



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-147-152>
УДК 669.14

Поступила 18.05.2019
Received 18.05.2019

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕМЕНТУЕМЫХ СТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛИВАЕМЫХ ПО ЕВРОПЕЙСКОМУ СТАНДАРТУ, ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

С. П. РУДЕНКО, А. Л. ВАЛЬКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ, Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12. E-mail: sprud.47@mail.ru

На основании данных о химическом составе цементуемых сталей, изготавливаемых по европейскому стандарту EN 10084, проведен расчет их прокаливаемости по разным методикам. Применение методик обосновано сопоставлением результатов расчета с экспериментом. Проведена оценка применимости проанализированных сталей для зубчатых колес трансмиссий отечественных мобильных машин. Разработана классификация цементуемых экономнолегированных сталей с химическим составом в соответствии с нормами EN 10084 по критерию прокаливаемости, согласно которой эти стали по применимости для зубчатых колес трансмиссий отечественной автотракторной техники можно разделить на четыре группы: для зубчатых колес с модулем до 4 мм, до 5, до 8 и до 10 мм.

Ключевые слова. Конструкционные цементуемые стали, прокаливаемость, расчет прокаливаемости, модуль зубчатого колеса.

Для цитирования. Руденко, С. П. Перспективы применения цементуемых сталей, изготавливаемых по европейскому стандарту, для зубчатых колес отечественных мобильных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 147–152. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-147-152>.

THE PERSPECTIVE OF APPLICATION OF CARBURIZED STEELS, MANUFACTURED ACCORDING TO EUROPEAN STANDARD, FOR GEARS OF DOMESTIC MOBILE MACHINES

S. P. RUDENKO, A. L. VALKO, S. G. SANDOMIRSKY, Joint Institute of Mechanical Engineering of the
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus. 12, Akademicheskaya str. E-mail: sprud.47@mail.ru

Based on the data on the chemical composition of cemented steels produced according to the European standard EN 10084, the calculation of their hardenability by different methods was carried out. The use of methods is justified by comparing the results of the race with the experiment. The assessment of applicability of the analyzed steels for gears of transmissions of domestic mobile machines is carried out. The classification of cemented economically alloyed steels with chemical composition according to EN 10084 norms according to the criterion of hardenability is developed, according to which these steels can be divided into 4 groups according to the applicability for transmission gears of domestic automotive technology: for gears with a module of up to 4 mm, up to 5 mm, up to 8 mm and up to 10 mm.

Keywords. Structural steels, case carburizing, hardenability, hardenability calculation, gear module.

For citation. Rudenko S. P., Valko A. L., Sandomirsky S. G. The perspective of application of carburized steels, manufactured according to European standard, for gears of domestic mobile machines. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 147–152. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-147-152>.

К сталям, используемым в автомобильной промышленности, предъявляют высокие требования по обеспечению характеристик сопротивления усталости, способствующих снижению массы изделий, и обеспечению норм безопасности. Повышенные требования к эксплуатационным характеристикам зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин обуславливают использование для их изготовления комплекснолегированных марок сталей, обладающих высокими механическими свойствами. Для таких деталей широко применяют дорогостоящие никельсодержащие марки конструкционных сталей типа 20X2H4A, 18X2H4BA, 20XH3A, 20XH3MA [1–3]. Растущие требования потребителей в условиях рыночной экономики заставляют производителей проката искать способы снижения его себестоимости без потери эксплуатационных качеств. Эта задача может быть решена путем применения экономнолегиру-

ванных конструкционных сталей с высокими физико-механическими свойствами и повышенной обрабатываемостью резанием. Эффективность применения экономнолегированных сталей для высоконапряженных деталей трансмиссий энергонасыщенных машин, в частности зубчатых колес коробки передач трактора «Беларус» и планетарной конечной передачи промышленного трактора D9G фирмы «Caterpillar», показана в [4, 5]. Перспективным является регламентированное обеспечение заданной структуры металла, его механических свойств и прокаливаемости.

Прокаливаемость – одна из наиболее важных характеристик термически обрабатываемых сталей. Она определяет максимальный размер сечения прокаливающегося насквозь изделия [6]. ГОСТ 4543-2016 по согласованию с потребителем регламентирует нормирование прокаливаемости ряда марок сталей. Но предприятия машиностроения в большинстве случаев не требуют нормирования прокаливаемости стального проката. Вместе с тем, именно прокаливаемость характеризует однородность структуры стали, обеспечивает заданный уровень прочностных свойств в реальных деталях и, тем самым, их работоспособность и долговечность [6].

В условиях современного производства для промышленных предприятий актуально внедрение сталей, отвечающих требованиям международных стандартов. Это позволит предприятиям получать международные сертификаты на производимые комплектующие изделия с целью поставки их на экспорт. Исходя из этого, на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» в рамках внедрения инновационных технологий [7] освоено производство проката из экономнолегированных сталей 16MnCrS5, 20MnCrS5 по DIN EN 10084 с узкими пределами разброса по химическому составу. Однако для массового внедрения на промышленных предприятиях Республики Беларусь необходимо (кроме гармонизации стандартов РБ со стандартами ЕС) гарантировать обеспечение этими сталями требований по полосе прокаливаемости.

Цель работы – оценка применимости цементуемых марок сталей, изготавливаемых по нормам EN 10084, для зубчатых колес трансмиссий отечественной автотракторной техники.

Оценку проводили по критерию прокаливаемости сталей, в качестве которого использовали параметр прокаливаемости P при получении в структуре после закалки 50% мартенсита (критерий «50% М»), которому присваивают также название «критическое расстояние или соответствующий критический диаметр». Полумартенситная структура стали, содержащая 0,14–0,2% С, характеризуется твердостью не менее 28–32 HRC [8].

Параметр прокаливаемости P (расстояние от охлаждаемого торца торцового образца до полумартенситной зоны, мм) в [9] рекомендовано определять по зависимости:

$$P = 2C[1 + Si^2 + Al^2 + Cu^2 + 7Mn^2 + 10Cr^2 + 10V^2 + 3Ni^2 + 50Mo^2 + 0,5(Si + Al)(Mn + Ni) + 3(Si + Al)Cr + Mn(Ni + Mo) + 4Ni(Cr + Mo) + 3CuCr + 10CrV], \quad (1)$$

где С, Si, Cu, Mn, Cr, V, Ni, Mo – содержание соответствующих химических элементов, мас. %.

Широко известным математическим методом расчета прокаливаемости является предложенный М. А. Гроссманом метод, основанный на системе коэффициентов-множителей [10], характеризующих влияние химических элементов вне зависимости от присутствия других элементов. Данный метод положен в основу американского стандарта ASTM A 255-07, разработанного с учетом базы данных по прокаливаемости 5000 плавок разных конструкционных сталей и многолетней экспериментальной проверки математической модели.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработаны методика и программа расчета прокаливаемости конструкционных сталей [11] с учетом существенных поправок к методу [10]. При расчете учитываются степень легированности стали, величина зерна и совместное влияние легирующих элементов.

Разработанные методика и программа расчета прокаливаемости прошли апробацию при расчете конструкционных сталей, производимых ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» для автомобильной промышленности стран Европейского Союза. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчета прокаливаемости по программе «H-Steel» (кривые 1) в сравнении с экспериментальными данными торцевой закалки (кривые 2) и расчетом по регрессионным уравнениям (программа «SEP 1664», кривые 3), полученным на Белорусском металлургическом заводе для двух плавок стали 20MnCrS5 [12]. Приведенные результаты показывают хорошую сходимость результатов расчета по программе «H-Steel» с экспериментальными данными и расчетами по программе «SEP 1664» (рис. 1).

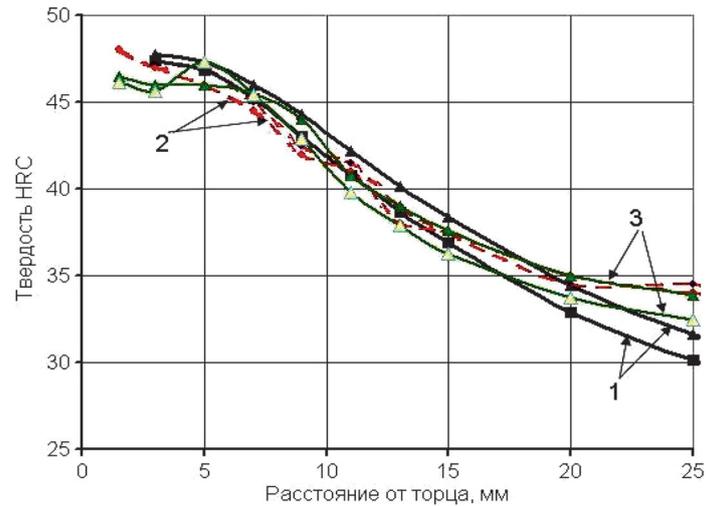


Рис. 1. Сравнение результатов расчета прокаливаемости стали 20MnCrS5 (зерно № 7,5) по программам «H-Steel» (1) и «SEP 1664» (3) с экспериментальными данными (2)

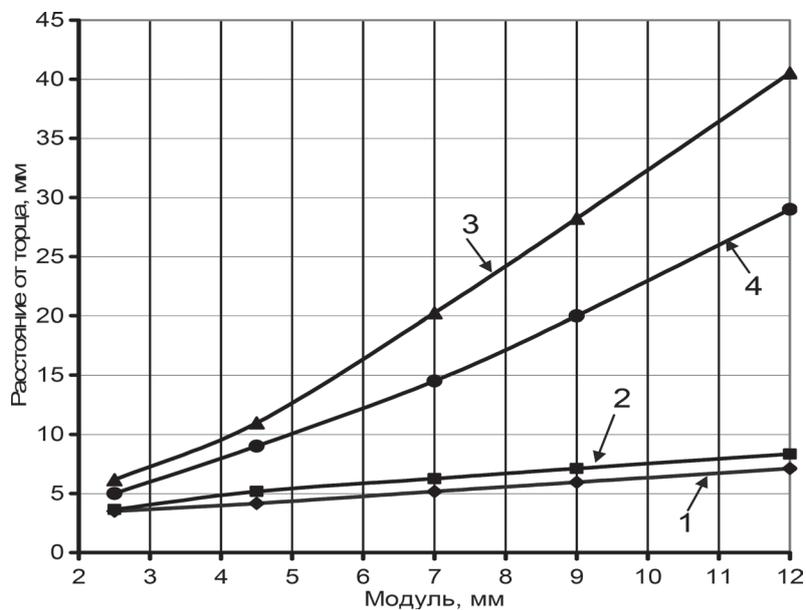


Рис. 2. Зависимость между расстоянием от торца при испытании по методу торцевой закалки и модулем зубчатого колеса при разной интенсивности охлаждения для различных расстояний от поверхности по сечению зуба: 1 – на поверхности в средней части зуба; 2 – на расстоянии 1 мм от поверхности в средней части зуба; 3 – в сердцевине в районе ножки зуба при интенсивности закалки $H = 0,3$; 4 – в сердцевине в районе ножки зуба при интенсивности закалки $H = 0,45$

Получаемые применительно к торцовым образцам расчетные кривые прокаливаемости характеризуют свойства данной марки стали, но не позволяют непосредственно оценить прокаливаемость зубчатого колеса с аналогичным распределением углерода по толщине слоя детали, поскольку степень упрочнения определяется не только прокаливаемостью самой стали, но и размером и формой изделия, а также интенсивностью охлаждения при закалке, которая характеризует охлаждающую способность закалочных баков.

Для оценки применимости марки стали для зубчатых колес трансмиссий отечественных мобильных машин использовали зависимость, полученную в [13], характеризующую равенство скоростей охлаждения в разных зонах по поперечному сечению зубьев и скоростей охлаждения по длине торцового образца при торцевой закалке. Зависимость представлена на рис. 2 в виде графика с координатами: расстояние от торца торцового образца (аналог параметра l) и модуль зубчатого колеса, охлаждаемого с разной интенсивностью H [13].

По величине параметра прокаливаемости l (1) или по расстоянию от охлаждаемого торца торцового образца до зоны с полумартенситной структурой и твердостью 28–32 HRC, получаемого при виртуальном моделировании торцевой закалки исследуемых сталей по программе «H-Steel» при среднем содер-

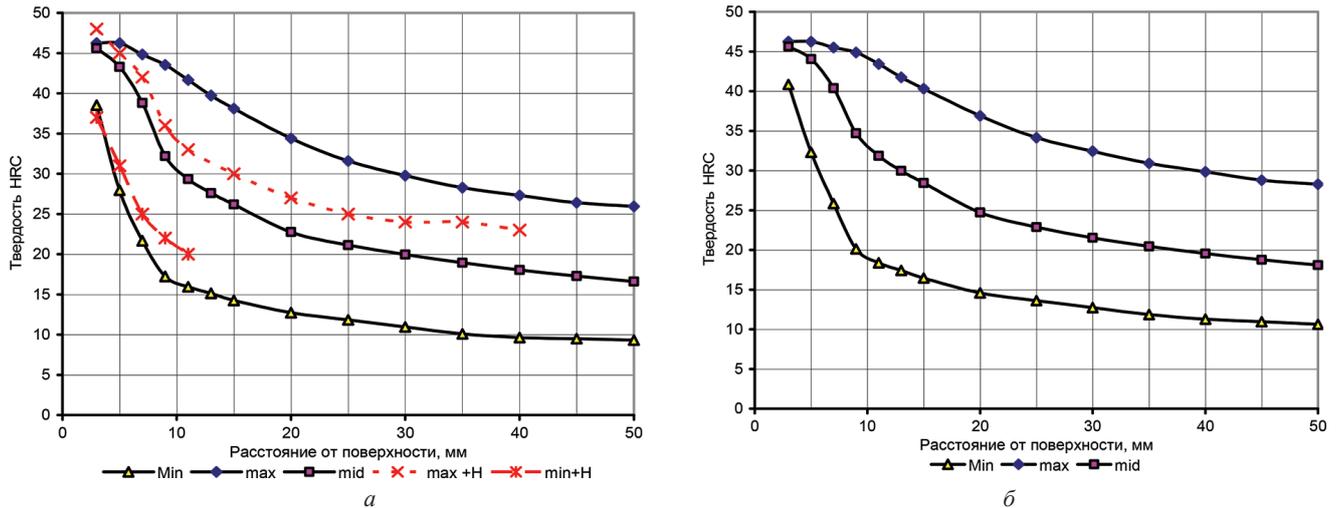


Рис. 3. Прокаливаемость стали 20NiCrMo2-2 (а) и ее аналога 20XГНМ ГОСТ 4543-2016 (б)

жании легирующих элементов, определяли соответствующие этому параметру размеры зубчатого колеса, выраженные через его модуль.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета по программе «H-Steel» прокаливаемости хромоникельмолибденовой стали 20NiCrMo2-2 № 1.6523 и ее аналога – стали 20XГНМ, ГОСТ 4543-2016. Для сравнения на рис. 3, а приведена полоса нормируемой прокаливаемости (пунктирные линии) согласно DIN EN 10084-2008. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Прокаливаемости стали 20NiCrMo2-2 и ее аналога 20XГНМ одинаковые. Сталь с молибденом обладает повышенной твердостью и прочностью, что обуславливает ее использование для изготовления деталей редукторов, шестерен, болтов, валов, втулок, соединительных муфт в условиях повышенных динамико-вибрационных нагрузок. Использование этой стали обеспечивает минимальный износ и деформацию деталей и максимальный срок их эксплуатации.

Параметр прокаливаемости этой стали, рассчитанный по формуле (1), $P = 2,8-10,2$ мм при минимальном и максимальном содержании легирующих элементов и $P = 6,4$ мм при среднем. Полученные величины не соответствуют результатам расчета прокаливаемости по программе «H-Steel» (рис. 3, а), согласно которым $P = 9$ мм для среднего для этой стали содержания легирующих элементов. Данная величина установлена по рис. 3, а для полумартенситной структуры стали 20NiCrMo2-2, характеризующейся твердостью 32 HRC на расстоянии от охлаждаемого торца 9 мм. С учетом последних данных на основании зависимости на рис. 2 определяем, что сталь 20NiCrMo2-2 может быть применена для изготовления зубчатых колес силовых передач среднего модуля (до 4 мм).

В таблице приведены результаты расчета параметра прокаливаемости по формуле (1) и программе «H-Steel» экономнолегированных конструкционных цементуемых сталей с химическим составом в соответствии с DIN EN 10084. Анализ результатов показывает, что параметр прокаливаемости, рассчитываемый по зависимости (1) [9], не в полной мере совпадает с результатами расчета по программе «H-Steel». Поэтому при оценке применимости исследованных марок сталей параметр прокаливаемости определяли как расстояние от охлаждаемого торца до полумартенситной структуры с твердостью не менее 32 HRC (при 0,2% C) по кривой прокаливаемости, рассчитанной по программе «H-Steel» для среднего химического состава.

Применимость сталей для зубчатых колес оценивали по величине модуля (m), характеризующего габаритные размеры и величину передаваемой нагрузки силовых передач. На основании результатов исследований разработана классификация по критерию прокаливаемости цементуемых экономнолегированных сталей с химическим составом согласно нормам EN 10084 (см. таблицу). Классификация разработана при содержании легирующих элементов, обеспечивающих в пределах полосы прокаливаемости среднюю прокаливаемость сталей. При фактическом содержании легирующих элементов разработанная классификация сталей по критерию прокаливаемости может быть уточнена.

Полученные результаты показали, что конструкционные цементуемые стали с химическим составом в соответствии с DIN EN 10084 по применимости для зубчатых колес трансмиссий отечественной авто-тракторной техники можно разделить на четыре группы. К группе 1 (см. таблицу) относятся стали №

Классификация цементуемых экономнолегированных сталей с химическим составом согласно нормам DIN EN 10084

Номер стали	Стандарт DIN EN 10084	Номер мат.	Параметр прокаливаемости по зависимости (1) [9], мм	Параметр прокаливаемости по программе H-Steel, мм	Модуль зубчатых колес m , мм	Аналог по ГОСТ 4543-2016
1	16MnCr5	1.7131	7,0	9	≤4	17ХГ
2	16NiCr4	1.5714	7,1	9		14ХГН
3	20MoCr3	1.7320	6,6	9		–
4	20NiCrMo2-2	1.6523	6,4	10	≤5	20ХГНМ
5	18CrMo4	1.7243	7,6	10		20ХМ
6	18NiCr5-4	1.5810	12	10		19ХГН
7	20MoCr4	1.7321	8,4	11		–
8	17CrNi6-6	1.5918	18,5	13		–
9	17NiCrMo6-4	1.6566	11	20	≤8	–
10	20NiCrMoS6-4	1.6571	12,8	20		–
11	20MnCr5	1.7147	11,3	23		–
12	22MoCrS3-5	1.7333	11,5	25		–

1–3 с параметром прокаливаемости $P = 9$ мм, которые применимы для зубчатых колес малого и среднего модуля до 4 мм (см. рис. 2). Аналогами являются стали 17ХГ, 14ХГН, ГОСТ 4543-2016. К группе 2 относятся стали № 4, 8 с $P = 10–13$ мм, которые применимы для зубчатых колес среднего модуля до 5 мм. К аналогам этих сталей относятся стали 20ХМ, 20ХГНМ, 19ХГН, ГОСТ 4543-2016. К группе 3 относятся стали № 9–11 с $P = 20–23$ мм, которые применимы для зубчатых колес с модулем до 8 мм. Аналогов этой стали в ГОСТ 4543-2016 нет. К группе 4 относится сталь № 12 (22MoCrS3–5) с $P = 25$ мм, которая применима для высоконапряженных зубчатых колес крупного модуля до 10 мм. Аналоги этой стали в ГОСТ 4543-2016 отсутствуют.

Из полученных результатов следует, что большая часть (8 марок) рассмотренных экономнолегированных сталей, изготавливаемых по Европейскому стандарту DIN EN 10084, применима для зубчатых колес среднего модуля ($m = 4–5$ мм) и четыре марки стали – для крупномодульных зубчатых колес с модулем 8–10 мм. Отметим, что в Европейском стандарте DIN EN 10084 отсутствуют марки экономнолегированных сталей, предназначенные для изготовления крупногабаритных зубчатых колес с модулем до 12 мм.

Проведенная оценка применимости экономнолегированных цементуемых сталей с химическим составом в соответствии с DIN EN 10084 для зубчатых колес отечественных мобильных машин выполнена по критерию получения в сердцевине зуба полумартенситной структуры с твердостью не менее 30–32 HRC. Окончательное решение по применению этих сталей следует принимать с учетом прокаливаемости диффузионных слоев цементованных образцов, а также механических характеристик при статическом и динамическом нагружении с учетом конкретных условий эксплуатации деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Меньшикова Т. Я., Повар В. И.** Высокопрочная цементуемая сталь для тяжело нагруженных деталей машин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1988. № 6. С. 17–19.
2. **Тельдеков В. А., Мерилова Е. А., Шевчук В. П.** Комплекснолегированная сталь для тяжело нагруженных цементуемых зубчатых колес // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1987. № 5. С. 21–26.
3. **Повышение ресурса крупногабаритных зубчатых колес с использованием новых сталей / А. С. Шишко [и др.]** // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр.* 2017. Вып. 6. С. 219–225.
4. **Новая цементуемая сталь с регламентируемой прокаливаемостью для зубчатых колес трансмиссий / С. П. Руденко, и др.** // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2013. № 3. С. 57–61.
5. **Руденко С. П., Валько А. Л.** Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес // *Сталь*. 2018. № 8. С. 54–58.
6. **Гольдштейн Я. Е.** Низколегированные стали в машиностроении. М.; Свердловск: Машгиз, 1963. 240 с.
7. **Докудовский Ю. Н., Грибовский П. К., Политов В. А.** Освоение конструкционных марок сталей для автомобильной промышленности на ОАО «БМЗ» // *Литье и металлургия*. 2012. № 2. С. 75–77.
8. **Гудремон Э.** Специальные стали. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 736 с.
9. **Сильман Г. И., Серпик Л. Г., Федосюк А. А.** Рациональное управление структурой и свойствами марганцевых сталей типа 20ГЛ с использованием показателя прокаливаемости. Ч. 1. О возможности и целесообразности использования показателя прокаливаемости для нормализуемых марганцевых сталей типа 20ГЛ // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 2. С. 3–8.
10. **Grossmann M.** Elements of Hardenability, 98. ASM. Cleveland, 1952.

11. **Компьютерная** программа «Расчет прокаливаемости конструкционных сталей (H-Steel)»: Св-во № 846. Респ. Беларусь; правообладатель ОИМ НАН Беларуси. – № С20150109; заявл. 03.11.15; опубл. 12.01.16 // Реестр зарегистрир. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности. 2016. 55 с.
12. **Универсальная** программа расчета прокаливаемости конструкционных сталей / С. П. Руденко и др. // Тр. 23-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь». Жлобин, 21–22 октября 2015. С. 116–122.
13. **Руденко С. П., Валько А. Л.** Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономнолегированной стали // Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 2. С. 34–38.

REFERENCES

1. **Men'shikova T. Ja. Povar V. I.** Vysokoprochnaja cementuemaja stal' dlja tjazhelonagruzhennyh detalej mashin [High-strength a case-hardening steel for high-energy machine components]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1988, no. 6, pp. 17–19.
2. **Tel'dekov V. A., Merilova E. A., Shevchuk V. P.** Kompleksnolegировannaja stal' dlja tjazhelonagruzhennyh cementuemyh zubchatyh koles [Complex alloyed steel for high-tensional case-hardening tooth gears]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 1987, no. 5, pp. 21–26.
3. **Shishko A. S., Moiseenko E. A., Sidorenko A. G.** Povyshenie resursa krupnogabaritnyh zubchatyh koles s ispol'zovaniem novyh stalej [Raise of a resource of large-sized tooth gears with use of new steels]. *Trudy OIM NAN Belarusi «Aktualnye voprosy mashinovedenija» = Proc. of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus «Topical Issues of Mechanical Engineering»*, 2017, no. 6, pp. 219–225.
4. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Dudeckaja L. R., Emeljanovich I. V.** Novaja cementuemaja stal' s reglamentiruemoj prokalivaemost'ju dlja zubchatyh koles transmissij [New carburized steel with regulated hardenability for gears of transmissions]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2013, no. 3, pp. 57–61.
5. **Rudenko S. P., Val'ko A. L.** Osobennosti primeneniya jekonomnolegировannyh stalej dlja krupnomodul'nyh zubchatyh koles [Feature of application of the economical steel alloy for largely modular gear wheels]. *Stal' = Steel*, 2018, no. 8, pp. 54–58.
6. **Gol'dshtejn Ja. E.** *Nizkolegировannye stali v mashinostroenii* [Low alloy steels in mechanical engineering]. Moscow–Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1963, 240 p.
7. **Dokudovskij Ju. N., Gribovskij P. K., Politov V. A.** Osvoenie konstrukcionnyh marok stalej dlja avtomobil'noj promyshlennosti na OAO «BMZ» [Development of constructional staals grades for automotive industry at OJSC «BSW»]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 2, pp. 75–77.
8. **Gudremon Je.** *Special'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgy Publ., 1966, part 1, 736 p.
9. **Sil'man G. I., Serpik L. G., Fedosjuk A. A.** Racional'noe upravlenie strukturoj i svojstvami margancevyh stalej tipa 20GL s ispol'zovaniem pokazatelja prokalivaemosti. Ch. 1. O vozmozhnosti i celesoobraznosti ispol'zovanija pokazatelja prokalivaemosti dlja normalizuemyh margancevyh stalej tipa 20GL [Rational management of the structure and properties of manganese steel type 20GL using the index of hardenability. Part 1. About possibility and expediency of use of index of calcination for normalized manganese steels of type 20GL]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov = Physical metallurgy and heat treatment of metals*, 2011, no 2, pp. 3–8.
10. **Grossmann M.** Elements of Hardenability, 98, ASM, Cleveland, 1952.
11. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Shipko A. A.** *Komp'juternaja programma «Raschet prokalivaemosti konstrukcionnyh stalej (H-Steel)»*: [The computer (H-Steel)]. Sv-vo RB, no 846.
12. **Rudenko S. P., Shipko A. A., Val'ko A. L., Vengura A. V., Baradynceva E. P., Radionov A. V., Zahorevich S. V.** Universal'naja programma rascheta prokalivaemosti konstrukcionnyh stalej [Universal program of account of a hardness penetration of a structural steel]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2015 = Foundry production and metallurgy 2015*, Belarus, Zhlobin, 21–22 october 2015, pp. 116–122.
13. **Rudenko S. P., Val'ko A. L.** Razrabotka rezhimov himiko-termicheskaj obrabotki zubchatyh koles iz jekonomno legировannoj stali [Working of regimes of chemical heat treatment of tooth gears from economical the steel alloy]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2017, no. 2, pp. 34–38.