

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: valcoalex@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 07.07.2020.

РАЗРАБОТКА МИНИМАЛЬНО ЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ДЛЯ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТРАНСМИССИЙ

В мировой практике изготовления зубчатых колес для автотракторной техники ведется поиск новых, более эффективных марок сталей и способов реализации их преимуществ, достигаемых как при выплавке, так и при дальнейшей термической, деформационной и химико-термической обработке. Отмечается тенденция уменьшения содержания никеля в конструкционных марках стали с заменой их на экономнолегированные, микролегированные сильными карбидообразующими элементами. Условием применения экономнолегированных конструкционных сталей является умение найти компромисс между повышением надежности и долговечности деталей машин и экономией дефицитных легирующих материалов. Исходя из этого, в статье сформулированы основные положения, которые необходимо учитывать при разработке минимально легированных составов конструкционных сталей для изготовления высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин. Показано, что внедрение новых экономнолегированных марок сталей приводит к необходимости разработки новых технологий с решением в каждом конкретном случае задачи по оценке влияния легирующих элементов и микродобавок на прокаливаемость стали. Приведена методика минимального легирования стали для зубчатых колес с модулем 10 мм. На основе применения нового подхода разработана новая минимально легированная конструкционная сталь, обеспечивающая высокие показатели прочностных, усталостных и технологических характеристик крупномодульных зубчатых колес. Определена прокаливаемость сердцевины и цементованных слоев разработанной стали, обеспечивающая ресурс зубчатых колес не менее 1000 ч в условиях работы при контактных напряжениях в полюсе зацепления $\sigma_H = 1800$ МПа.

Ключевые слова: экономнолегированные конструкционные стали, прокаливаемость, минимальное легирование, методика расчета

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-52-59>

Снижение удельной металлоемкости изделий энергонасыщенных машин при высокой надежности и долговечности их работы является одной из важнейших задач современного машиностроения. Актуальной является также задача снижения стоимости применяемых материалов и экономии стратегически важных легирующих элементов при их создании. Такие требования заставляют производителей сталей искать способы снижения их себестоимости без потери эксплуатационных качеств изделий. В истории разработки составов конструкционных сталей на вопрос о том, какие свойства

имеют решающее значение для обеспечения надежности детали, не всегда давался определенный ответ [1]. Долгое время считали наилучшей ту сталь, которая имела все свойства по возможности высокими, не задумываясь о том, какие же свойства имеют решающее значение для надежной работоспособности изделий. Поэтому для зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин широко применяли комплексно легированные марки конструкционных сталей типа 18X2H4BA, 20X2H4A (ГОСТ4543—71) и др., которые считались наиболее высокопрочными, не принимая во вни-

мание их высокую стоимость и не технологичность в производстве [2].

Перспективным направлением, позволяющим значительно повышать механические и технологические свойства сталей при одновременной экономии дорогостоящих легирующих материалов, является микролегирование, которое оказывает существенное влияние на чистоту стали, изменяет условия кристаллизации, строение приграничных зон зерен, способствует получению однородной дисперсной структуры [3]. Так, настоящим «прорывом» в металлургии является открытие способности микролегирующих добавок ниобия повышать прочностные свойства и одновременно снижать температурную область хрупкого разрушения сталей [4]. Результаты исследований последних лет указывают на эффективность использования экономнолегированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес [5, 6]. Показано также, что экономно-легированные стали могут быть успешно применены и для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин при условии регламентированного распределения механических свойств материала по толщине упрочненного слоя [7], тщательном учете условий эксплуатации изделий, установлении критериев работоспособности деталей и определении важнейших требований к стали, определяющих долговечную эксплуатацию деталей.

Однако практика разработки экономно-легированных сталей для зубчатых колес трансмиссий показала, что их успешное применение возможно только при удовлетворении целого комплекса свойств, как правило, трудно сочетаемых, например прочности и ударной вязкости, твердости и пластичности и т. п. Отмеченные обстоятельства привели к необходимости разработки новых подходов для достижения требуемой структуры, высоких показателей прочностных, усталостных и технологических характеристик экономнолегированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес.

Одними из таких подходов являются следующие положения, основанные на совокупности результатов теоретических и экспериментальных исследований [5–9], которые необходимо учитывать при разработке минимально легированных составов конструкционных сталей для изготовления высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин:

- концепция минимального легирования сталей основывается на обеспечении регламентированной величины поверхностной твердости (микротвердости) и ее распределения по толщине диффузионного слоя при минимально допустимой твердости и прочности сердцевины с применением микродобавок карбидообразующих элементов при одновременной экономии дорогостоящих легирующих элементов (Ni, Mo, Cr и др.) с учетом их влияния на прокаливаемость сталей;

- гарантией обеспечения требуемых характеристик сопротивления усталости высоконапряженных зубчатых колес является обеспечение эффективной толщины диффузионного слоя до значений микротвердости 750, 700, 600 HV_{0,2} (ГОСТ 30634–99);

- регламентированное распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя определяется с применением методики расчета ресурса зубчатых колес, основанной на экспериментальной зависимости между сопротивлением глубинной контактной усталости поверхностно-упрочненных зубьев зубчатых колес и комплексом механических и структурных характеристик диффузионных слоев по сечению зубьев в зоне действия подповерхностных максимальных контактных напряжений [10];

- оценка прокаливаемости зубьев зубчатых колес производится на основе виртуального моделирования торцевой закалки [11] с учетом экспериментальной зависимости, устанавливающей соответствие скоростей охлаждения с разной интенсивностью в отмеченных зонах по поперечному сечению зубьев шестерен с различным модулем со скоростями охлаждения по длине торцевого образца при торцевой закалке [12].

Цель работы — разработка минимально легированной конструкционной стали для крупномодульных зубчатых колес с учетом критериев обеспечения сопротивления усталости и прокаливаемости материала.

Исходными данными для разработки стали для крупномодульных зубчатых колес являются: геометрические параметры зубчатой передачи, эксплуатационный нагрузочный режим, регламентированное значение ресурса и базовый химический состав стали, состоящий из основных легирующих элементов (Mn, Cr, Ni, Mo), например стали типа 20ХГНМ.

Определение требуемой величины микротвердости и градиента ее распределения по упрочненному слою зубьев. Начальным этапом разработки минимально легированной конструкционной стали является определение требуемой величины микротвердости и градиента ее распределения по упрочненному слою зубьев, обеспечивающих заданный ресурс. Требуемое распределение микротвердости по толщине слоя поверхностно-упрочненных зубчатых колес определяется на основе математической модели [13], позволяющей с учетом напряженного состояния в подповерхностной зоне контакта сопряженных зубьев прогнозировать ресурс по толщине упрочненного слоя. По результатам расчета путем сравнения полученного значения ресурса с регламентированной величиной назначаются технические требования к величине микротвердости и ее распределению по толщине диффузионного слоя.

Расчетная математическая модель, реализованная на алгоритмических языках Fortran и Object

Pascal в интегрированной среде Delfi [14], дает возможность для заданных параметров зубчатой пары и условий нагружения получать расчетные значения ресурса зубчатого колеса в часах работы (или км пробега) по всей толщине упрочненного слоя зубьев с интервалом через 0,1 мм при значениях микротвердости в диапазоне от 600 до 860 HV_{0,2}.

В качестве примера приведен расчет зубчатых колес с модулем 10 мм по режиму стендовых испытаний: крутящий момент $T = 6500 \text{ Н}\cdot\text{м}$, частота вращения $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, величина контактного напряжения в полюсе зацепления $\sigma_H = 1800 \text{ МПа}$ (таблица 1). Регламентированная величина ресурса — 1000 ч.

Результаты расчета показали, что опасная зона упрочненного слоя, характеризующаяся наименьшей долговечностью при величине микротвердости 700–750 HV_{0,2} и выше, находится на расстоянии 0,6–0,7 мм от поверхности контакта. Для обеспечения заданного ресурса минимальная эффективная толщина упрочненного слоя ведущей шестерни должна составлять 0,8 мм до микротвердости 780 HV_{0,2}; 1,0 мм — до 750 HV_{0,2}; 1,2 мм — до 700 HV_{0,2}; 1,5 мм — до 600 HV_{0,2} и 1,6 мм — до полупереходной зоны цементованного слоя с микротвердостью 550 HV_{0,2} (50 HRC). На боковой поверхности зубьев достаточно иметь величину микротвердости 730–770 HV_{0,2} (59–61 HRC).

Обеспечение сопротивления усталости при изгибе зубьев. Важным условием долговечной работы зубчатых колес в течение регламентированного ресурса является обеспечение сопротивления усталости при изгибе зубьев, которое формируется пределом выносливости материала. Согласно результатам расчета по программе [14] получили, что для обеспечения ресурса 1000 ч в условиях отнулевого (пульсационного) цикла нагружения предел выносливости при изгибе зубьев должен быть не менее $\sigma_{r\text{lim}}^0 = 800 \text{ МПа}$. По методике [15], используя зависимость предела выносливости при изгибе зубьев зубчатых колес от механических свойств материала, определили необходимую величину временного сопротивления материала $\sigma_b = 1200 \text{ МПа}$. На основании экспериментальных зависимостей временного сопротивления и твер-

Таблица 2 — Химический состав (масс.%) минимально легированной стали, обеспечивающий твердость сердцевины 37 HRC зубчатых колес с модулем 10 мм
Table 2 — Chemical composition (wt.%) of minimally alloyed steel, providing a core hardness of 37 HRC of gears with a module of 10 mm

C	Si	Ni	Mn	Mo	Cr	Nb	Cu
0,23	0,35	0,70	1,00	0,35	0,70	0,07	0,2

дости сталей [16], заменяя твердость по Бринеллю HB твердостью по Роквеллу HRC по зависимости $HRC = 39,223 \cdot \ln(HB) - 192,11$ [17], получили соответствующую требуемую величину твердости сердцевины 37 HRC.

Далее, используя соответствие между расстоянием от охлаждаемого торца торцового образца при испытании по методу торцевой закалки и модулем зубчатого колеса [12], установили, что для $m = 10 \text{ мм}$ твердость поверхности зуба шестерни эквивалентна твердости торцового образца на расстоянии 6 мм от охлаждаемого торца, твердость полупереходной зоны эквивалентна твердости образца на расстоянии 7,5 мм от торца, а твердость сердцевины — на расстоянии 32 мм при интенсивности охлаждения в закалочном оборудовании $H = 0,3$.

По полученному расстоянию от охлаждаемого торца 32 мм с применением программы расчета прокаливаемости стали при торцевой закалке H-Steel [11] установили химический состав стали, обеспечивающий твердость сердцевины зуба 37 HRC (таблица 2). Химический состав определяли на основе известных данных по влиянию легирующих элементов на свойства и структурные характеристики стали (механические свойства, содержание остаточного аустенита и т. д.) варьированием содержания основных легирующих элементов, таких как марганец, хром, никель и молибден, обеспечивающих в совокупности требуемую прокаливаемость сердцевины. На рисунке 1 приведена прокаливаемость стали с химическим составом, согласно таблице 2, в виде зависимости твердости HRC от расстояния h от охлаждаемого торца торцового образца.

Для того чтобы определить способность стали с разработанным химическим составом обеспечить требуемое распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя после проведения

Таблица 1 — Результаты расчета ресурса ведущей шестерни, обеспечиваемого сопротивлением глубинной контактной усталости активных поверхностей зубьев при стендовом режиме нагружения, км

Table 1 — Results of calculating the drive gear life provided by the resistance of the deep contact fatigue of the teeth active surfaces under bench loading mode, km

	Расстояние от поверхности, мм														
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
550	77	*	23	*	25	*	41	*	83	*	186	*	435	*	1021
600	286	92	59	52	55	65	84	113	159	230	340	509	766	1157	1749
700	*	1053	471	329	292	304	351	437	573	782	1101	1574	*	*	*
750	*	*	1519	895	740	678	734	868	1092	1446	*	*	*	*	*
780	*	*	*	*	1242	1118	1157	1320	*	*	*	*	*	*	*

Примечание: * — ресурс не определялся

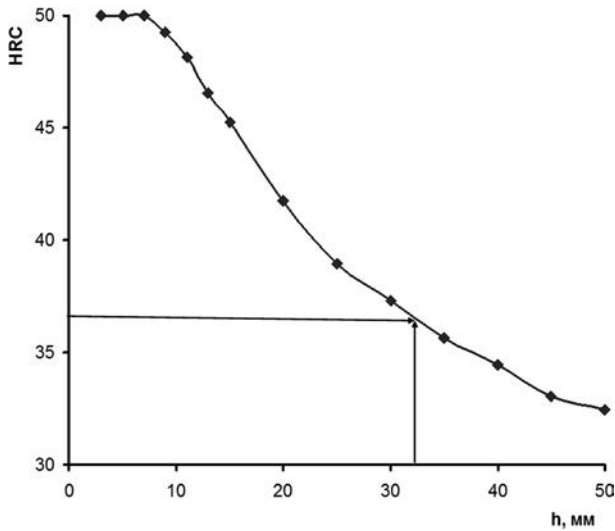


Рисунок 1 — Прокаливаемость экономнолегированной стали с минимальным химическим составом для зубчатого колеса с модулем 10 мм (расчет по программе H-Steel)

Figure 1 — Hardenability of sparingly alloyed steel with a minimum chemical composition for a gear with a module of 10 mm (calculated using the H-Steel program)

полного цикла упрочняющей химико-термической обработки, выполнили расчет прокаливаемости по программе H-Steel при разном содержании углерода (рисунок 2). Так как после закалки зубчатых колес применяется операция низкого отпуска, а при расчете прокаливаемости стали при торцевой закалке низкий отпуск не учитывается, то в первом приближении принимаем, что величина микротвердости цементованного слоя HV_{0,2} после низкого отпуска должна быть снижена на 30–100 ед. в зависимости от величины микротвердости после закалки.

По диаграмме прокаливаемости цементованного слоя (см. рисунок 2), полученной с приме-

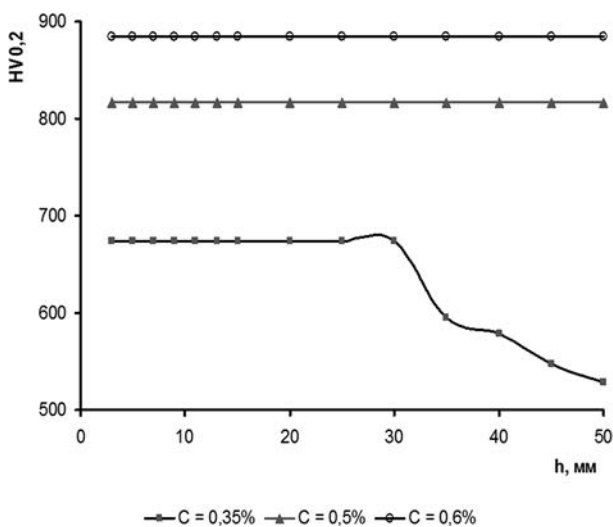


Рисунок 2 — Изоклеродная диаграмма прокаливаемости цементованных торцевых образцов минимально легированной стали для зубчатого колеса с модулем 10 мм (расчет по программе H-Steel)

Figure 2 — Iso-carbon hardenability diagram of cemented end samples of minimally alloyed steel for the gear with the 10 mm module (calculated using the H-Steel program)

нением программы H-Steel, определили содержание углерода в слое, обеспечивающее требуемое распределение микротвердости после проведения полного цикла упрочняющей химико-термической обработки. С учетом операции низкого отпуска микротвердость упрочненного слоя 800 HV_{0,2} обеспечивается при содержании углерода 0,60 %, а микротвердость 750 HV_{0,2} — при содержании углерода 0,50 %. Требования к эффективной толщине до микротвердостей 780, 750, 700, 600 HV_{0,2} и до полупереходной зоны (0,35 %C) обеспечиваются с большим запасом (см. рисунок 2).

Анализ влияния микролегирующих элементов на структуру и свойства стали. Как было указано выше, концепция минимального легирования сталей основывается на применении микродобавок карбидообразующих элементов, сотые доли процента которых оказывают существенное влияние на структуру и свойства стали. Влияние микролегирующих элементов в значительной мере связано с выделением избыточных фаз. Дисперсные выделения фаз, которые формируются в структуре при распаде пересыщенных твердых растворов, препятствуют движению дислокаций, вызывая упрочнение матрицы, кроме того, частицы оказывают влияние на размер аустенитного и ферритного зерна, тип структурных составляющих, тип и характер распределения дефектов кристаллического строения [4].

Учитывая растворимость элемента в аустените, практическое применение в качестве карбонитридообразующих элементов в стали могут иметь только титан, ванадий и ниобий [18]. Из этих элементов титан, в отличие от ванадия и ниобия, имеет сильную тенденцию к формированию мелкодисперсных оксидов, которые рассматриваются как включения, оказывающие неблагоприятное влияние на свойства стали, в частности на вязкость стали [18].

Микродобавки, находясь в твердом растворе, замедляют процессы, контролируемые диффузией (рост зерна, рекристаллизацию), а также влияют на возможность упрочнения путем дисперсионного твердения. Получено, что один и тот же эффект упрочнения достигается при использовании вдвое меньшего количества ниобия, чем ванадия [19]. Ниобий является эффективным микролегирующим элементом для измельчения зерна при высокотемпературной термической и термомеханической обработке. Кроме того, он имеет максимальный эффект торможения рекристаллизации аустенита при термомеханической обработке, которая приводит к такому измельчению зерна, которое не может быть достигнуто никаким процессом термической обработки. Мелкозернистость сталей с ниобием обеспечивает хорошую пластичность и вязкость при высокой прочности, что делает их особенно пригодными для цементуемых изделий. Введение ниобия кроме измельчения зерна способствует устранению химической и структурной

неоднородности, разнородности, повышению предела текучести, временного сопротивления разрыву, ударной вязкости и хладостойкости.

Установлено [20], что в стали, содержащей 0,15 %С, при температуре 900 °С практически весь ниобий находится в виде карбидных частиц. Роль этих частиц заключается в закреплении границ аустенитных зерен, в результате чего после γ - α -превращения формируется мелкозернистая структура. При температуре 1200 °С в стали, содержащей 0,2 %С, может раствориться до 0,04 % ниобия (Nb). Такое исходное содержание микролегирующего элемента (Nb) в твердом растворе аустенита является основой для проведения высокотемпературной термомеханической обработки путем торможения рекристаллизации в процессе прокатки.

Разработанный химический состав минимально легированной стали. Разработанный с учетом проведенного анализа химический состав минимально легированной стали близок к верхнему пределу химического состава стали марки 21ХГНМБА [21, 22] (таблица 3). Сталь 21ХГНМБА [22] характеризуется высокими механическими свойствами при статической и динамической нагрузках и имеет технологическое преимущество перед широко применяемыми марками сталей по ГОСТ 4543–2016, заключающееся в формировании в цементованном слое и сердцевине величины зерна № 8–9 при повышенной температуре цементации, что делает ее применимой для высокотемпературной цементации зубчатых колес с модулем 4–6 мм. Механические свойства стали 21ХГНМБА приведены в таблице 4.

На рисунке 3 приведена полоса прокаливаемости стали 21ХГНМБА [22] с минимальным (1) и максимальным (2) содержанием легирующих элементов, а также с линией прокаливаемости (3), соответствующей разработанному минимальному химическому составу стали для зубчатых колес с модулем 10 мм. Получено, что разработанный состав стали ближе к максимальному пределу разброса содержания легирующих элементов и прокаливаемости стали 21ХГНМБА [22].

Полученный минимально легированный состав стали является основой для разработки техни-

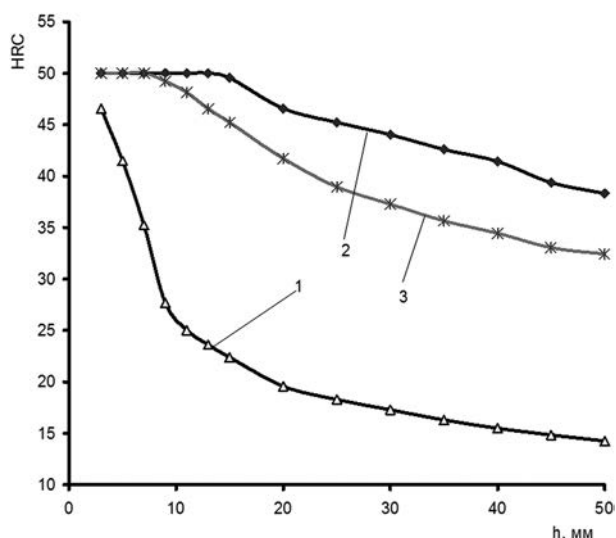


Рисунок 3 — Полоса прокаливаемости экономнолегированной стали 21ХГНМБА (патент № 031975 ЕПВ) с минимальным (1), максимальным (2) содержанием легирующих элементов, (3) — прокаливаемость разработанной стали (расчет по программе H-Steel)

Figure 3 — Hardenability band of sparingly alloyed steel 21KhGNMBA (21KhGNMBA) (patent No. 031975 EPO) with minimum (1), maximum (2) content of alloying elements, (3) — hardenability of the developed steel (calculated using the H-Steel program)

ческих требований к химическому составу с пределами по массовой доле легирующих элементов новой марки экономнолегированной стали для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных мобильных машин.

Заключение. Основные положения, которые необходимо учитывать при разработке минимально легированных составов конструкционных сталей для изготовления высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий мобильных машин, заключаются в следующем:

- концепция минимального легирования сталей основывается на обеспечении регламентированной величины поверхностной твердости (микротвердости) и ее распределении по толщине диффузионного слоя при минимально допустимой твердости и прочности сердцевины, с применением микродобавок карбидообразующих элементов при одновременной экономии дорогостоящих легирующих элементов с учетом их влияния на прокаливаемость сталей;

Таблица 3 — Химический состав стали для высокотемпературной цементации 21ХГНМБА (патент № 031975 ЕПВ)
Table 3 — Chemical composition of steel for high-temperature cementation 21ХГНМБА (21KhGNMBA) (patent No. 031975 EPO)

Состав	C	Si	Ni	Mn	Mo	Cr	Nb	Al	Ca
мин.	0,2	0,17	0,40	0,80	0,25	0,40	0,06	0,023	0,001
макс.	0,23	0,37	0,70	1,10	0,35	0,70	0,10	0,040	0,020
факт.	0,21	0,25	0,70	0,86	0,25	0,54	0,06	0,025	0,001

Таблица 4 — Механические свойства стали 21ХГНМБА (патент № 031975 ЕПВ)
Table 4 — Mechanical properties of steel 21ХГНМБА (21KhGNMBA) (patent No. 031975 EPO)

Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²
1200	1129	22,0	48,0	100,0

- регламентированное распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя определяется с применением методики расчета ресурса зубчатых колес, основанной на экспериментальной зависимости между сопротивлением глубинной контактной усталости поверхностно-упрочненных зубьев зубчатых колес и комплексом механических и структурных характеристик диффузионных слоев по сечению зубьев в зоне действия подповерхностных максимальных контактных напряжений;

- оценка прокаливаемости зубьев зубчатых колес производится на основе виртуального моделирования торцевой закалки на базе соотношения между расстоянием от охлаждаемого торца стандартного образца и модулем зубчатого колеса в зависимости от интенсивности охлаждения при закалке.

На основе применения разработанного подхода предложен новый минимально легированный состав конструкционной стали (см. таблицу 2). Показано, что прокаливаемость ее сердцевины и цементованных слоев обеспечивает ресурс зубчатых колес не менее 1000 ч в условиях работы при контактных напряжениях в полюсе зацепления $\sigma_H = 1800$ МПа.

Полученный минимально легированный состав стали является основой для разработки технических требований к химическому составу с пределами по массовой доле легирующих элементов новой марки экономнолегированной стали для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных мобильных машин, обеспечивающей высокие показатели их прочностных, усталостных и технологических характеристик.

Список литературы

1. Гудремон, Э. Специальные стали: в 2 т. / Э. Гудремон; под ред. С.А. Займовского [и др.]; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1966. — Т. 2. — 1274 с.
2. Сагарадзе, В.С. Повышение надежности цементуемых деталей / В.С. Сагарадзе. — М.: Машиностроение, 1975. — 216 с.
3. Браун, М.П. Экономно-легированные стали для машиностроения / М.П. Браун. — Киев: Наук. думка, 1977. — 208 с.
4. Ниобийсодержащие низколегированные стали / Ф. Хайстеркамп [и др.]. — М.: Интермет инжиниринг, 1999. — 94 с.
5. Руденко, С.П. Оценка применимости экономно-легированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.А. Валько, С.Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 346–349.
6. Руденко, С.П. Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономнолегированной стали / С.П. Руденко, А.А. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2(39). — С. 34–38.
7. Руденко, С.П. Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Сталь. — 2018. — № 8. — С. 54–58.
8. Руденко, С.П. Применение перспективных экономно-легированных марок сталей для зубчатых колес мобильных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 4(49). — С. 61–69.
9. Руденко, С.П. Преимущества применения экономнолегированных сталей для высоконагруженных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Тр. 27-й междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2019. Беларусь» / под общ. ред. Е.И. Маруковича. — Жлобин, 16–17 окт. 2019. — С. 122–126.
10. Руденко, С.П. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин с учетом качества химико-термического упрочнения / С.П. Руденко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 4(13). — С. 58–60.
11. Руденко, С.П. Применение стандарта ASTM A 255-07 для расчета прокаливаемости сталей, изготавливаемых по ГОСТ 4543–2016 / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 3(48). — С. 51–57.
12. Руденко, С.П. Анализ применимости стали 20MnCr5S для зубчатых колес отечественных мобильных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Литье и металлургия. — 2020. — № 1. — С. 44–49.
13. Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 5–7.
14. Расчет ресурса зубчатых колес трансмиссий (GearProg): комп. программа: св-во № 530 Респ. Беларусь / С.П. Руденко, О.В. Кузьменков, А.А. Шипко, А.Л. Валько; правообладатель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. — № С20130054; заявл. 26.07.13; опубл. 14.08.13 // Реестр зарегистр. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. — 2013. — 54 с.
15. Руденко, С.П. Зависимость предела выносливости при изгибе зубьев зубчатых колес от механических свойств материала / С.П. Руденко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. — Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. — С. 96–97.
16. Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по твердости / М.П. Марковец. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
17. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness [Electronic resource] / Designation: E140 – 07. Published January 2007. — 21 p. — Mode of access: https://www.academia.edu/27768624/Standard_Hardness_Conversion_Tables_for_Metals_Relationship_Among_Brinell_Hardness_Vickers_Hardness_Rockwell_Hardness_Superficial_Hardness_Knoop_Hardness_and_Scleroscope_Hardness_1.
18. Тот, Л. Карбиды и нитриды переходных металлов / Л. Тот. — М.: Мир, 1974. — 294 с.
19. Гольдштейн, М.И. Дисперсионное упрочнение стали / М.И. Гольдштейн, В.М. Фарбер. — М.: Металлургия, 1979. — 208 с.
20. Гольдштейн, М.И. Растворимость фаз внедрения при термической обработке стали / М.И. Гольдштейн, В.В. Попов. — М.: Металлургия, 1989. — 200 с.
21. Способ изготовления стальной детали: пат. ЕА № 031975 (13) В1 / С.П. Руденко, А.Л. Валько, А.А. Шипко, В.Л. Басинюк, Л.Р. Дудецкая, И.В. Фирсов, А.М. Бенеш, А.Е. Колесников, А.Н. Чичин. — Опубл. 29.03.2019.
22. Руденко, С.П. Сталь для высокотемпературной цементации / С.П. Руденко, А.Л. Валько, А.Н. Чичин // Сталь. — 2020. — № 2. — С. 56–60.

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

SANDOMIRSKI 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 07 July 2020.

DEVELOPMENT OF MINIMALLY ALLOYED STRUCTURAL STEEL FOR LARGE MODULE GEARS OF TRANSMISSIONS

In the world practice of manufacturing gears for automotive equipment, a search is being made for new, more effective steel grades and ways to realize their advantages, achieved both during smelting and during further thermal, deformation and chemical-thermal treatment. There is a tendency to reduce the nickel content in structural steel grades and replace them with sparingly alloyed, microalloyed with strong carbide-forming elements. The condition for using sparingly alloyed structural steels is the ability to find a compromise between increasing the reliability and durability of machine parts and saving deficient alloying materials. Based on this, the article formulates the main provisions that should be taken into account when developing minimally alloyed structural steel compositions for manufacturing highly stressed gears of mobile machine transmissions. It is shown that the introduction of new sparingly alloyed steel grades leads to the need to develop new technologies with the solution in each case of the problem of assessing the impact of alloying elements and microadditives on the hardenability of steel. The method of minimum doping of steel for gears with a module of 10 mm is given. Based on the application of a new approach, a new minimally alloyed structural steel has been developed that provides high strength, fatigue and technological characteristics of large module gears. The hardenability of the core and cemented layers of the developed steel is determined, which provides the life of the gears for at least 1,000 hours in operating conditions at contact stresses in the engagement pole $\sigma_H = 1,800$ MPa.

Keywords: sparingly alloyed structural steels, hardenability, minimal alloying, calculation method

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-52-59>

References

- Houdremont E. *Handbuch der Sonderstahlkunde. Zweiter Band*. Berlin, Springer-Verlag, 1956.
- Sagaradze V.S. *Povyshenie nadezhnosti tseментuemykh detaley* [Increasing the reliability of cemented parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 216 p. (in Russ.).
- Braun M.P. *Ekonomno-legirovannye stali dlya mashinostroeniya* [Sparingly alloyed steels for mechanical engineering]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 208 p. (in Russ.).
- Khaysterkamp F., Khulka K., Matrosov Yu.I., Morozov Yu.D., Efron L.I., Stolyarov V.I., Chevskaya O.N. *Niobiysoderzhashchie nizkolegировannye stali* [Niobium-containing low alloyed steels]. Moscow, Intermet inzhiniring Publ., 1999. 94 p. (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirsky S.G. *Otsenka primenimosti ekonomno-legirovannykh staley dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh kolez* [Evaluation of application of the sparingly alloyed steels for highly stressed gear wheels]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 346–349 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Razrabotka rezhimov khimiko-termicheskoy obrabotki zubchatykh kolez iz ekonomno-legirovannoy stali* [Development of the regimes of chemical heat treatment of gear wheels from sparingly alloyed steel]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2017, no. 2(39), pp. 34–38 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Osobennosti primeneniya ekonomno-legirovannykh staley dlya krupnomodulnykh zubchatykh kolez* [Features of application of sparingly alloyed steels for large module gears]. *Stal*, 2018, no. 8, pp. 54–58 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. *Primenenie perspektivnykh ekonomno-legirovannykh marok staley dlya zubchatykh kolez mobilnykh mashin* [Application of promising sparingly alloyed steel for gears of mobile machines]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 4(49), pp. 61–69 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. *Preimushchestva primeneniya ekonomno-legirovannykh staley dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh kolez* [Advantages of using sparingly alloyed steels for high-loaded gears]. *Trudy 27 Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Liteynoe proizvodstvo i metallurgiya 2019. Belarus"* [Proc. 27th International scientific and technical conference "Foundry and metallurgy 2019. Belarus"]. Zhlobin, 2019, pp. 122–126 (in Russ.).
- Rudenko S.P. *Raschet resursa zubchatykh kolez transmissii energonasyshchennykh mashin s uchetom kachestva khimiko-termicheskogo uprochneniya* [Calculation of the life of gear wheels of transmissions of energy-saturated machines, taking into account the quality of chemical heat hardening]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2010, no. 4, pp. 58–60 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. *Primenenie standarta ASTM A255-07 dlya rascheta prokalivaemosti*

- staley, izgotavlivaemykh po GOST 4543–2016 [Application of standard ASTM A255–07 to calculate hardenability of steels produced according to GOST 4543-2016]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 3, pp. 51–57 (in Russ.).
12. Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. Analiz primenimosti stali 20MnCrS5 dlya zubchatykh koles otechestvennykh mobilnykh mashin [Analysis of the applicability of steel 20MnCrS5 for gears of the domestic mobile machines]. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 44–49 (in Russ.).
 13. Rudenko S.P., Valko A.L. Osobennosti rascheta zubchatykh koles transmissiy na glubinnuyu kontaktную vynoslivost [Features of analysis of gear wheels of transmissions on deep seated endurance]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2015, no. 11, pp. 5–7 (in Russ.).
 14. Rudenko S.P., Kuzmenkov O.I., Shipko A.A., Valko A.L. *Raschet resursa zubchatykh koles transmissiy (GearProg). Svidetelstvo ob oftitsialnoy registratsii na EVM* [Calculating life of transmission gears i (GearProg). The certificate on official registration of the computer program]. No. C20130054, 2013 (in Russ.).
 15. Rudenko S.P. Zavisimost predela vynoslivosti pri izgibe zubev zubchatykh koles ot mekhanicheskikh svoystv materiala [Dependence of the endurance limit when bending the teeth of gears on the mechanical properties of the material]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii*, 2020, pp. 96–97 (in Russ.).
 16. Markovets M.P. *Opreделение mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of mechanical properties of metals by hardness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 191 p. (in Russ.).
 17. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. 2007. 21 p. Available at: https://www.academia.edu/27768624/Standard_Hardness_Conversion_Tables_for_Metals_Relationship_Among_Brinell_Hardness_Vickers_Hardness_Rockwell_Hardness_Superficial_Hardness_Knoop_Hardness_and_Scleroscope_Hardness_1.
 18. Toth L. *Transition Metal Carbides and Nitrides*. Academic Press, 1971. 296 p.
 19. Goldshteyn M.I., Farber V.M. *Dispersionnoe uprochnenie stali* [Dispersion hardening of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 208 p. (in Russ.).
 20. Goldshteyn M.I., Popov V.V. *Rastvorimost faz vnedreniya pri termicheskoy obrabotke stali* [The solubility of the injection phases during heat treatment of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 200 p. (in Russ.).
 21. Rudenko S.P., et al. *Sposob izgotovleniya stalnoy detali* [Method of manufacturing a steel part]. Patent EA, no. 031975, 2019 (in Russ.).
 22. Rudenko S.P., Valko A.L., Chichin A.N. Stal dlya vysokotemperaturnoy tsementatsii [Steel for high-temperature cementation]. *Stal*, 2020, no. 2, pp. 56–60 (in Russ.).