



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-44-49>
УДК 669.14

Поступила 15.01.2020
Received 15.01.2020

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СТАЛИ 20MnCrS5 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: sand_work@mail.ru

Проведена оценка применимости для зубчатых колес трансмиссий мобильных машин стали 20MnCrS5, изготавливаемой по европейскому стандарту EN 10084. Проведены экспериментальные исследования и виртуальное моделирование прокаливаемости данной стали по модернизированной методике. Оценка применимости цементуемой стали 20MnCrS5 для зубчатых колес отечественных мобильных машин выполнена по критерию получения по сечению зуба структур с твердостью 32 HRC для сердцевины, 50 HRC – для полупереходной зоны, 61–63 HRC – для диффузионного слоя без учета других физико-механических свойств стали. Установлено, что при содержании легирующих элементов, близком к максимальному пределу, применение данной стали возможно для зубчатых колес с модулем до 10 мм.

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

Для цитирования. Руденко, С. П. Анализ применимости стали 20MnCrS5 для зубчатых колес отечественных мобильных машин / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. Г. Сандомирский // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 44–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-44-49>.

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF STEEL 20MnCrS5 FOR GEARS OF THE DOMESTIC MOBILE MACHINES

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

Evaluation of applicability of 20MnCrS5 steel for gears of transmissions of mobile machines, manufactured according to European standard EN 10084 was carried out. Experimental and virtual simulation of hardenability of the steel according to the updated method was realized. The assessment of the applicability of 20MnCrS5 case-hardening steel for gears of the domestic mobile machines was made by the criterion of obtaining the cross section of the tooth structures with a hardness 32 HRC for core, 50 HRC for semi-conversion zone, 61–63 HRC for the diffusion layer excluding other physical and mechanical properties of steel.

It is established that at the content of alloying elements close to the maximum limit, the use of this steel is possible for gears with a module up to 10 mm.

Keywords. Constructional case – hardening steels, hardenability, hardenability calculation, gear module.

For citation. Rudenko S. P., Valko A. L., Sandomirskii S. G. Analysis of the applicability of steel 20MnCrS5 for gears of the domestic mobile machines. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 1, pp. 44–49. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-44-49>.

В настоящее время в Республике Беларусь разрабатывается нормативная база по конструкционным сталям, производимым в соответствии с европейскими нормами. При наличии СТБ по металлопрокату на машиностроительных предприятиях появится возможность использовать марки сталей, изготавливаемые ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», в конструкторской и технологической документации. Однако применение изготовленных по европейским нормам марок сталей для ответственных деталей трансмиссий отечественной автотракторной техники потребует отработки технологии изготовления, а также проведения полного цикла испытаний и сертификации. Исследования по применению марок сталей, изготавливаемых по европейским нормам, способствуют ускорению процесса их внедрения и представляют интерес в части обеспечения эксплуатационных характеристик зубчатых колес и других деталей ответственного назначения.

Перспективным направлением при анализе применимости конструкционных сталей для высоконапряженных деталей является выбор универсальных показателей, позволяющих в максимальной степени учесть комплекс механических свойств и структурных характеристик материала. Одним из таких показателей является прокаливаемость сталей. Она определяет максимальный размер сечения прокаливаемого насквозь изделия, характеризует однородность структуры стали, обеспечивает заданный уровень прочностных свойств в реальных деталях и, тем самым, их работоспособность и долговечность [1].

На основе экспериментальных исследований и виртуального моделирования прокаливаемости стали в условиях торцевой закалки в данной работе сделана оценка области применения для зубчатых колес трансмиссий мобильных машин стали 20MnCrS5 (DIN EN 10084:2008–06, № 1.7149), производимой ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» для нужд производства автокомпонентов машиностроительными предприятиями в странах Европейского Союза.

Виртуальное моделирование торцевой закалки стали является высокоэффективным средством исследования, позволяющим прогнозировать результаты, которые в большинстве случаев недостижимы при экспериментальных исследованиях. Основное требование к виртуальному моделированию – соответствие с результатами экспериментальных исследований.

В настоящее время разработано множество математических моделей прокаливаемости. Наиболее известным и широко применяемым из них является метод М. А. Гроссмана [2]. В частности, данный метод использован при разработке стандарта ASTM A255–07, который обоснован многолетней практикой его применения предприятиями США.

Рассмотрим результаты исследований прокаливаемости стали 20MnCrS5 разными методами.

Сталь 20MnCrS5 относится к классу хромомарганцевых и отличается от всех марок цементуемых сталей, представленных в DIN EN 10084:2008–06, повышенным содержанием хрома (1,0–1,3%) и марганца (1,1–1,2%) (см. таблицу).

Химический состав стали 20MnCrS5

Химический состав, %											
C	Si	Ni	Mn	Mo	Ti	Cr	Cu	V	Nb	P	S
0,2090	0,3440	0,1650	1,2100	0,0240	0,0051	1,2020	0,2400	0,0080	0,0084	0,018	0,035

На рис. 1 показаны полоса нормируемой прокаливаемости стали 20MnCrS5+H, экспериментальные данные торцевой закалки и результаты расчета прокаливаемости по стандарту ASTM A255-07. Из рисунка видно, что экспериментальные данные торцевой закалки находятся в пределах полосы нормируемой прокаливаемости по DIN EN 10084-2008. Результаты расчета прокаливаемости по стандарту ASTM

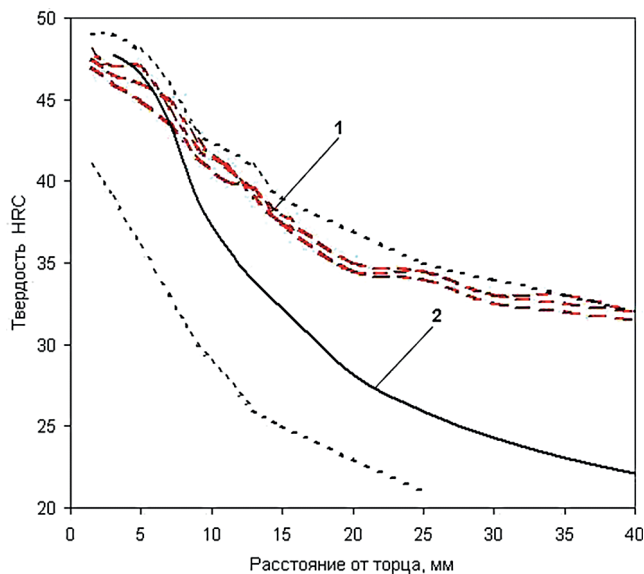


Рис. 1. Прокаливаемость стали 20MnCrS5 +H (зерно № 7,5): 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по стандарту ASTM A255-07; пунктирные линии – полоса нормируемой прокаливаемости по DIN EN 10084-2008

A255-07 не согласуются с экспериментальными данными и значительно занижены. Данное обстоятельство указывает на то, что в методике М. А. Гроссмана не в полной мере учитываются степень легированности стали и совместное влияние легирующих элементов на прокаливаемость.

Анализ химического состава стали 20MnCrS5 свидетельствует о наличии микродобавок сильных карбидообразующих элементов (см. таблицу): титана, ванадия и ниобия. Установлено [3], что присутствие в стали титана и других легирующих элементов, образующих труднорастворимые карбиды, позволяет связать часть углерода в специальный карбид, т. е. создать дефицит по углероду и этим способствовать переводу некоторого количества легирующих элементов в твердый раствор. Это явление усиливается при концентрации марганца и хрома более 2,0–2,5% [4]. Вследствие этого облегчается растворение этих элементов в аустените при относительно низких температурах нагрева под закалку, что повышает прокаливаемость стали.

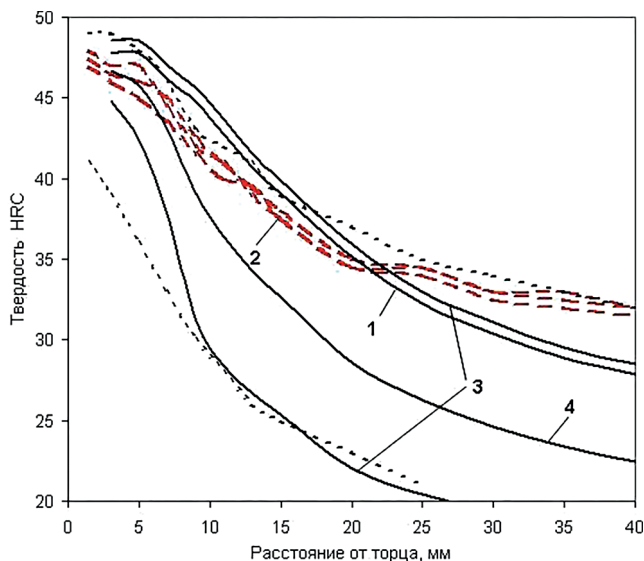


Рис. 2. Прокаливаемость стали 20MnCrS5 +H (зерно № 7,5): 1 – расчет по программе H-Steel; 2 – экспериментальные данные; 3 – расчет по программе H-Steel с максимальным и минимальным легированием; 4 – расчет по программе H-Steel со средним содержанием легирующих элементов; пунктирные линии – полоса нормируемой прокаливаемости по DIN EN 10084-2008

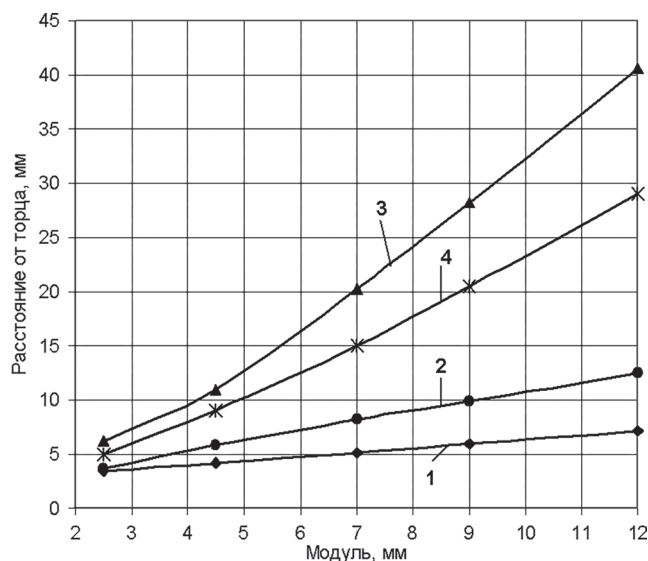


Рис. 3. Зависимость между расстоянием от торца при испытании по методу торцевой закалки и модулем зубчатого колеса при разной интенсивности охлаждения для различных расстояний от поверхности по сечению зуба: 1 – на поверхности в средней части зуба; 2 – на расстоянии от поверхности до полупереходной зоны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

Установленная закономерность была учтена в модернизированной методике расчета прокаливаемости [5], реализованной в программе H-Steel [6] (рис. 2).

Приведенные на рисунке результаты показывают хорошую сходимость результатов расчета по программе H-Steel прокаливаемости стали 20MnCrS5 +H с полосой нормируемой прокаливаемости по DIN EN 10084–2008 и экспериментальными данными торцевой закалки. Получено, что результаты расчета прокаливаемости стали 20MnCrS5 +H по программе H-Steel совпадают с экспериментальными данными как при фактическом химическом составе, так и с полосой прокаливаемости при максимальном и минимальном легировании.

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 закалочной среды [7].

Для оценки применимости марки стали по критерию прокаливаемости для зубчатых колес трансмиссий отечественных мобильных машин использовали зависимость между расстоянием h от закаленного торца торцового образца и модулем m зубчатого колеса, полученную при сопоставлении скоростей охлаждения по длине закаленного торцового образца со скоростями охлаждения в разных сечениях зуба после закалки зубчатого колеса с разной интенсивностью охлаждения (рис. 3) [8].

Оценку применимости проводили по величине твердости, определяемой в трех зонах: в сердцевине с твердостью 32 HRC, содержащей 0,2% C; в середине переходной зоны с твердостью 50 HRC, содержащей 0,35% C; в диффузионном слое с твердостью 61–63 HRC, содержащим 0,6–0,7% C [9]. По изотермическим диаграммам прокаливаемости стали 20MnCrS5, полученным при расчете по программе H-Steel при разном содержании углерода (рис. 4), определяли соответствующие расстояния от охлаждаемого торца торцового образца из той же марки стали с указанными выше величинами твердости: 50 и 61–63 HRC. Причем расстояние от торца для твердости сердцевины 32 HRC определяли по рис. 2 для среднего содержания легирующих элементов в стали (кривая 4). Получено, что для сердцевины соответствующее расстояние от торца равно 17 мм (см. рис. 2), для полупереходной зоны – 19 и для диффузионного слоя – свыше 35 мм (рис. 4).

Далее, используя зависимости, приведенные на рис. 3, определяли величины модуля зубчатого колеса, соответствующие полученным расстояниям. Установлено, что применение стали 20MnCrS5 для зубчатых колес при регламентировании твердости сердцевины 32 HRC ограничивается модулем 7 мм при

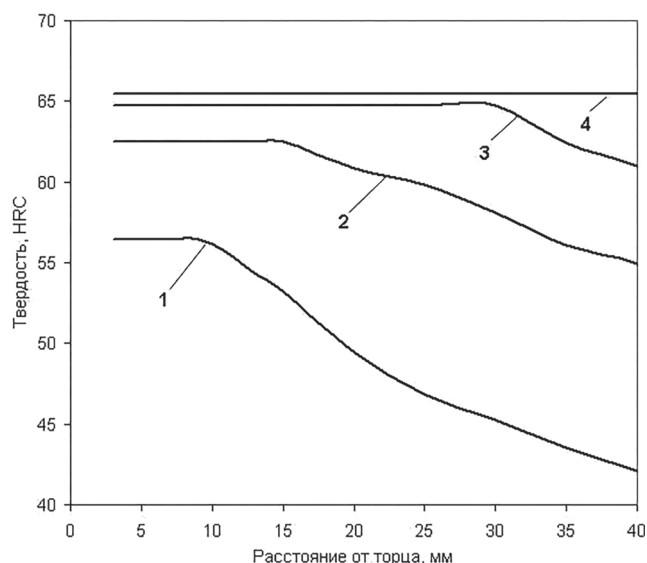


Рис. 4. Изоуглеродная диаграмма прокаливаемости стали 20MnCrS5: 1–4 – содержание углерода соответственно 0,35, 0,5, 0,6, 0,7%

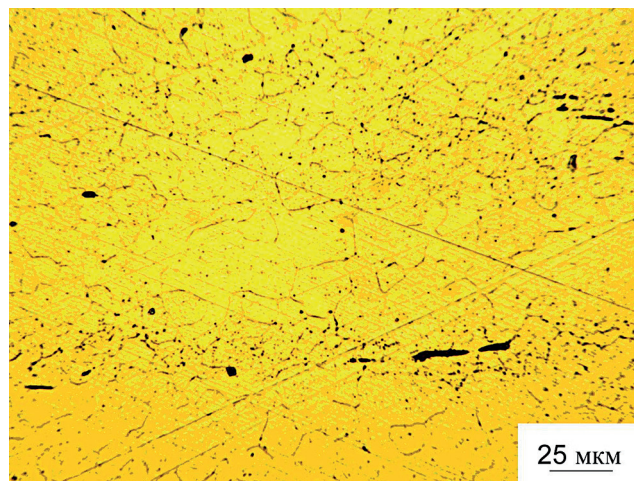


Рис. 5. Микроструктура цементованного слоя образца стали марки 20MnCrS5 после цементации и закалки

среднем содержании легирующих элементов в соответствии с DIN EN 10084–2008. При содержании легирующих элементов, близком к максимальному пределу, соответствующее расстояние от торца увеличивается до 30 мм (см. рис. 2). В соответствии с рис. 3 применение данной стали возможно для зубчатых колес с модулем до 10 мм.

Условия обеспечения твердости 50 HRC для полупереходной зоны и 61–63 HRC для диффузионного слоя выполняются для зубчатых колес с модулем до 12 мм. При изменении выбранных критериев по величинам твердости результаты применимости стали для зубчатых колес также будут изменяться.

Таким образом, проведенный анализ показал, что сталь 20MnCrS5 обладает высокой прокаливаемостью и применима для зубчатых колес с модулем до 6,5–10 мм в зависимости от легированности. Однако в отечественном машиностроении хромомарганцевые стали для высоконапряженных крупномодульных зубчатых колес не применяются. По-видимому, это связано с тем, что хромомарганцевая сталь при содержании в ней хрома и марганца в пределах 1,0–1,5% каждого обладает повышенной склонностью к обратимой отпускной хрупкости и чувствительна к хрупкому разрушению даже при низком содержании углерода [10]. Для подавления отпускной хрупкости такие стали дополнительно легируют молибденом, никелем и титаном. Поэтому в хромомарганцевых сталях по ГОСТ 4543–2016 присутствуют никель (19ХГН), титан (18ХГТ), никель и титан (15ХГН2ТА), никель, молибден, ванадий (15Х2ГМФ) и т. д.

Особенностью структурного состояния цементованных образцов из стали 20MnCrS5 является относительно крупное зерно диффузионных слоев и сердцевины (рис. 5), соответствующее № 7–7,5 по ISO 643. Критические точки A_{C3} и M_n для стали 20CrMnS5 равны соответственно 840 и 400 °С [11], следовательно, нагрев под закалку такой стали осуществляется до температуры 870 °С. При насыщении данной стали углеродом при цементации в пределах 0,9–1,0% С точка A_{C3} понижается до 770 °С, следовательно, цементованный слой закаливается на мартенсит уже с температуры 800 °С. Однако для исключения феррита в сердцевине нагрев цементованного изделия под закалку необходимо проводить до температуры 870 °С. Увеличение температуры под закалку цементованного слоя приводит к его перегреву и закономерному росту аустенитного зерна, что недопустимо применительно к высоконапряженным деталям.

Общеизвестно, что сталь с грубой структурой менее прочна и износостойка. По данным работы [12], прочность при изгибе углеродистой стали, содержащей углерод 0,7%, понижается в 1,3–1,4 раза при увеличении номера зерна с 8-го по 5-й. Предел выносливости при изгибе зубьев зубчатых колес из стали 20Х2Н4А снижается в 2 раза с увеличением номера зерна с 10-го по 5-й при равной поверхностной твердости и эффективной толщине диффузионного слоя [13]. Рекомендуемая величина зерна для высоконапряженных зубчатых колес – № 10–12 [14].

Другая особенность структуры стали 20MnCrS5 – значительные включения сульфидов из-за повышенного содержания серы (рис. 5). Сера в стали практически находится в виде сульфидов железа и марганца. Сульфиды являются основной причиной анизотропности, резко снижают пластичность и вяз-

кость. Чем больше в стали серы, тем больше полосчатость, которая является одной из причин повышенных деформаций при ХТО, приводит к формированию неоднородной разнотельной микроструктуры цементованного слоя и понижению уровня прочностных свойств деталей. При содержании в стали серы свыше 0,01% значительно увеличивается анизотропия механических свойств. В этом случае значения ударной вязкости при поперечном расположении волокон снижаются по отношению к продольному в 6–8 раз [15]. Сталь для высоконапряженных зубчатых колес должна соответствовать классу особовысококачественной по ГОСТ 4543-2016 при содержании серы не более 0,015%.

Проведенная оценка применимости цементуемой стали 20MnCrS5 с химическим составом в соответствии с DIN EN 10084 для зубчатых колес отечественных мобильных машин выполнена по критерию получения по сечению зуба структур с твердостью 32 HRC для сердцевин, 50 HRC – для полупереходной зоны, 61–63 HRC – для диффузионного слоя без учета других физико-механических свойств стали. По критерию прокаливаемости сталь 20MnCrS5 применима для зубчатых колес с модулем до 7–10 мм. Однако качество структуры диффузионных слоев и сердцевины деталей из этой стали, упрочненных химико-термической обработкой, не соответствует техническим требованиям к высоконапряженным зубчатым колесам трансмиссий автотракторной техники по величине действительного зерна и содержанию неметаллических включений.

Приведенные результаты подтверждают вывод о необходимости корректировки химического состава стали 20MnCrS5, сделанный в работе [16] применительно к стали 16MnCrS5, введением системы модифицирующих элементов (V, Nb, Ti), способствующих уменьшению размера действительного зерна, с необходимостью принятия мер по снижению содержания серы до рекомендуемого предела. Указанные добавки модифицирующих элементов и требования по содержанию серы должны быть учтены в разрабатываемой нормативной базе Республики Беларусь по конструкционной стали 20MnCrS5, производимой в соответствии с европейскими нормами на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Реализация данных рекомендаций даст основания о применении стали 20MnCrS5 для зубчатых колес отечественных мобильных машин без проведения энергоемких испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Я. Е. Низколегированные стали в машиностроении. М.; Свердловск: Машгиз, 1963. 240 с.
2. Grossmann M. Elements of Hardenability, 98. ASM. Cleveland, 1952.
3. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали. М.: Металлургиздат, 1960. 252 с.
4. Фрактография прокаливаемости и свойства сплавов / М. П. Браун [и др.]. Киев: Наукова думка, 1966. 312 с.
5. Руденко С. П., Валько А. Л., Сандомирский С. Г. Применение стандарта ASTM A255-07 для расчета прокаливаемости сталей, изготавливаемых по ГОСТ 4543-2016 // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 3. С. 51–57.
6. 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 зарегистрированных компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности. 2016. 55 с.
7. Руденко С. П., Валько А. Л. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин. Минск: Белорусская наука, 2014. 126 с.
8. 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.
9. Технология термической обработки стали / Рейнхард Бернст, Зигфрид Бемер и др.; пер. с нем. Б. Е. Левина; под ред. Бернштейна. М.: Металлургия, 1981. 608 с.
10. Браун М. П. Влияние легирующих элементов на свойства стали. Киев: ГИТЛ УССР, 1962. 192 с.
11. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: справ. термиста. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Металлургия. 495 с.
12. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справ. под общ. ред. В. Д. Кальнера. М.: Машиностроение, 1984. 384 с.
13. Сусин А. А., Руденко С. П. Изгибная усталость, структура и субмикроструктура конструкционных химико-термически упрочненных сталей // Докл. НАН Беларуси. 2002. Т. 46. № 2. С. 111–114.
14. Руденко С. П., Валько А. Л., Мосунов Е. И. Технические требования к качеству цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Автомобильная промышленность. 2011. № 9. С. 33–36.
15. Руденко С. П., Валько А. Л., Парфенчик В. Н. Влияние содержания серы на анизотропию пластических свойств конструкционных сталей // Сталь. 2018. № 2. С. 46–49.
16. Ковалева И. А., Овчинникова И. А., Стефанович С. В. Разработка мероприятий по оптимизации химического состава в цементуемой марке стали 16MnCrS5 для устранения причин возникновения роста крупных аустенитных зерен // Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 49–56.

REFERENCES

1. Gol'dshtejn Ja. E. *Nizkolegированные стали в машиностроении* [Low alloy steels in mechanical engineering]. Moscow–Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1963, 240 p.

2. **Grossmann M.** Elements of Hardenability, 98, ASM, Cleveland, 1952.
3. **Entin R. I.** *Prevrashcheniya austenita v stali* [Transformation of austenite into steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1960. 252 p.
4. **Braun M. P.** *Fraktografiya prokalivaemosti i svoystva splavov* [Fractography of hardenability and properties of alloys]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1966. 312 p.
5. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Sandomirskij S. G.** Primenenie standarta ASTM A255–07 dlya raschet prokalivaemosti stalej, izgotavlivaemyh po GOST 4543-2016 [Application of ASTM standard A255–07 for the calculation of hardenability of steels produced according to GOST 4543-2016]. *Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines mechanisms and materials*, 2019, no. 3, pp. 51–57.
6. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Shipko A. A.** *Komp'yuternaja programma «Raschet prokalivaemosti konstrukcionnyh stalej (H-Steel)»* [The computer (H-Steel)]. Sv. RB, no 846. 55 p.
7. **Rudenko S. P., Val'ko A. L.** *Kontaktnaya ustalost' zubchatyh koles transmissij energonasyshchennyh mashin* [Contact fatigue of gears of transmission of high-power machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p.
8. **Rudenko S. P., Val'ko A. L.** Razrabotka rezhimov himiko-termicheskoj obrabotki zubchatyh koles iz jekonomno legirovannoj stali [Working of regimes of chemical heat treatment of tooth gears from economical the steel alloy]. *Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines mechanisms and materials*, 2017, no. 2, pp. 34–38.
9. **Bernst R., Bemmer Z. i dr.** *Tekhnologiya termicheskoj obrabotki stali* [Steel heat treatment technology]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 608 p.
10. **Braun M. P.** *Vliyanie legiruyushchih elementov na svoystva stali* [Effect of alloying elements on steel properties]. Kiev, GITL USSR Publ., 1962. 192 p.
11. **Popov A. A., Popova L. E.** *Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereohlazhdenno go austenita* [Isothermal and thermokinetic diagrams of supercooled austenite decay]: Spravochnik termista. 2-e izd., isprav. i dop. Moscow, Metallurgija Publ., 495 p.
12. **Kontrol' kachestva termicheskoj obrabotki stal'nyh polufabrikatov i detalej** [Quality control of heat treatment of steel semi-finished products and parts]: cprav. pod obshch. red. V. D. Kal'nera. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 384 p.
13. **Susin, A. A., Rudenko S. P.** Izgibnaya ustalost', struktura i submikrostruktura konstrukcionnyh himiko-termicheski uprochnennyh stalej [Flexural fatigue, structure and the structural submicrostructure of the chemical-thermally toughened steels]. *Doklady NAN Belarusi = Proceedings of National Academy of Sciences of Belarus*, 2002, vol. 46, no. 2. pp. 111–114.
14. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Mosunov E. I.** Tekhnicheskie trebovaniya k kachestvu cementovannyh sloev zubchatyh koles transmissij energonasyshchennyh mashin [Technical requirements for the quality of cemented layers of gears in transmissions of high-power machines]. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive Industry*, 2011, no. 9, pp. 33–36.
15. **Rudenko S. P., Val'ko A. L., Parfenchik V. N.** Vliyanie sodержaniya sery na anizo-tropiyu plasticheskikh svoystv konstrukcionnyh stalej [Influence of sulfur content on anisotropy of plastic properties of structural steels]. *Stal' = Steel*, 2018, no 2, pp. 46–49.
16. **Kovaleva I. A., Ovchinnikova I. A., Stefanovich S. V.** Razrabotka meropriyatij po optimizacii himicheskogo sostava v cementuemoj marke stali 16MnCrS5 dlya ustraneniya prichin vozniknoveniya rosta krupnyh austenitnyh zeren [Development of action on optimization of chemical composition of carburized steel grade 16MnCrS5 to eliminate the causes of growth of large austenite grains]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 1, pp. 49–56.