

УДК 669.15

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук

ведущий научный сотрудник¹

E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО

старший научный сотрудник¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук, доц.

заведующий лабораторией металлургии в машиностроении¹

E-mail: sand_work@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.06.2019.

ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТА ASTM A 255–07 ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОКАЛИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО ГОСТ 4543–2016

Показана возможность использования стандарта ASTM A 255–07 для оценки прокаливаемости конструкционных сталей, изготавливаемых в соответствии с ГОСТ 4543–2016. Выявлены неточности стандарта в отношении корректности корреляционных зависимостей. Внесены существенные изменения и дополнения в существующую методику применительно к расчету прокаливаемости конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016. Установлены дополнительные множительные коэффициенты для расчета прокаливаемости экономно-легированных сталей. Показано, что в откорректированном виде методика расчета прокаливаемости по стандарту ASTM 255–07 характеризуется хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных для ряда конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016. Установлено, что сравнительную оценку прокаливаемости по разработанному методу следует проводить по среднему химическому составу, так как данные прокаливаемости, приведенные в ГОСТ 4543–2016, не соответствуют максимальному и минимальному содержанию легирующих элементов, по которому определяется прокаливаемость расчетным методом.

Ключевые слова: конструкционные стали, прокаливаемость, методика расчета

Исследования последних лет [1, 2] показывают, что высокая надежность ответственных зубчатых колес, в значительной степени определяющая работоспособность энергонасыщенной автотракторной техники, может быть достигнута только в результате оптимизации структуры и при обеспечении требуемой эффективной толщины упрочненных поверхностных слоев. Эффективная толщина, характеризующая распределением твердости по толщине упрочненного слоя, определяется прокаливаемостью цементованных сталей, размерами зубчатых колес и охлаждающей способностью используемых закалочных сред [1–3]. Поэтому прокаливаемость стали является важнейшим технологическим параметром для зубчатых колес.

Возможность расчета прокаливаемости важна при выборе марки стали, а также при освоении производства марок сталей с узкими пределами по химическому составу, обеспечивающими требования по полосе прокаливаемости. Одним из главных условий применения расчетных методов

определения прокаливаемости является соответствие результатов расчета и эксперимента.

Однако отечественных стандартов на расчетные методы определения прокаливаемости нет. Это сдерживает разработку новых экономно-легированных цементуемых сталей и методов их упрочнения, обеспечивающих требуемый градиент механических свойств и характеристик сопротивления усталости в диффузионном слое зубчатых колес с заданными эксплуатационными свойствами.

Целью настоящей статьи является анализ возможности использования действующих зарубежных стандартов для расчета прокаливаемости конструкционных сталей, изготавливаемых в соответствии с ГОСТ 4543–2016.

Многочисленные экспериментальные исследования позволили разработать в США стандарты J–406 SAE [4] и ASTM A 255–07 [5] на метод расчета прокаливаемости конструкционных сталей. Предлагаемая стандартами методика существенно

Таблица 1 — Содержание легирующих элементов при расчете прокаливаемости сталей
Table 1 — Composition of alloying elements in calculation of steel hardenability

Элемент	Содержание, %
Углерод	≤0,9
Марганец	≤1,95
Кремний	≤2,0
Никель	≤3,5
Хром	≤1,75
Молибден	≤0,55
Медь	≤0,55
Ванадий	≤0,20
Цирконий	≤0,25

не отличается от метода М.А. Гроссмана [6, 7] и отработана на марках сталей с химическим составом в соответствии с национальным стандартом SAE. Согласно этой методике влияние каждого легирующего элемента и величины зерна на прокаливаемость стали оценивают соответствующим эмпирическим коэффициентом. При этом прокаливаемость чистой углеродистой стали, определяемую только содержанием углерода и величиной зерна, принимают за основную, а для определения прокаливаемости легированной стали необходимо основную прокаливаемость умножить на коэффициенты, учитывающие влияние соответствующих легирующих элементов.

Точность расчета прокаливаемости конструкционных сталей стандартом ASTM A 255–07 гарантируется при следующих пределах содержания легирующих элементов (таблица 1).

Метод ASTM A 255–07 заключается в расчете идеального критического диаметра D_i с помощью

множительных коэффициентов f_i . Под термином «идеальный критический диаметр», предложенным М.А. Гроссманом, понимается диаметр цилиндрического образца, имеющего критическую твердость в идеальном случае охлаждения (при интенсивности $H = \infty$), при котором поверхность стального образца мгновенно достигает температуры закалочной жидкости. Используя D_i , можно количественно выразить прокаливаемость стали независимо от свойств закалочной среды [7].

При расчете идеального критического диаметра D_i , прежде всего, определяют базовый идеальный критический диаметр D_0 в зависимости от содержания углерода и размера действительного зерна. Затем определяют коэффициенты f_i , зависящие от содержания легирующих элементов, и умножают базовый диаметр D_0 на соответствующие коэффициенты:

$$D_i = D_0 f_i = D_0 f_{Si} f_{Mn} f_{Ni} f_{Cr} f_{Mo} f_{Cu} f_V f_{Zr}, \quad (1)$$

где D_0 — базовый диаметр при представлении результатов расчета в миллиметрах, $D_0 = 25,4 f_c$ (f_c — базовый идеальный критический диаметр в дюймах, зависящий от содержания углерода и размера действительного зерна, который в методе ASTM A 255–07 принят равным № 7); f_i — множительные коэффициенты влияния легирующих элементов (i — легирующий элемент), $f_i = f_{Si} f_{Mn} f_{Ni} \times f_{Cr} f_{Mo} f_{Cu} f_V f_{Zr}$.

Значения множительных коэффициентов определяются по приведенным в таблице 2 зависимостям.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что для описания зависимости f_c по стандарту ASTM A 255–07 пять формул расчета базового идеального критического диаметра f_c можно заменить одним уравнением регрессии:

Таблица 2 — Формулы расчета множительных коэффициентов
Table 2 — Formulas for calculating multiplying coefficients

Элемент	%	Формулы базового идеального критического диаметра f_c и множительных коэффициентов f_i
C (зерно № 7)	<0,40	$f_c = 0,54(\%C)$
	0,40–0,55	$f_c = 0,171 + 0,001(\%C) + 0,265(\%C)^2$
	0,55–0,65	$f_c = 0,115 + 0,268(\%C) - 0,038(\%C)^2$
	0,65–0,75	$f_c = 0,143 + 0,2(\%C)$
	0,75–0,90	$f_c = 0,062 + 0,409(\%C) - 0,135(\%C)^2$
Mn	<1,2	$f_{Mn} = 1,0 + (3,00 + \%C)(\%Mn)$
Si	<2,4	$f_{Si} = 1,0 + 0,7(\%Si)$
Ni	<1,5	$f_{Ni} = 1,0 + 0,363(\%Ni)$
	1,5–3,5	$f_{Ni} = 0,3211 + 1,4501(\%Ni) - 0,6119(\%Ni)^2 + 0,1253(\%Ni)^3$
Cr	<1,75	$f_{Cr} = 1,0 + 2,16(\%Cr)$
Mo	<0,55	$f_{Mo} = 1,0 + 3,0(\%Mo)$
Cu	<0,55	$f_{Cu} = 1,0 + 0,365(\%Cu)$
V	<0,20	$f_V = 1,00 + 1,73(\%V)$
Zr	<0,25	$f_{Zr} = 1,0 + 2,5(\%Zr)$

$$f_c = -0,1031 - 1,4712(\%C) - 2,5616(\%C)^2 + 2,4956(\%C)^3 - 1,1076(\%C)^4 + 1,1333(\%C)^5. \quad (2)$$

Уравнение регрессии зависимости f_c , полученное по методике М.А. Гроссмана [7], имеет вид:

$$f_c = 0,0499 + 0,9064(\%C) - 2,4531(\%C)^2 + 4,2408(\%C)^3 - 3,4223(\%C)^4 + 1,0051(\%C)^5. \quad (3)$$

Зависимости (2) и (3) для расчета базового идеального критического диаметра f_c приведены на рисунке 1. Получено, что при содержании углерода менее 0,4 % имеется значительное расхождение величин f_c , определяемых по стандарту ASTM A 255–07 (кривая 1) по сравнению с данными М.А. Гроссмана (кривая 2).

Расчетно-экспериментальная проверка показала, что расчетные значения прокаливаемости при применении методики определения базового идеального критического диаметра f_c по стандарту ASTM A 255–07 совпадает с экспериментальными для мало- и среднелегированных (содержащих Ni < 2 %) конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016 с погрешностью до 5 %. Однако для высоколегированных сталей (содержащих Ni ≥ 2%) эта погрешность возрастает до 25%. В этом случае более точные результаты получаются при применении методики М.А. Гроссмана. Кроме того, установлено, что более точное совпадение расчетных и экспериментальных данных достигается при расширенном диапазоне изменения величины зерна при определении f_c . Так, например, при производстве конструкционных сталей на ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК» для автомобильной промышленности стран Европейского Союза величина зерна проката варьируется от № 6 до № 8 [11]. Примерная зависимость меж-

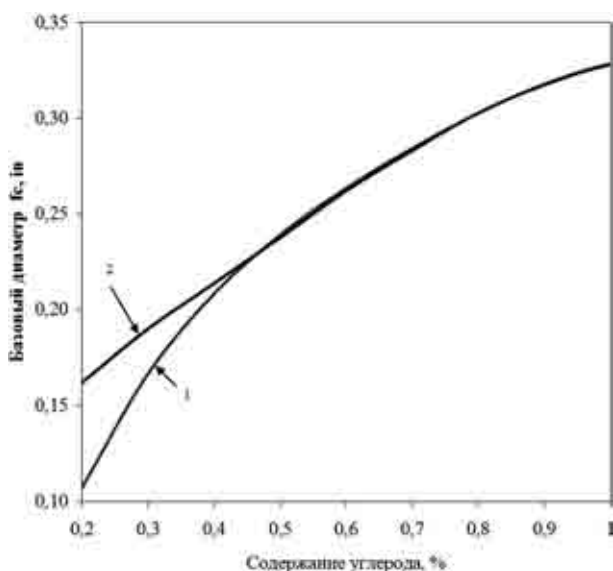


Рисунок 1 — Базовый идеальный критический диаметр f_c в дюймах. Расчет по методикам: 1 — ASTM A 255–07 [5]; 2 — М.А. Гроссман [6]

Figure 1 — Gage ideal critical diameter f_c in inches. Calculation methods: 1 — ASTM A 255–07 [5]; 2 — M.A. Grossman [6]

ду базовым идеальным критическим диаметром и содержанием углерода при величине зерна № 6–9 [6] приведена на рисунке 2.

Учитывая, что в ГОСТ 4543–2016 имеются стали, легированные титаном (0,03–0,09 %), которых нет в стандарте SAE, считаем целесообразным в формулу (1) ввести дополнительный множительный коэффициент, отражающий влияние титана на прокаливаемость [8]:

$$f_{Ti} = 2,0 - 3,2(\%C). \quad (4)$$

Разработка новых экономно-легированных конструкционных сталей [9, 10] для зубчатых колес трансмиссий мобильных машин обусловила дополнение формулы (1) множительным коэффициентом, отражающим влияние ниобия на прокаливаемость этих сталей:

$$f_{Nb} = 1,0 + 3(\%Nb). \quad (5)$$

Выражение для коэффициента f_{Nb} получено на основании экспериментальных исследований прокаливаемости цементованных слоев с переменным содержанием углерода.

Расчет кривых прокаливаемости по методикам [4, 5] заключается в определении твердости ИН, соответствующей структуре полной или неполной закалки (в зависимости от марки стали), расчете делительных коэффициентов K_f в зависимости от D_i и расчете твердости HRC на заданном расстоянии J от торца образца:

$$HRC = IN / K_f. \quad (6)$$

Твердость ИН (по Роквеллу), соответствующая структуре полной закалки (100 % мартенсита), определяется по формуле (ASTM A 255–07):

$$IN = 33,087 + 50,723(\%C) + 33,662(\%C)^2 - 2,7048(\%C)^3 - 107,024(\%C)^4 + 43,523(\%C)^5. \quad (7)$$

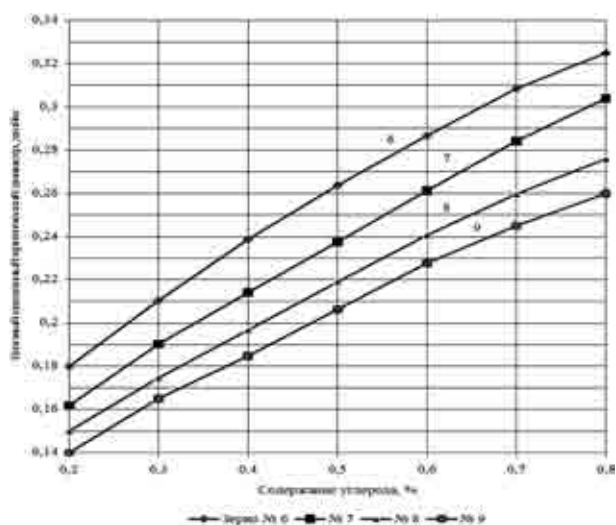


Рисунок 2 — Зависимость между базовым идеальным критическим диаметром и содержанием углерода при разной величине зерна

Figure 2 — Relationship between gage ideal critical diameter and carbon content at different grain sizes

В результате многочисленных расчетно-экспериментальных исследований прокаливаемости конструкционных сталей с химическим составом согласно ГОСТ 4543–2016 установлена необходимость расчета твердости ИН в зависимости от легированности сталей. На рисунке 3 приведен график определения твердости ИН в зависимости от коэффициента легированности K_l , равного суммарному содержанию легирующих элементов в стали. Кривая 2 на рисунке 3 соответствует уравнению (5) и коэффициенту $3 < K_l \leq 4$. Кривая 1 соответствует определению ИН при $K_l \leq 3$. Кривая 3 соответствует определению ИН при $K_l > 4$.

Делительные коэффициенты K_f определяются в зависимости от величины расчетного идеально критического диаметра D_i для заданного расстояния от торца торцового образца J по регрессионным уравнениям стандарта ASTM A 255–07 (рисунок 4). При проведении расчетов установлено несоответствие табличным данным уравнения для делительного коэффициента на расстоянии от торца 7 мм. Получено новое регрессионное уравнение для этого случая:

$$K_{f7} = 4,3291 - 0,1349D_i + 0,0023D_i^2 - 1,9961E-5D_i^3 + 8,6411E-8D_i^4 - 1,476E-10D_i^5. \quad (8)$$

В связи с уточнением диапазона изменения идеального критического диаметра D_i и увеличением его до 215 мм в методике применены новые регрессионные уравнения для расчета делительного коэффициента K_f на расстоянии от торца торцового образца $J = 35, 40, 45$ и 50 мм:

$$K_{f35} = 8,0947 - 0,2058D_i + 0,003D_i^2 - 2,3783E-5D_i^3 + 9,4765E-8D_i^4 - 1,4792E-10D_i^5; \quad (9)$$

$$K_{f40} = 8,2674 - 0,2007D_i + 0,0028D_i^2 - 2,1457E-5D_i^3 + 8,3219E-8D_i^4 - 1,2694E-10D_i^5; \quad (10)$$

$$K_{f45} = 7,7718 - 0,1633D_i + 0,002D_i^2 - 1,3869E-5D_i^3 + 5,0004E-8D_i^4 - 7,2214E-11D_i^5; \quad (11)$$

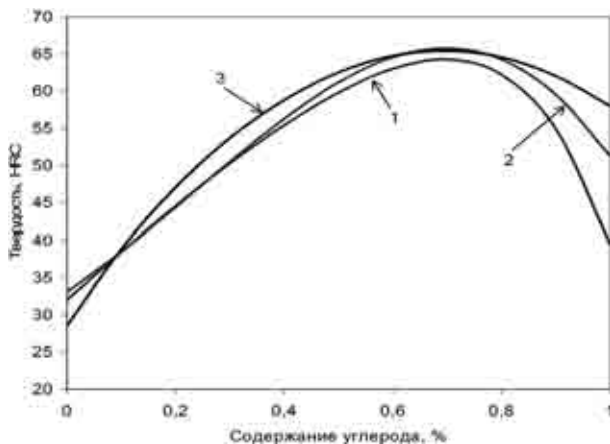


Рисунок 3 — Зависимость твердости ИН от содержания углерода при коэффициентах легированности K_l : 1 — коэффициент легированности стали $K_l \leq 3$; 2 — $3 < K_l \leq 4$; 3 — $K_l > 4$
Figure 3 — Dependence of hardness ИН on carbon content in coefficients of alloying K_l : 1 — coefficients of alloying of steel $K_l \leq 3$; 2 — $3 < K_l \leq 4$; 3 — $K_l > 4$

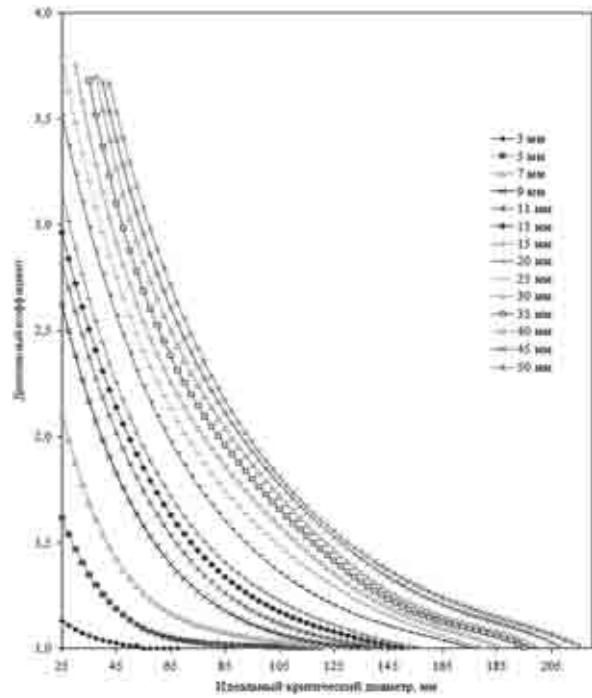


Рисунок 4 — Делительные коэффициенты K_f
Figure 4 — Dividing coefficients K_f

$$K_{f50} = 7,4315 - 0,1349D_i + 0,0014D_i^2 - 8,4198E-6D_i^3 + 2,7354E-8D_i^4 - 3,6783E-11D_i^5. \quad (12)$$

Расчет прокаливаемости конструкционных сталей, содержащих бор, аналогичен приведенному выше. Отличительными особенностями расчета бористых сталей является введение в формулу (1) дополнительного коэффициента, учитывающего содержание в стали бора f_B , и расчет делительных коэффициентов K_{fB} .

Расчет идеального критического диаметра D_i для борсодержащих сталей осуществляется по формуле:

$$D_{iB} = D_0 f_i f_B, \quad (13)$$

где f_i — множительные коэффициенты влияния легирующих элементов, определяются по уравнению (1); f_B — коэффициент, учитывающий влияние бора, определяется по методике ASTM A 255–07 в зависимости от величины показателя эффективности влияния легирующих элементов и содержания углерода.

Делительные коэффициенты K_{fB} для борсодержащих сталей определяются в зависимости от величины расчетного идеально критического диаметра D_{iB} для заданного расстояния от торца торцового образца J .

В связи с выявленным несоответствием в стандарте ASTM A 255–07 регрессионных уравнений табличным данным для делительных коэффициентов K_{fB} , определяемых на расстояниях от торца 3, 5, 9, 13 мм, а также уточнением диапазона изменения идеального критического диаметра D_{iB} и увеличением его до 210 мм, в методике применены новые регрессионные уравнения для расчета

Таблица 3 — Уравнения регрессии для определения делительных коэффициентов K_{fB}
 Table 3 — Regression equations for determining dividing coefficients of K_{fB}

J , мм	D_p , мм	Делительные коэффициенты K_{fB}
3,0	$\leq 65,0$ $> 65,0$	$K_{fB} = 1,3297 - 0,0091X + 6,5268E-5X^2$ $K_{fB} = 1,0$
5,0	$\leq 77,5$ $> 77,5$	$K_{fB} = 4,12803 - 0,16387X + 0,00357X^2 - 4,0125E-5X^3 + 2,30301E-7X^4 - 5,34998E-10X^5$ $K_{fB} = 1,0$
9,0	$\leq 130,0$ $> 130,0$	$K_{fB} = 12,3089 - 0,4622X + 0,0075X^2 - 5,9775E-5X^3 + 2,3176E-7X^4 - 3,4729E-10X^5$ $K_{fB} = 1,0$
13,0	$\leq 150,0$ $> 150,0$	$K_{fB} = 10,4241 - 0,2718X + 0,0029X^2 - 1,3081E-5X^3 + 1,727E-8X^4 + 1,965E-11X^5$ $K_{fB} = 1,0$
35,0	$\leq 190,0$ $> 190,0$	$K_{fB} = 10,5077 - 0,12011X - 3,03666E-4X^2 + 1,24365E-5X^3 - 7,1457E-8X^4 + 1,29641E-10X^5$ $K_{fB} = 1,0$
40,0	$\leq 197,5$ $> 197,5$	$K_{fB} = 13,5363 - 0,2268X + 0,0013X^2 + 3,7436E-7X^3 - 2,6793E-8X^4 + 6,4665E-11X^5$ $K_{fB} = 1,0$
45,0	$\leq 202,5$ $> 197,5$	$K_{fB} = 21,0228 - 0,5147X + 0,0057X^2 - 3,2316E-5X^3 + 9,1058E-8X^4 - 1,0072E-10X^5$ $K_{fB} = 1,0$
50,0	210,0	$K_{fB} = 25,8639 - 0,6728X + 0,0078X^2 - 4,6051E-5X^3 + 1,3513E-7X^4 - 1,5641E-10X^5$

где: $X = D_p$, мм

делительного коэффициента K_{fB} на расстояниях от торца $J = 3, 5, 9, 13, 35, 40, 45$ и 50 мм (таблица 3). В графическом виде делительные коэффициенты K_{fB} для борсодержащих сталей представлены на рисунке 5.

В откорректированном виде методика расчета прокаливаемости по стандарту ASTM A 255–07 характеризуется хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных для ряда конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016. На рисунках 6–8 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных для сталей 20ХН3А, 18ХГТ и 20ХНР, показавшие хорошую сходимость.

Полученные данные показывают, что сравнительную оценку прокаливаемости по разработанному методу следует проводить по среднему химическому составу, так как данные прокаливаемости, приведенные в ГОСТ 4543–2016, не соответствуют максимальному и минимальному содержанию легирующих элементов, по которому определяется прокаливаемость расчетным методом. Примером

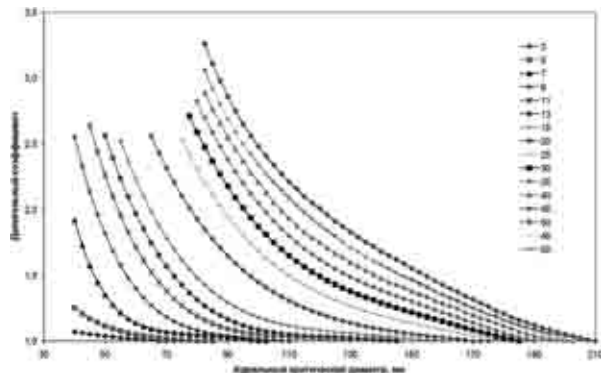


Рисунок 5 — Делительные коэффициенты K_{fB} для борсодержащих сталей
 Figure 5 — Dividing factors K_{fB} for boron-containing steels

служит рисунок 6, на котором приведена прокаливаемость стали 20ХН3А: расчетная полоса прокаливаемости (1), рассчитанная при максимальном и минимальном химическом составе, марочная полоса прокаливаемости (2) по ГОСТ 4543–2016, расчетная прокаливаемость при фактическом содержании элементов (3), совпадающая с экспериментальными данными (4). Из рисунка 6 можно определить, что при среднем содержании элементов расчетные данные совпадают с данными по прокаливаемости стали 20ХН3А, приведенными в ГОСТ 4543–2016.

Сравнение данных по полосе прокаливаемости стали 20ХГР, приведенных в ГОСТ 4543–2016, с расчетными (см. рисунок 8) показало расхождение

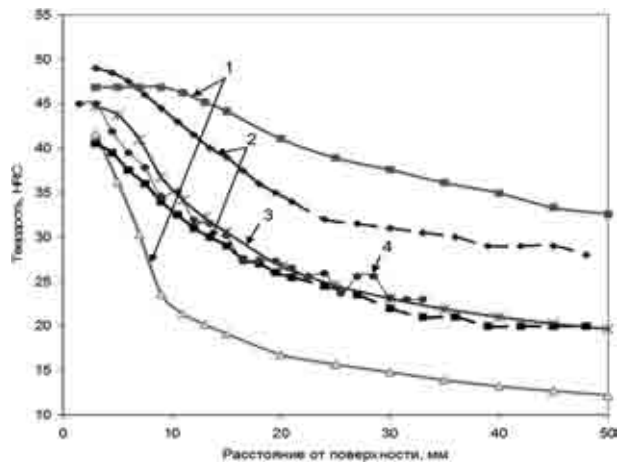


Рисунок 6 — Полосы прокаливаемости для стали 20ХН3А:
 1 — расчетные данные; 2 — марочная полоса прокаливаемости по ГОСТ 4543–2016; 3 — расчетные данные по фактическому составу; 4 — экспериментальные данные по фактическому составу
 Figure 6 — Hardenability bands for steel 20KhN3A: 1 — calculated data; 2 — grade hardenability band according to GOST 4543–2016; 3 — calculated data on actual composition; 4 — experimental data on actual composition

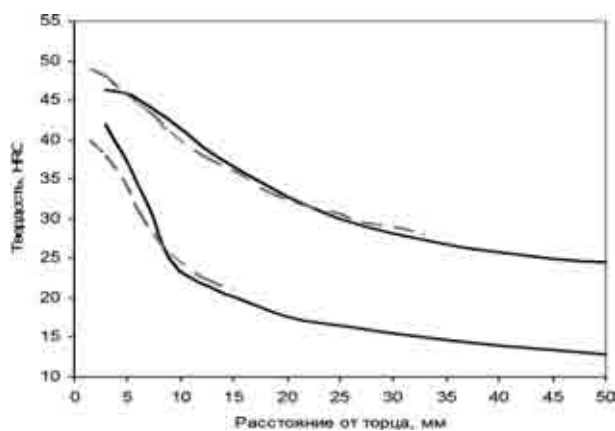


Рисунок 7 — Полосы прокаливаемости для стали 18ХГТ:
сплошные линии — расчетные данные; штриховые —
марочная полоса прокаливаемости по ГОСТ 4543–2016

Figure 7 — Hardenability bands for steel 18KhGT:
solid lines — calculated data; dashed lines — grade hardenability
band according to GOST 4543–2016

ние при минимальном содержании легирующих элементов, для которого максимальная расчетная твердость составила 43 HRC, а в ГОСТ 4543–2016 приведено значение 36 HRC. Аналогичный результат был получен в работе [12] при расчете прокаливаемости бористых сталей по методу J-406 SAE, в которой отмечена причина такого расхождения, заключающаяся в наличии полосчатости и разнотерности структуры конкретных плавок в производстве.

Выводы. На основании экспериментальной проверки показана возможность использования стандарта ASTM A 255–07 для оценки прокаливаемости конструкционных сталей, изготавливаемых в соответствии с ГОСТ 4543–2016. При проведении анализа выявлен ряд неточностей корреляционных зависимостей в стандарте ASTM A 255–07. Эти неточности скорректированы в данной работе в соответствии с экспериментальными данными. На базе собственных экспериментальных данных, а также с учетом результатов исследований других авторов в методику внесены существенные изменения и дополнения применительно к расчету прокаливаемости конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016. В связи с разработкой новых экономно-легируемых конструкционных сталей установлены дополнительные множительные коэффициенты для расчета прокаливаемости этих сталей.

Скорректированный метод расчета прокаливаемости по стандарту ASTM 255–07 характеризуется хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных для конструкционных сталей с химическим составом по ГОСТ 4543–2016. Использование разработанного метода будет способствовать снижению затрат, связанных как с разра-

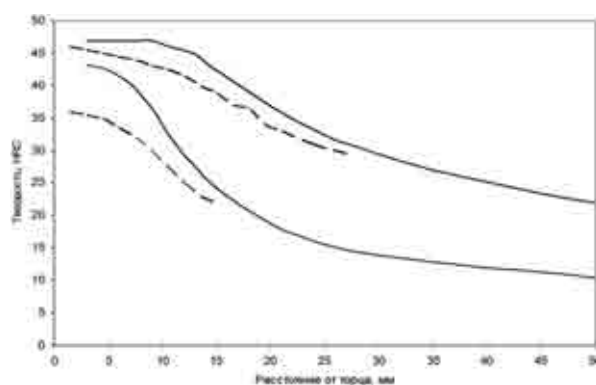


Рисунок 8 — Полосы прокаливаемости для стали 20ХГР:
сплошные линии — расчетные данные; штриховые —
марочная полоса прокаливаемости по ГОСТ 4543–2016

Figure 8 — Hardenability bands for steel 20KhGR:
solid lines — calculated data; dashed lines — grade hardenability
band according to GOST 4543–2016

боткой новых марок сталей, так и с улучшением механических свойств существующих марок сталей для обеспечения необходимого уровня эксплуатационных характеристик деталей машин.

Список литературы

1. Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск, 1999. — 177 с.
2. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
3. Технология термической обработки стали: справ. изд. / Р. Бернст [и др.]; пер. с нем. Б.Е. Левина; под ред. М.Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1981. — 608 с.
4. EN ISO 642:1999. Steel. Hardenability test by end quenching (Jominy test). — Mode of access: <https://www.iso.org/standard/1228.html>.
5. ASTM A 255-07: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. — Mode of access: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/A255-07.htm>.
6. Grossmann, M.A. Hardenability Calculated from Chemical Composition / M.A. Grossmann // Trans. AIME. — 1942. — Vol. 15. — Pp. 227–259.
7. Grossmann, M.A. Elements of Hardenability / M.A. Grossmann. — Cleveland: American Society for Metals, 1952. — 164 p.
8. Носов, В.Б. Расчет прокаливаемости конструкционных сталей по химическому составу / В.Б. Носов, С.А. Юрасов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1995. — № 1. — С. 19–24.
9. Структурные особенности экономнолегируемой стали 20ХГНМБ после химико-термического упрочнения / С.П. Руденко [и др.] // Литье и металлургия. — 2014. — № 2. — С. 86–90.
10. Руденко, С.П. Новая экономно-легируемая сталь для высокотемпературной цементации зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько, А.Н. Чичин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: мат. междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 27–28 апреля 2018) / редкол. И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: БРУ, 2018. — С. 52–53.
11. Универсальная программа расчета прокаливаемости конструкционных сталей / С.П. Руденко [и др.] // Литейное производство и металлургия — 2015: тр. 23-й междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 21–22 окт. 2015 г. — С. 116–122.
12. Носов, В.Б. Расчет прокаливаемости борсодержащих сталей / В.Б. Носов, С.А. Юрасов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1995. — № 3. — С. 19–22.

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng.

Leading researcher¹

E-mail: sprud.47@mail.ru

VALKO Aleksandr L.

Senior researcher¹

E-mail: valcoalex5@gmail.com

SANDOMIRSKII Sergei G., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹

E-mail: sand_work@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 June 2019.

APPLICATION OF STANDARD ASTM A 255–07 TO CALCULATE HARDENABILITY OF STEELS PRODUCED ACCORDING TO GOST 4543–2016

The possibility of using standard ASTM A 255–07 is shown to assess the hardenability of structural steels manufactured in accordance with GOST 4543–2016. Inaccuracies of the standard are identified with respect to the correctness of correlation dependences. Significant additions and changes to the existing methodology have been made to the calculation of hardenability of structural steels with chemical composition in accordance with the GOST 4543–2016. Additional multiplying factors for calculating the hardenability of sparingly alloyed steels are established. It is shown that in the corrected form the method of hardenability calculation according to standard ASTM 255–07 is characterized by a good agreement of calculated and experimental data for a number of structural steels with chemical composition according to GOST 4543–2016. It is established that the comparative assessment of hardenability by the developed method should be carried out with the average chemical composition, as the data of hardenability given in GOST 4543–2016, do not correspond to the maximum and minimum composition of alloying elements, by which the hardenability is determined with the help of calculation method.

Keywords: structural steels, hardenability, method of calculation

References

1. Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley* [Chemical heat reinforcement of heavily stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 177 p.
2. Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktная ustalost zubchatykh kolez transmisyi energonasyshchennykh mashin* [Contact fatigue of transmissions gearwheels of high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 126 p.
3. Eckstein H.-J. *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976. 672 p.
4. EN ISO 642:1999. *Steel. Hardenability test by end quenching (Jominy test)*. Switzerland, International Organization for Standardization, 1999. 18 p.
5. ASTM A 255-07. *Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2007. 26 p.
6. Grossmann M.A. Hardenability Calculated from Chemical Composition. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1942, vol. 150, pp. 227–259.
7. Grossmann M.A. *Elements of Hardenability*. Cleveland, American Society for Metals, 1952. 164 p.
8. Nosov V.B., Yurasov S.A. Raschet prokalivaemosti konstruktsionnykh staley po khimicheskomu sostavu [Calculation of calcination of structural steels by chemical composition]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1995, no. 1, pp. 19–24.
9. Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L., Chichin A.N. Strukturnye osobennosti ekonomnolegirovannoy stali 20KhGNMB posle khimiko-termicheskogo uprochneniya [Structural features of sparingly alloyed steel 20KhGNMB after chemical and thermal hardening]. *Lite i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2014, no. 2, pp. 86–90.
10. Rudenko S.P., Valko A.L., Chichin A.N. Novaya ekonomnolegirovannaya stal dlya vysokotemperaturnoy tsementatsii zubchatykh kolez [New sparingly alloyed steel for high-temperature cementation of gears]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii"* [Proc. international scientific and technological conference "Materials, equipment and resource-saving technologies"]. Mogilev, 2018, pp. 52–53.
11. Rudenko S.P., Shipko A.A., Valko A.L., Vengura A.V., Baradyntseva E.P., Radionov A.V., Zakhorevich S.V. Universalnaya programma rascheta prokalivaemosti konstruktsionnykh staley [Universal program of the calculation of hardenability of structural steels]. *Trudy 23-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Liteynoe proizvodstvo i metallurgiya"* [Proc. 23th international scientific and technological conference "Foundry and metallurgy"]. Zhlobin, 2015, pp. 116–122.
12. Nosov V.B., Yurasov S.A. Raschet prokalivaemosti borsoderzhashchikh staley [Calculation of calcination of boron-containing steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical metallurgy and heat treatment of metals], 1995, no. 3, pp. 19–24.