33. (In Russ.).
- Knyazev S.V., Usol'tsev A.A., Skopich D.V., Fatyanova E.A., Dolgoplov A.E. Automated system of control and diagnostics of cast-steel defects in the mass production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012039).
- Cheprasov A.I., Knyazev S.V., Usol'tsev A.A., Dolgoplov A.E., Mamedov R.O. Detection of cold cracks in the cast-steels by the methods of ultrasonic and eddy-current infrared thermography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 1–5 (012026).
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: Data mining, inference and prediction*. 2nd ed. Springer-Verlag, 2009.
- Ho Tin Kam. Random decision forests. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, Montreal, QC, 14–16 August 1995*, pp. 278–282.
- Prinzie A., Van den Poel D. Random multiclass classification: generalizing random forests to random MNL and random NB. In: *Lecture Notes in Computer Science. Dexa*, 2007, pp. 349–358.
- Statnikov A., Aliferis C.F., Hardin D.P. *A gentle introduction to support vector machines in biomedicine: Theory and methods*. World Scientific, 2011.
- Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimostei po empiricheskim dannym* [Renewal of dependences according to empiric data]. Moscow: Nauka, 1979, 448 p. (In Russ.).
- Cristianini N., Shawe-Taylor J. *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University Press, 2000.
- Antipenko V.I., Knyazev S.V. Diagnostics of steel castings production with the aid of technological pilot samples. *Soviet Castings Technology (English Translation of Liteinoe Proizvodstvo)*, 1987, no. 7, p. 34.
- Il'inskii V.A., Kostyleva L.V., Grebnev Yu.V. Optimization of composition of cast medium-carbon steel. *Stal'*. 1985, no. 1, pp. 24–26. (In Russ.).
- Kostyleva L.V., Grebnev Yu.V., Il'inskii V.A. Dendritic segregation in castings of carbon steel. *Liteinoe proizvodstvo*. 2000, no. 4, pp. 13–15. (In Russ.).
- Bolyukh V.A., Shinskii I.O. Increase of mechanical properties of large steel castings by their reinforcement at consumable patterns casting. *Protsessy lit'ya*. 2010, no. 2, pp. 57–62. (In Russ.).
- Kul'bovskii I.K., Soldatov V.G., Manuev M.S. Improvement of mechanical properties of low-alloyed steel for chargeable castings of railway transport. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2006, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
- Tylkin M.A. *Spravochnik termista remontnoi sluzhby* [Reference book of heat treatment operator of repair service]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 63 p. (In Russ.).
- Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik stali i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
- Golyandina N.E. *Metod "Gusenitsa"-SSA: analiz vremennykh ryadov: uchebnoe posobie* [Method "Caterpillar"-SSA: analysis of timing series: Manual]. St. Petersburg: VVM, 2004, 76 p. (In Russ.).
- Aleksandrov F.I., Golyandina N.E. Automation of formation of trend and periodical components of timing series in the frameworks of "Caterpillar" – SSA method. *ExponentaPro. Matematika v prilozheniyakh*. 2004, no. 3–4, pp. 54–61. (In Russ.).
- Golyandina N., Osipov E. The 'Caterpillar'-SSA method for analysis of time series with missing values. *J. Stat. Plan. Inference*. 2007, no. 137 (8), pp. 642–653.
- Golyandina N., Usevich K. (2010): 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory. In: *Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications*. Olshevsky V., Tyrtshnikov E. eds. World Scientific Publishing, pp. 449–473.

Information about the authors:

S.V. Knyazev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (krookia@mail.ru)
D.V. Skopich, Director
E.A. Fat'yanova, Engineer
A.A. Usol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production"
A.I. Kutsenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Scientific Researches Management

Received 31 March, 2016